

CLIMATE CHANGE

30/2023

Teilbericht

# Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030

von:

Julia Repenning, Ralph Harthan (beide Projektleitung), Ruth Blanck, Hannes Böttcher, Sibylle Braungardt, Veit Bürger, Vanessa Cook, Lukas Emele, Katharina Göckeler, Wolf Kristian Görz, Florian Hacker, Klaus Hennenberg, Wolfram Jörß, Peter Kasten, Konstantin Kreye, Sylvie Ludig, Felix Chr. Matthes, Lorenz Moosmann, Christian Nissen, Judith Reise, Margarethe Scheffler, Katja Schumacher, Kirsten Wiegmann, Alexander Zerrahn

Öko-Institut, Berlin, Darmstadt, Freiburg

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

Jana Deurer, Jan Steinbach

Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES GmbH), Karlsruhe

**Herausgeber:**  
Umweltbundesamt



CLIMATE CHANGE 30/2023

Forschungsplan des Bundesministeriums für Wirtschaft  
und Klimaschutz

Forschungskennzahl 3720 41 501 0 – Teilbericht im Rah-  
men des Projektes „THG-Projektionen: Politikszenerarien  
für den Klimaschutz X“

FB 001163

Teilbericht

## **Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS- 2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030**

von

Julia Repenning, Ralph Harthan (beide Projektleitung), Ruth Blanck, Hannes  
Böttcher, Sibylle Braungardt, Veit Bürger, Vanessa Cook, Lukas Emele, Katharina  
Göckeler, Wolf Kristian Görz, Florian Hacker, Klaus Hennenberg, Wolfram Jörß,  
Peter Kasten, Konstantin Kreye, Sylvie Ludig, Felix Chr. Matthes, Lorenz  
Moosmann, Christian Nissen, Judith Reise, Margarethe Scheffler,  
Katja Schuma-cher, Kirsten Wiegmann, Alexander Zerrahn  
Öko-Institut, Berlin, Darmstadt, Freiburg

Heike Brugger, Tobias Fleiter, Tim Mandel, Matthias Reh-feldt, Clemens Rohde  
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI),  
Karlsruhe

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

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](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

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

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

### Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.  
Borkumstr. 2  
13189 Berlin

### Abschlussdatum:

Oktober 2022

### Redaktion:

Umweltbundesamt  
Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie  
Kai Wehnmann, Karlotta Schultz

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, 2. Auflage; aktualisierte Fassung Juli 2023

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

### **Kurzbeschreibung: Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030**

Im Rahmen des Projekts „THG-Projektionen: Politiksznarien für den Klimaschutz X“ wurde das Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) erarbeitet, dessen Instrumente eine Erreichung des Treibhausgasminderungsziels von 65 % im Jahr 2030 ermöglichen sollen. Dieser Bericht stellt die Ergebnisse der Modellierung, einschließlich der Treibhausgasminderung der einzelnen Politikinstrumente dar, die durch ein Konsortium deutscher Forschungsinstitute aus Öko-Institut, dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und dem Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt wurde.

Dieser Bericht umfasst drei Szenarien:

- ▶ **KIS-2030:** Das Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) enthält Politikinstrumente, die eine Erreichung des Treibhausgasminderungsziels von 65 % im Jahr 2030 sicherstellen sollen.
- ▶ **KIS-2030 (BEHG-Sensitivität):** In dieser Sensitivitätsrechnung wurde ermittelt, welche Treibhausgasemissionen sich ergeben würden, sofern der CO<sub>2</sub>-Preis des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) dem im Projektionsbericht 2021 angenommenen Preispfad entspräche. Die berücksichtigten Instrumente und deren Parametrisierung entsprechen denen im KIS-2030.
- ▶ **MMS:** Das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) wurde dem Projektionsbericht 2021<sup>1</sup> entnommen und umfasst alle bis zum 31. August 2020 beschlossenen und implementierten Instrumente und Maßnahmen.

Für die gesamten Treibhausgasemissionen (ohne Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft und internationalen Luft- und Seeverkehr) wird im KIS-2030 im Vergleich zu 1990 bis 2030 eine Minderung von 67,6 % erreicht, in der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 von 67,0 % und im MMS von 49,3 %.

### **Abstract: Climate Policy Instruments Scenario 2030**

As part of the project “GHG Projections: ‘Policy Scenarios for Climate Protection X’”, the Climate Policy Instruments Scenario 2030 (KIS-2030) was developed. It is expected that this scenario’s instruments enable the greenhouse gas reduction target of 65 % in 2030 to be achieved. This report presents the modelling results including the GHG reductions of the different policy instruments. A consortium of German research institutes consisting of Oeko-Institut, the Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI) and the Institute for Resource Efficiency and Energy Strategies (IREES) carried out this research on behalf of the German Federal Environmental Agency.

This report includes three scenarios:

- ▶ **KIS-2030:** The Climate Policy Instruments Scenario 2030 (KIS-2030) contains policy instruments that ensure the GHG reduction target of 65 % in 2030 is achieved.
- ▶ **KIS-2030 (BEHG sensitivity):** In this sensitivity calculation, the greenhouse gas emissions were determined which would result if the CO<sub>2</sub> price of the German Federal Fuel Emission

<sup>1</sup> Öko-Institut et al. (2021).

Trading Act (BEHG) corresponded to the price path assumed in the 2021 Projection Report. The instruments considered and their parameterization correspond to those in KIS-2030.

- ▶ MMS: The With Measures Scenario (MMS) was taken from the Projection Report 2021 and comprises all instruments and measures adopted and implemented by 31<sup>st</sup> August 2020.

As regards the total GHG emissions (excluding land use, land use change and forestry, international aviation and maritime transport), a reduction of 67.6 % compared to 1990 levels is achieved by 2030 in KIS-2030; in the BEHG sensitivity of KIS-2030 and the MMS, reductions of 67.0 % and 49.3 % are achieved, respectively.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	17
Tabellenverzeichnis.....	23
Abkürzungsverzeichnis.....	31
Zusammenfassung.....	36
Summary.....	41
Kernindikatoren.....	46
1 Einleitung.....	52
2 Methodischer Ansatz.....	55
2.1 Definition und Abgrenzung der Sektoren.....	55
2.2 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektionen.....	58
2.3 Ergebnisintegration.....	61
2.4 Berücksichtigung der Corona-Pandemie in den Projektionen.....	62
2.5 Modellierte Szenarien und Sensitivitäten.....	63
2.5.1 MMS.....	63
2.5.2 KIS-2030.....	64
2.5.3 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	65
3 Rahmenannahmen.....	66
4 Übergreifende Instrumente und deren Parametrisierung.....	69
4.1 KIS-2030.....	69
4.1.1 Reform der Energie- und CO <sub>2</sub> -Besteuerung.....	69
4.1.1.1 Anpassung der Preise im BEHG.....	69
4.1.1.2 EEG-Umlage.....	71
4.1.1.3 Energiesteuer.....	71
4.1.1.4 Steigerung der Ambition im EU ETS und höherer Zertifikatepreis.....	72
4.1.1.5 Konzessionsabgabe.....	74
4.1.1.6 Stromsteuer.....	74
4.1.2 Einführung eines Weiße-Zertifikate-Systems für Energieeffizienz.....	75
4.1.3 Ambitioniertere Ausgestaltung der Mindeststandards unter den EU-Verordnungen zur umweltgerechten Produktgestaltung und der Sustainable Products Initiative.....	76
4.1.4 Einführung von Umweltmanagementsystemen nach EMAS / LUMAS <sup>Plus</sup> in der Bundesverwaltung.....	76

4.1.5	Kommunalen Klimaschutz über die Nationale Klimaschutzinitiative (NKI) stärken .....	76
4.1.5.1	Investive Kommunale Klimaschutz-Modellprojekte .....	76
4.1.5.2	Stärkung der Förderung des kommunalen Klimaschutzes im Rahmen der Kommunalrichtlinie .....	77
4.1.6	Steuerung der Bioenergienachfrage .....	77
4.1.7	Beratung und Förderung für Ressourceneffizienz und -substitution .....	79
4.2	MMS.....	80
5	Energiewirtschaft .....	81
5.1	Stromerzeugung und gekoppelte Wärmeerzeugung.....	81
5.1.1	Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick .....	81
5.1.2	Methodik.....	81
5.1.3	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	82
5.1.4	Instrumente und deren Parametrisierung.....	83
5.1.4.1	KIS-2030 .....	83
5.1.4.2	MMS.....	88
5.1.5	Ergebnisse .....	88
5.1.5.1	KIS-2030 .....	88
5.1.5.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	99
5.1.5.3	MMS.....	101
5.1.5.4	Vergleich der Szenarien .....	106
5.1.5.5	Bewertung der Instrumente .....	113
5.2	Übrige Energiewirtschaft .....	115
5.2.1	Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick .....	115
5.2.2	Methodik.....	115
5.2.3	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	116
5.2.4	Instrumente und deren Parametrisierung.....	116
5.2.4.1	KIS-2030 .....	116
5.2.4.2	MMS.....	118
5.2.5	Ergebnisse .....	118
5.2.5.1	KIS-2030 .....	118
5.2.5.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	123
5.2.5.3	MMS.....	124
5.2.5.4	Vergleich der Szenarien .....	127
5.3	Diffuse Emissionen aus Brennstoffen .....	132

5.3.1	Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick .....	132
5.3.2	Methodik.....	132
5.3.3	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	132
5.3.4	Instrumente und deren Parametrisierung.....	132
5.3.5	Ergebnisse .....	132
5.3.5.1	KIS-2030 .....	132
5.3.5.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	134
5.3.5.3	MMS.....	134
5.3.5.4	Vergleich der Szenarien .....	137
5.4	Gesamtergebnisse Energiewirtschaft .....	139
5.4.1	KIS-2030 .....	139
5.4.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	141
5.4.3	MMS.....	142
5.4.4	Vergleich der Szenarien .....	143
6	Industrie .....	146
6.1	Instrumente .....	146
6.1.1	Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick .....	146
6.1.2	Instrumente und deren Parametrisierung.....	148
6.1.2.1	KIS-2030 .....	148
6.1.2.2	MMS.....	164
6.2	Energieverbrauch (ohne Industriekraftwerke) .....	165
6.2.1	Methodik.....	165
6.2.2	Rahmendaten.....	166
6.2.3	Ergebnisse .....	168
6.2.3.1	KIS-2030 .....	168
6.2.3.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	186
6.2.3.3	MMS.....	186
6.2.3.4	Vergleich der Szenarien .....	187
6.3	Industriekraftwerke .....	189
6.3.1	Methodik.....	189
6.3.2	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	189
6.3.3	Ergebnisse .....	190
6.3.3.1	KIS-2030 .....	190
6.3.3.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	191

6.3.3.3	MMS.....	192
6.3.3.4	Vergleich der Szenarien .....	193
6.4	Industrieprozesse und Produktverwendung (CO <sub>2</sub> -, CH <sub>4</sub> -, und N <sub>2</sub> O-Emissionen).....	195
6.4.1	Methodik.....	195
6.4.2	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	195
6.4.3	Ergebnisse.....	195
6.4.3.1	KIS-2030.....	195
6.4.3.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	198
6.4.3.3	MMS.....	199
6.4.3.4	Vergleich der Szenarien .....	200
6.5	Industrieprozesse und Produktverwendung (Fluorierte Treibhausgase) .....	202
6.5.1	Methodik.....	202
6.5.2	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	202
6.5.3	Ergebnisse.....	203
6.5.3.1	KIS-2030.....	203
6.5.3.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	207
6.5.3.3	MMS.....	207
6.5.3.4	Vergleich der Szenarien .....	208
6.6	Gesamtergebnisse Industrie .....	209
6.6.1	KIS-2030 .....	209
6.6.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	211
6.6.3	MMS.....	212
6.6.4	Vergleich der Szenarien .....	213
7	Gebäude .....	218
7.1	Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick .....	218
7.2	Übergreifende Rahmendaten .....	220
7.2.1	Anzahl privater Haushalte.....	220
7.2.2	Wohnfläche und Entwicklung der Nutzfläche in Nichtwohngebäuden.....	220
7.3	Wärmebedarf im Gebäudebereich .....	221
7.3.1	Methodik.....	221
7.3.2	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	221
7.3.3	Instrumente und deren Parametrisierung.....	222
7.3.3.1	KIS-2030.....	222
7.3.3.2	MMS.....	234

7.3.4	Ergebnisse.....	235
7.3.4.1	KIS-2030.....	235
7.3.4.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	242
7.3.4.3	MMS.....	242
7.3.4.4	Vergleich der Szenarien .....	244
7.4	Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung.....	246
7.4.1	Methodik.....	246
7.4.2	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	246
7.4.3	Instrumente und deren Parametrisierung.....	246
7.4.3.1	KIS-2030.....	246
7.4.3.2	MMS.....	247
7.4.4	Ergebnisse.....	248
7.4.4.1	KIS-2030.....	248
7.4.4.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	250
7.4.4.3	MMS.....	250
7.4.4.4	Vergleich der Szenarien .....	251
7.5	Geräte und Prozesse im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen.....	252
7.5.1	Methodik.....	252
7.5.2	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	253
7.5.3	Instrumente und deren Parametrisierung.....	253
7.5.4	Ergebnisse.....	253
7.5.4.1	KIS-2030.....	253
7.5.4.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	256
7.5.4.3	MMS.....	257
7.5.4.4	Vergleich der Szenarien .....	258
7.6	Gesamtergebnisse Gebäude .....	259
7.6.1	KIS-2030 .....	259
7.6.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	260
7.6.3	MMS.....	261
7.6.4	Vergleich der Szenarien .....	261
8	Verkehr.....	264
8.1	Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick .....	264
8.2	Methodik.....	265
8.3	Instrumente und deren Parametrisierung.....	265

8.3.1	KIS-2030 .....	265
8.3.1.1	CO <sub>2</sub> -Bepreisung bzw. Emissionshandel im Verkehr (BEHG) und Reduktion EEG-Umlage.....	265
8.3.1.2	Stärkere CO <sub>2</sub> -Spreizung der Kfz-Steuer für Pkw im 1. Jahr (Malus).....	266
8.3.1.3	Kaufprämien Pkw.....	267
8.3.1.4	EU-Mindestenergiesteuersatz für inländische Flüge.....	267
8.3.1.5	Abschaffung des Dieselsteuerprivilegs .....	267
8.3.1.6	Umgestaltung der Besteuerung von Dienstwagen.....	267
8.3.1.7	Ausweitung und CO <sub>2</sub> -Spreizung der Lkw-Maut sowie Ausbau der Lkw-Energieinfrastruktur.....	268
8.3.1.8	Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut .....	268
8.3.1.9	Angebotsausweitung ÖPNV.....	268
8.3.1.10	Förderung des Radverkehrs.....	269
8.3.1.11	Förderung des Fußverkehrs.....	270
8.3.1.12	Beschleunigter Ausbau des Schienenverkehrs (Personen- und Güterverkehr) .....	270
8.3.1.13	Nationale Umsetzung der RED II / THG-Quote .....	271
8.3.1.14	PtL im Flugverkehr nach 2030 beschleunigt einführen .....	272
8.3.1.15	Rechtliche Rahmenbedingungen: Bundesmobilitätsgesetz bzw. ambitionierte Reform der Straßenverkehrsordnung.....	273
8.3.1.16	Effizienzregulierung für elektrische Pkw .....	273
8.3.2	MMS.....	273
8.4	Ergebnisse .....	275
8.4.1	KIS-2030 .....	275
8.4.1.1	Verkehrsnachfrage.....	275
8.4.1.2	Antriebstechnologien .....	279
8.4.1.3	Entwicklung des Endenergieverbrauchs.....	286
8.4.1.4	Entwicklung der Treibhausgasemissionen.....	288
8.4.1.5	Bewertung der Einzelinstrumente.....	290
8.4.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	295
8.4.3	MMS.....	296
8.4.4	Vergleich der Szenarien .....	297
8.4.4.1	Vergleich Verkehrsnachfrage.....	297
8.4.4.2	Vergleich Antriebstechnologien .....	299
8.4.4.3	Vergleich Endenergieverbrauch .....	303
8.4.4.4	Vergleich Treibhausgasemissionen.....	304

9	Landwirtschaft.....	307
9.1	Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick .....	307
9.2	Methodik.....	309
9.3	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	310
9.3.1	Annahmen zur Entwicklung der Tierbestände und der Instrumentenwirkung.....	310
9.3.2	Annahmen Ökolandbau (Flächenanteil und Tierbestände).....	311
9.4	Instrumente und deren Parametrisierung.....	312
9.4.1	KIS-2030 .....	312
9.4.1.1	Maßnahmen zur Förderung der Energieeffizienz und des Ausbaus der Erneuerbaren Energien.....	312
9.4.1.2	Stickstoff-Maßnahmen .....	313
9.4.1.3	Klimawirkung der Neugestaltung der GAP .....	317
9.4.1.4	Schaffung eines Zukunftsfähige-Tierhaltung-Gesetzes/ Tierhaltungstransformationsgesetz.....	318
9.4.1.5	Weiterer Ausbau der Förderung der Wirtschaftsdüngervergärung.....	319
9.4.1.6	Förderung der Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten Mooren.....	319
9.4.1.7	Instrumente auf der Konsumseite .....	320
9.4.2	MMS.....	320
9.5	Ergebnisse .....	321
9.5.1	KIS-2030 .....	321
9.5.1.1	Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche .....	321
9.5.1.2	Entwicklung der Tierbestände .....	322
9.5.1.3	Entwicklung der Stickstoffeinsätze .....	324
9.5.1.4	Entwicklung der energiebedingten Emissionen .....	325
9.5.1.5	Treibhausgasminderungswirkung der zusätzlichen Instrumente.....	327
9.5.1.6	Entwicklung der Treibhausgasemissionen.....	328
9.5.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	330
9.5.3	MMS.....	330
9.5.4	Vergleich der Szenarien .....	331
10	Abfallwirtschaft und Sonstiges.....	334
10.1	Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick .....	334
10.2	Methodik.....	334
10.3	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	334
10.4	Instrumente und deren Parametrisierung.....	335
10.4.1	KIS-2030 .....	335

10.4.1.1	Ausweitung und Beschleunigung der Deponiebelüftung .....	335
10.4.1.2	Änderung der Deponieverordnung.....	335
10.4.1.3	Reduktion von Lebensmittelabfällen und -verlusten .....	335
10.4.2	MMS.....	336
10.5	Ergebnisse .....	336
10.5.1	KIS-2030 .....	336
10.5.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	339
10.5.3	MMS.....	339
10.5.4	Vergleich der Szenarien .....	340
11	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF).....	342
11.1	Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick sowie Auswirkungen methodischer Änderungen.....	342
11.2	Methodik.....	343
11.2.1	LULUCF-Modellierung .....	343
11.2.2	Wald-Modellierung.....	344
11.2.3	Vergleich zur Methode der Modellierung im MMS.....	347
11.3	Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung .....	348
11.4	Instrumente und deren Parametrisierung.....	348
11.4.1	KIS-2030 .....	348
11.4.1.1	Grünlanderhalt.....	348
11.4.1.2	Humusaufbau in der Landwirtschaft, Neuanlage von Agroforstsystemen .....	348
11.4.1.3	Moorbodenschutz.....	349
11.4.1.4	Waldbewirtschaftung .....	352
11.4.1.5	Siedlungsfläche .....	355
11.4.2	MMS (Thünen-Institut) .....	356
11.5	Ergebnisse .....	356
11.5.1	KIS-2030 .....	356
11.5.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	359
11.5.3	MMS.....	359
11.5.3.1	Entwicklung von Aktivitätsdaten .....	359
11.5.3.2	Entwicklung der Treibhausgasemissionen.....	360
11.5.4	Vergleich der Szenarien .....	360
12	Primärenergieverbrauch .....	364
12.1	Methodik.....	364

12.2	Ergebnisse .....	364
12.2.1	KIS-2030 .....	364
12.2.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	367
12.2.3	MMS.....	368
12.2.4	Vergleich der Szenarien .....	370
12.3	Energetischer Einsatz von Biomasse .....	373
12.3.1	KIS-2030 .....	373
12.3.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	374
12.3.3	MMS.....	375
12.3.4	Vergleich der Szenarien .....	376
13	Endenergieverbrauch .....	377
13.1	Methodik.....	377
13.2	Ergebnisse .....	377
13.2.1	KIS-2030 .....	377
13.2.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	379
13.2.3	MMS.....	382
13.2.4	Vergleich der Szenarien .....	384
13.3	Strombasierte Energieträger.....	388
13.3.1	KIS-2030 .....	388
13.3.2	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	391
13.3.3	MMS.....	393
13.3.4	Vergleich der Szenarien .....	394
14	Treibhausgasemissionen .....	397
14.1	Methodik.....	397
14.2	KIS-2030 .....	397
14.2.1	Emissionen aus Verbrennungsprozessen .....	397
14.2.2	Emissionen nach Treibhausgasen .....	398
14.2.3	Emissionen nach KSG-Sektoren .....	400
14.2.4	Emissionen in EU-ETS, ESR und BEHG.....	404
14.3	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	409
14.3.1	Emissionen aus Verbrennungsprozessen .....	409
14.3.2	Emissionen nach Treibhausgasen .....	409
14.3.3	Emissionen nach KSG-Sektoren .....	410
14.3.4	Emissionen in EU-ETS, ESR und BEHG.....	411

14.4	MMS.....	415
14.4.1	Emissionen aus Verbrennungsprozessen .....	415
14.4.2	Emissionen nach Treibhausgasen .....	416
14.4.3	Emissionen nach KSG-Sektoren .....	417
14.4.4	Emissionen in EU-ETS, ESR und BEHG.....	418
14.5	Vergleich der Szenarien .....	421
14.5.1	Emissionen aus Verbrennungsprozessen .....	421
14.5.2	Emissionen nach Treibhausgasen .....	422
14.5.3	Emissionen nach KSG-Sektoren .....	425
14.5.4	Emissionen in EU-ETS, ESR und BEHG.....	427
	Quellenverzeichnis .....	429
A	Anhang .....	439
A.1	Instrumententypen .....	439
A.2	Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen .....	439
A.3	Bruttostromerzeugung.....	441
B	Modellbeschreibungen.....	444
B.1	ENUSEM .....	444
B.2	INVERT/EE-Lab Modellbeschreibung und INVERT-Agents.....	446
B.3	FORECAST-Industry .....	450
B.4	FORECAST-Tertiary.....	452
B.5	FORECAST-Appliances.....	455
B.6	Landwirtschaft, LULUCF und Abfall.....	456
B.6.1	Modellverbund .....	456
B.6.2	LiSE .....	457
B.6.3	Abfall .....	459
B.7	PowerFlex.....	460
B.8	TEMPS .....	461

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Quellbereichen, 2010-2030.....	36
Abbildung 2:	Treibhausgasemissionen in den Szenarien MMS und KIS im Vergleich zum Minderungsziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 .....	53
Abbildung 3:	Modellübersicht zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen .....	59
Abbildung 4:	Integrationsmodell ENUSEM und Interaktion mit den Sektormodellen .....	62
Abbildung 5:	Inländisches Biomasseangebot im KIS-2030 zur energetischen Nutzung.....	68
Abbildung 6:	Preispfad für das BEHG im KIS-2030 und MMS, 2021-2040.....	70
Abbildung 7:	EU-ETS Preise im KIS-2030 und MMS, 2018-2040.....	73
Abbildung 8:	Installierte Leistungen der erneuerbaren Energien im KIS-2018-2040, 2018-2040.....	84
Abbildung 9:	Einordnung der kommunalen Wärmeplanung.....	86
Abbildung 10:	Stromverbrauch des Verkehrs im KIS-2030, 2018–2040.....	90
Abbildung 11:	Stromverbrauch der Energiewirtschaft im KIS-2030, 2018–2040.....	91
Abbildung 12:	CO <sub>2</sub> -Emissionen der Kraftwerke nach Energieträgern im KIS-2030, 1990–2040.....	97
Abbildung 13:	Veränderung des Bruttostromverbrauchs im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2030 .....	107
Abbildung 14:	Entwicklung der installierten Leistung im KIS-2030 und Vergleich zum MMS des Projektionsberichts 2021 .....	108
Abbildung 15:	Pfad des Kohleausstiegs im KIS-2030 im Vergleich zum MMS des Projektionsberichts 2021 (schattiert im Hintergrund) .....	109
Abbildung 16:	Vergleich der Nettostromerzeugung im KIS-2030 und im MMS des Projektionsberichts 2021.....	110
Abbildung 17:	Wirkung der einzelnen Instrumente auf die CO <sub>2</sub> -Emissionen der Kraftwerke im Jahr 2030 .....	114
Abbildung 18:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im KIS-2030, 1990-2040.....	119
Abbildung 19:	Instrumentenwirkung im Jahr 2030 in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraft- und Heizwerke).....	122
Abbildung 20:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im MMS, 1990-2040.....	125
Abbildung 21:	Veränderung des Energieeinsatzes der Übrigen Energiewirtschaft im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2030 .....	129
Abbildung 22:	Veränderung des Energieeinsatzes der Übrigen Energiewirtschaft im der BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030, 2030 .....	130
Abbildung 23:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im KIS-2030, 1990-2040.....	134
Abbildung 24:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2040 ....	137
Abbildung 25:	Veränderung der diffusen Emissionen im KIS-2030 gegenüber dem KIS-MMS, 2030 .....	138

Abbildung 26:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	140
Abbildung 27:	Veränderung der Emissionen der Energiewirtschaft im KIS-2030 gegenüber dem MMS, Jahr 2030.....	143
Abbildung 28:	Instrumentenwirkung im Sektor Industrie im KIS-2030 für das Jahr 2030 ggü. dem MMS des Projektionsberichts 2021.....	147
Abbildung 29:	Umsetzungsrate von Energieeffizienzmaßnahmen abhängig von ihrer Amortisationszeit im Modell FORECAST .....	161
Abbildung 30:	Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen .....	162
Abbildung 31:	Endenergiebedarf (energetisch) der Industrie nach Energieträgern, 2020-2040.....	169
Abbildung 32:	Endenergiebedarf (stofflich) der Industrie nach Energieträgern, 2020-2040.....	171
Abbildung 33:	Endenergiebedarf (energetisch) der Industrie nach Subsektoren, 2020-2040....	172
Abbildung 34:	Endenergiebedarf (energetisch) im Subsektor Metallerzeugung nach Energieträger, 2020-2040.....	173
Abbildung 35:	Endenergiebedarf (energetisch und stofflich) im Subsektor Chemie nach Energieträger, 2020-2040.....	174
Abbildung 36:	Endenergiebedarf (energetisch) im Subsektor Verarbeitung von Steinen und Erden nach Energieträger, 2020-2040.....	176
Abbildung 37:	Strombedarf nach Anwendung, 2020-2040 .....	177
Abbildung 38:	Endenergiebedarf (energetisch) für Dampf- und Warmwassererzeugung.....	178
Abbildung 39:	Endenergiebedarf (energetisch) für Industrieöfen .....	179
Abbildung 40:	Wasserstoffbedarf (energetisch und stofflich) nach Anwendung.....	180
Abbildung 41:	Erdgasnutzung (energetisch und stofflich) nach Subsektor.....	182
Abbildung 42:	Produktionsmengen Rohstahl nach Verfahren, 2020-2040 .....	183
Abbildung 43:	Produktionsmengen Ammoniak nach Verfahren, 2020-2040.....	184
Abbildung 44:	Produktionsmengen Ethylen nach Verfahren .....	185
Abbildung 45:	Endenergiebedarf im MMS (umgerechnet auf Basis des KIS-2030).....	187
Abbildung 46:	Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O) nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	198
Abbildung 47:	Entwicklung der Emissionen von F-Gasen nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	204
Abbildung 48:	Entwicklung der Emissionen von F-Gasen nach Gasgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	206
Abbildung 49:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	210
Abbildung 50:	Veränderung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2030 .....	216
Abbildung 51:	Kostenpotenzialkurven von Biomasse in MMS und KIS-2030.....	222
Abbildung 52:	Bisherige Systematik bei der Entwicklung von Gebäudestandards und vorgeschlagene Weiterentwicklung mit „Delta-Förderung“ .....	224

Abbildung 53:	Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im KIS-2030.....	236
Abbildung 54:	Einfluss von Klimateffekt, Gebäudesanierung und Heizungsaustausch auf den Endenergiebedarf im KIS-2030.....	237
Abbildung 55:	Entwicklung der energetischen Sanierungsrate im Gebäudesektor bis 2030.....	238
Abbildung 56:	Marktanteile der installierten Wärmeversorgungssysteme im KIS-2030, 2021-2030.....	239
Abbildung 57:	Marktanteile der installierten Wärmeversorgungssysteme nach Gebäudetypen, 2021-2040.....	240
Abbildung 58:	Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 im Jahr 2030 im Vergleich zum MMS (Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser) .....	241
Abbildung 59:	Differenz des Endenergieverbrauchs zwischen der BEHG-Sensitivität und des KIS-2030 im Jahr 2030.....	242
Abbildung 60:	Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im MMS, 2018-2040 .....	243
Abbildung 61:	Differenz des kumulierten Endenergiebedarfs im KIS-2030 zum MMS bis zum Jahr 2030.....	244
Abbildung 62:	Wirkung der zusätzlichen Einzelinstrumente für Haushaltsgeräte .....	251
Abbildung 63:	Stromanwendungen für Haushaltsgeräte im Szenarienvergleich.....	252
Abbildung 64:	Entwicklung der Endenergiebedarfe des GHD-Sektors bis 2040 im KIS-2030 .....	254
Abbildung 65:	Entwicklung der Endenergiebedarfe (ohne Strom) des GHD-Sektors bis 2040 im KIS-2030.....	255
Abbildung 66:	Strombedarf nach Anwendungen im KIS-2030, 2018-2040 .....	256
Abbildung 67:	Entwicklung der Endenergiebedarfe des GHD-Sektors bis 2040 im MMS.....	257
Abbildung 68:	Entwicklung der Endenergiebedarfe (ohne Strom) des GHD-Sektors bis 2040 im MMS .....	258
Abbildung 69:	Endenergieträger im GHD-Sektor im Szenarienvergleich, 2018-2040 .....	259
Abbildung 70:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	260
Abbildung 71:	Kfz-Steuer im 1. Jahr und Verteilung der Neuzulassungen .....	266
Abbildung 72:	Personenverkehrsnachfrage im KIS-2030, 2018-2040 .....	276
Abbildung 73:	Güterverkehrsnachfrage im KIS-2030, 2018-2040 .....	278
Abbildung 74:	Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen nach Antrieben, 2018-2040.....	280
Abbildung 75:	Pkw-Bestand nach Antrieben, 2018-2040.....	281
Abbildung 76:	Entwicklung der Lkw-Neuzulassungen nach Antrieben (>3,5 t zGG, ohne Last- und Sattelzüge), 2018-2040.....	282
Abbildung 77:	Lkw-Bestand nach Antrieben (>3,5 t zGG, ohne Last- und Sattelzüge), 2018-2040.....	283
Abbildung 78:	Entwicklung der Lkw-Neuzulassungen nach Antrieben (Last- und Sattelzüge), 2018-2040.....	284
Abbildung 79:	Lkw-Bestand nach Antrieben (Last- und Sattelzüge), 2018-2040 .....	285

Abbildung 80:	Entwicklung des elektrischen Fahranteils von Lkw, Pkw und leichten Nutzfahrzeugen .....	286
Abbildung 81:	Endenergiebedarf im nationalen Verkehr, 2018-2040.....	287
Abbildung 82:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Verkehrsträgergruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 .....	289
Abbildung 83:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	290
Abbildung 84:	Treibhausgasemissionsminderungswirkung der einzelnen Instrumente(nbündel) im KIS-2030 im Jahr 2030 .....	295
Abbildung 85:	Vergleich der Personenverkehrsnachfrage zwischen KIS-2030 und MMS.....	298
Abbildung 86:	Vergleich der Güterverkehrsnachfrage zwischen KIS-2030 und MMS.....	299
Abbildung 87:	Vergleich der Pkw-Neuzulassungen zwischen KIS-2030 und MMS.....	300
Abbildung 88:	Vergleich der Pkw-Bestände zwischen KIS-2030 und MMS .....	301
Abbildung 89:	Vergleich der Neuzulassungen Last- und Sattelzüge zwischen KIS-2030 und MMS .....	302
Abbildung 90:	Vergleich der Bestände an Last- und Sattelzügen zwischen KIS-2030 und MMS .....	303
Abbildung 91:	Vergleich des Endenergiebedarfs im nationalen Verkehr zwischen KIS-2030 und MMS .....	304
Abbildung 92:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im KIS-2030 und MMS im Vergleich zu den KSG-Sektorzielen, 2018-2030.....	306
Abbildung 93:	Treibhausgasemissionen aus dem Landwirtschaftssektor im MMS im Vergleich zu den KSG-Sektorzielen, 2025, 2030.....	308
Abbildung 94:	Klimaschutzinstrumente im KIS-2030 im Sektor Landwirtschaft .....	309
Abbildung 95:	Entwicklung der Produktion tierischer Produkte und der direkten Treibhausgasemissionen aus der Tierhaltung nach Tierart, 2018 bis 2040 .....	323
Abbildung 96:	Entwicklung des Stickstoffeinsatzes 2018 bis 2040.....	325
Abbildung 97:	Entwicklung der Energienachfrage des Sektors Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	326
Abbildung 98:	Minderungswirkungen der zusätzlichen Instrumente im KIS-2030 ggü. dem MMS, 2030 .....	328
Abbildung 99:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft nach Teil-Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 .....	330
Abbildung 100:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	338
Abbildung 101:	Minderungswirkungen der zusätzlichen Instrumente im KIS-2030 im Abfallsektor ggü. dem MMS, 2030 .....	339
Abbildung 102:	Zusammenhang zwischen Holzeinschlag und Änderungen der lebenden Biomasse auf der Waldfläche ausgedrückt in CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	346
Abbildung 103:	Entwicklung der trocken genutzten organischen Böden in der Landwirtschaft in KIS-2030, 2018-2030.....	352
Abbildung 104:	Flächenentwicklung im KIS-2030.....	357
Abbildung 105:	Treibhausgasemissionen im LULUCF Sektor für KIS-2030 und MMS .....	359

Abbildung 106:	Treibhausgasminderung im KIS-2030 und MMS (ohne Wald und Holzprodukte) gegenüber 2018, 2025-2030 .....	361
Abbildung 107:	Treibhausgasminderung durch Instrumente und Auswirkungen methodischer Anpassungen .....	362
Abbildung 108:	Primärenergieverbrauch im KIS-2030 nach Energieträgern, 2008-2040 .....	364
Abbildung 109:	Primärenergieverbrauch im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) nach Energieträgern, 2008-2040.....	367
Abbildung 110:	Primärenergieverbrauch im MMS nach Energieträgern, 2008-2040.....	369
Abbildung 111:	Veränderung des Primärenergieverbrauchs im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2030 .....	372
Abbildung 112:	Veränderung des Primärenergieverbrauchs BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030, 2030.....	373
Abbildung 113:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030, 2008-2040 .....	377
Abbildung 114:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2008-2040.....	380
Abbildung 115:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS, 2008-2040.....	382
Abbildung 116:	Veränderung des Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im KIS-2030 gegenüber dem MMS, Jahr 2030 .....	385
Abbildung 117:	Veränderung des Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030 gegenüber dem MMS, Jahr 2030 .....	386
Abbildung 118:	Veränderung des Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren in der BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030, Jahr 2030.....	387
Abbildung 119:	Veränderung des Endenergieverbrauch nach Energieträgern in der BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030, Jahr 2030 .....	388
Abbildung 120:	Nachfrage und Bereitstellung von grünem Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im KIS-2030 im Jahr 2030 .....	389
Abbildung 121:	Nachfrage und Bereitstellung von grünem Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im Jahr 2030, KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	391
Abbildung 122:	Veränderung der Nachfrage nach grünem Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im Jahr 2030 im KIS-2030 gegenüber dem MMS .....	395
Abbildung 123:	Veränderung der Nachfrage nach grünem Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im Jahr 2030 in der BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030.....	396
Abbildung 124:	Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im KIS-2030 nach KSG-Sektoren im Vergleich mit dem Zielpfad, 2018-2040.....	403
Abbildung 125:	Abweichung der THG-Emissionen im KIS-2030 von KSG-Sektorzielen, 2021-2030.....	404
Abbildung 126:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030) im KIS-2030 .....	406
Abbildung 127:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030) im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	413
Abbildung 128:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030) im MMS.....	419

Abbildung 129:	Vergleich der kumulierten Abweichung der Treibhausgasmissionen von den KSG-Sektorzielen im Zeitraum 2021-2030.....	427
Abbildung 130:	Struktur von ENUSEM und Interaktion mit anderen Modellen .....	444
Abbildung 131:	Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab.....	447
Abbildung 132:	Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab .....	448
Abbildung 133:	Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten .....	449
Abbildung 134:	Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumente in Invert-Agents .....	449
Abbildung 135:	Übersicht Modell FORECAST-Industry.....	451
Abbildung 136:	Vereinfachte Darstellung des “bottom-up“-Mengengerüsts für den tertiären Sektor im Modell FORECAST.....	455
Abbildung 137:	Modellverbund FABio (Landwirtschaft, Abfall und LULUCF).....	457
Figure 1:	Development of total greenhouse gas emissions by source category, 2010-2030.....	41

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Vergleich der Szenarien, 2018-2040.....	37
Tabelle 2:	Entwicklung der Rahmendaten im Vergleich der Szenarien, 2025-2040.....	46
Tabelle 3:	Entwicklung energiebezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2018-2040.....	46
Tabelle 4:	Entwicklung weiterer Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2018-2040.....	47
Tabelle 5:	Entwicklung von Nachfrage und Produktion neuer Treib- und Brennstoffe im Vergleich der Szenarien, 2025-2040.....	49
Tabelle 6:	Treibhausgasminderungswirkung von zentralen Instrumenten und Instrumentenbündeln im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2025 und 2030.....	50
Tabelle 7:	Zuordnung von CRF-Kategorien zu KSG-Sektoren und zur Inventarstruktur laut UNFCCC und Governance-Verordnung.....	56
Tabelle 8:	Zusammensetzung der Treibhausgasemissionen der im Klimaschutzplan aufgeführten Sektoren (Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq) im Basisjahr 2018.....	57
Tabelle 9:	Überblick über verwendete Rahmendaten (PB 2021 (MMS), KIS-2030).....	66
Tabelle 10:	Preispfad für das BEHG im KIS-2030 und MMS, 2021-2040.....	70
Tabelle 11:	Mögliche nachfragesteuernde Politikinstrumente für Bioenergie.....	78
Tabelle 12:	CO <sub>2</sub> -Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 auf die Strom- und gekoppelte Wärmeerzeugung einzelne Jahre, 2021-2030.....	81
Tabelle 13:	Installierte Leistungen der erneuerbaren Energien im KIS-2030, 2018-2040.....	83
Tabelle 14:	Einspeisung von EE-Fernwärme im KIS-2030.....	87
Tabelle 15:	Bruttostromverbrauch im KIS-2030, 2008-2040.....	89
Tabelle 16:	Aufschlüsselung der installierten Nettonennleistung im KIS-2030 für ausgewählte Jahre.....	92
Tabelle 17:	Vollbenutzungsstunden der variablen erneuerbaren Energien im KIS-2030 für ausgewählte Jahre.....	93
Tabelle 18:	Nettostromerzeugung im KIS-2030, 2018-2040.....	93
Tabelle 19:	CO <sub>2</sub> -Emissionen der Kraftwerke nach Subsektoren im KIS-2030, 1990–2040.....	98
Tabelle 20:	Bruttostromverbrauch im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2008-2040.....	99
Tabelle 21:	CO <sub>2</sub> -Emissionen der Kraftwerke nach Subsektoren im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 1990–2040.....	100
Tabelle 22:	Bruttostromverbrauch im MMS, 2008-2040.....	101
Tabelle 23:	Aufschlüsselung der installierten Nettonennleistung im MMS, 2018-2040.....	103
Tabelle 24:	Aufschlüsselung der Nettostromerzeugung im MMS, 2018-2040.....	104
Tabelle 25:	CO <sub>2</sub> -Emissionen der Kraftwerke nach Subsektoren im MMS, 1990–2040.....	105
Tabelle 26:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Kraftwerke nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien.....	112
Tabelle 27:	CO <sub>2</sub> -Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 ggü. MMS in der übrigen Energiewirtschaft, 2021-2030.....	115
Tabelle 28:	Installierte Leistung an Solarthermie im KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2025-2040.....	116

Tabelle 29:	Wärmebereitstellung durch neue EE-Wärmeerzeuger im KIS-2030, 2025-2040.....	116
Tabelle 30:	Zusätzliche Elektrolyseure für die Deckung der Wasserstoffnachfrage in den Raffinerien .....	117
Tabelle 31:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im KIS-2030, 2018-2040.....	119
Tabelle 32:	Wasserstoffbedarf in Raffinerien im KIS-2030, in PJ .....	121
Tabelle 33:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040 .....	123
Tabelle 34:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040 .....	126
Tabelle 35:	Wesentliche Treiber der übrigen Energiewirtschaft, 2018-2040 .....	128
Tabelle 36:	Entwicklung der Emissionen der übrigen Energiewirtschaft zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien.....	130
Tabelle 37:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im KIS-2030, 1990-2040.....	133
Tabelle 38:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2040 ....	135
Tabelle 39:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien.....	138
Tabelle 40:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030.....	141
Tabelle 41:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	142
Tabelle 42:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS .....	142
Tabelle 43:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	144
Tabelle 44:	Entwicklung des resultierender CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktors des Strommix' zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien, in g CO <sub>2</sub> /kWh .....	145
Tabelle 45:	Treibhausgaserminderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 für einzelne Jahre bis 2030 im Sektor Industrie .....	146
Tabelle 46:	Zuordnung der energieintensiven Industrieprozesse und -produkte des Energiesystemmodells FORECAST zum EU-ETS nach Sektoren.....	148
Tabelle 47:	Finanzierungsbedarf für CO <sub>2</sub> -arme Produktionsverfahren im KIS-2030 .....	153
Tabelle 48:	Annahmen für die Berechnung des Finanzierungsbedarfs CO <sub>2</sub> -armer Produktionsverfahren im KIS-2030 .....	153
Tabelle 49:	Resultierender Förderbedarf für CO <sub>2</sub> -arme Produktionsverfahren im KIS-2030.....	154
Tabelle 50:	Zusätzlicher Förderbedarf ggü. MMS des Projektionsberichts 2021 .....	155
Tabelle 51:	Berechnung des Gesamtförderbedarf zwischen 2021-2030 aus dem Finanzierungsbedarf im KIS-2030.....	155
Tabelle 52:	Entwicklung der Bruttowertschöpfung der Industrie je Wirtschaftszweig (Mrd. € <sub>2015</sub> ).....	166

Tabelle 53:	Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe.....	168
Tabelle 54:	Endenergiebedarf (energetisch) der Industrie nach Energieträgern, 2020-2040.....	169
Tabelle 55:	Anteil von Erdgas am Endenergieverbrauch nach Subsektor im KIS-2030, 2020-2040.....	181
Tabelle 56:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie (ohne Industriekraftwerke) nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	188
Tabelle 57:	Parameter der Industriekraftwerke im KIS-2030, 2018-2040 .....	189
Tabelle 58:	Parameter der Industriekraftwerke im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040.....	190
Tabelle 59:	Brennstoffeinsatz in Industriekraftwerken im KIS-2030, 2018-2040 .....	191
Tabelle 60:	Brennstoffeinsatz in Industriekraftwerken im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040.....	192
Tabelle 61:	Brennstoffeinsatz in Industriekraftwerken im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040.....	193
Tabelle 62:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Industriekraftwerke nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	194
Tabelle 63:	Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O) nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	196
Tabelle 64:	Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O) nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im MMS .....	199
Tabelle 65:	Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O) nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	200
Tabelle 66:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen (fluorierte Treibhausgase) im KIS-2030, 1990-2040 nach Quellgruppen.....	205
Tabelle 67:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluorierte Treibhausgase) aus Industrieprozessen und Produktverwendung im KIS-2030 zwischen 1990 und 2040 nach Gasgruppen.....	207
Tabelle 68:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluorierte Treibhausgase) im MMS zwischen 1990 und 2040 nach Quellgruppen.....	207
Tabelle 69:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluorierte Treibhausgase) aus Industrieprozessen und Produktverwendung im MMS zwischen 1990 und 2040 nach Gasgruppen.....	208
Tabelle 70:	Entwicklung der Emissionen an fluorierte Treibhausgasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien.....	209
Tabelle 71:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030.....	210
Tabelle 72:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	211
Tabelle 73:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS .....	212

Tabelle 74:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	213
Tabelle 75:	Kumulierte Zielabweichung (2020-2030) im Sektor Industrie .....	216
Tabelle 76:	Treibhausgasminderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 im Sektor Gebäude über das MMS hinaus (Raumwärme und Warmwasser), 2021-2030.....	218
Tabelle 77:	Strombedingte Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 für einzelne Jahre bis 2030 für Haushaltsgeräte.....	219
Tabelle 78:	Emissionsminderungswirkung des Umstieges von Erd- auf Biogas im KIS-2030 für einzelne Jahre bis 2030 für Haushaltsgeräte .....	219
Tabelle 79:	Wirkung der Instrumente im Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) im KIS-2030 – Emissionsminderung in den Jahren 2021-2030.....	220
Tabelle 80:	Vergleich der Anzahl privater Haushalte verschiedener Quellen .....	220
Tabelle 81:	Entwicklung der Bevölkerung sowie absolute und relative Entwicklung der spezifischen Wohnfläche.....	221
Tabelle 82:	Ausgewählte Voraussetzungen für das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude .....	225
Tabelle 83:	Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser im Gebäudebereich - Vergleich der Szenarien nach verschiedenen Parametern .....	244
Tabelle 84:	Erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauches elektrischer Geräte in privaten Haushalten im KIS-2030, 2015-2040.....	247
Tabelle 85:	Entwicklung des Strombedarfes privater Haushalte 2018–2040 im KIS-2030.....	249
Tabelle 86:	Gasbedarf des Kochens privater Haushalte 2018–2040 im KIS-2030 .....	249
Tabelle 87:	Entwicklung des Stromverbrauches privater Haushalte 2010–2040 im MMS.....	250
Tabelle 88:	Strombedarf von Rechenzentren und IKT-Energiedienstleistungen, 2018-2040.....	256
Tabelle 89:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030.....	259
Tabelle 90:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	261
Tabelle 91:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS .....	261
Tabelle 92:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	262
Tabelle 93:	Treibhausgasminderungswirkung einzelner Instrumente und Instrumentenbündel des KIS-2030 gegenüber dem MMS im Sektor Verkehr.....	264
Tabelle 94:	Kfz-Steuer im 1.Jahr im KIS-2030 in € je g CO <sub>2</sub> /km (WLTP) .....	266
Tabelle 95:	Zusätzliche Fördermittel für den Radverkehr (Mio. €).....	269
Tabelle 96:	Zusätzliche Regionalisierungsmittel im Schienenpersonennahverkehr (Mio. €).....	271
Tabelle 97:	Eckpunkte der THG-Quote.....	271
Tabelle 98:	Schwelle des angerechneten Stroms, ab welcher die THG-Quote erhöht wird.....	272

Tabelle 99:	Verkehrsnachfrage Personenverkehr im KIS-2030 in Mrd. Pkm, 2018-2040.....	277
Tabelle 100:	Verkehrsnachfrage Güterverkehr im KIS-2030 in Mrd. tkm, 2018-2040 .....	278
Tabelle 101:	Fahrleistungen im KIS-2030 in Mrd. km, 2018-2040 .....	279
Tabelle 102:	Verkehrsnachfrage Seeverkehr im KIS-2030 in Mrd. tkm, 2018-2040.....	279
Tabelle 103:	Endenergiebedarf des Verkehrssektors (ohne Sonderverkehre) im KIS-2030 in PJ, 1990-2040 .....	287
Tabelle 104:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 .....	289
Tabelle 105:	Parametrisierung der Einzelmaßnahmen im Verkehr im KIS-2030.....	291
Tabelle 106:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	296
Tabelle 107:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS .....	297
Tabelle 108:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	305
Tabelle 109:	Treibhausgasminderungswirkung von Instrumenten im Landwirtschaftssektor im KIS-2030, 2025 und 2030 .....	307
Tabelle 110:	Entwicklung der landwirtschaftlich genutzten Flächen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030.....	321
Tabelle 111:	Entwicklung der Tierbestände zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	322
Tabelle 112:	Entwicklung der Stickstoffeinsätze 1990 und 2040 im KIS-2030.....	324
Tabelle 113:	Entwicklung der energetischen Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 .....	326
Tabelle 114:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft nach Teil-Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 .....	329
Tabelle 115:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft nach Teil-Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS.....	331
Tabelle 116:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	332
Tabelle 117:	Treibhausgas-Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, 2021-2030.....	334
Tabelle 118:	Entwicklung der Methanemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 in kt CH <sub>4</sub> .....	336
Tabelle 119:	Entwicklung der Lachgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 in kt N <sub>2</sub> O ....	337
Tabelle 120:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030.....	337
Tabelle 121:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS .....	340
Tabelle 122:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien.....	340
Tabelle 123:	Auswirkungen methodischer Änderungen gegenüber MMS, 2025 und 2030.....	342

Tabelle 124:	Treibhausgasminderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 gegenüber MMS, 2025 und 2030 .....	342
Tabelle 125:	Ziele für die Treibhausgasbilanz im LULUCF-Sektor im Bundes-Klimaschutzgesetz .....	343
Tabelle 126:	Instrumente zur Waldbewirtschaftung und mögliche Förderung.....	352
Tabelle 127:	Entwicklung der Aktivitätsdaten [1000 ha] des LULUCF-Sektors von 1990 bis 2040.....	356
Tabelle 128:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030.....	358
Tabelle 129:	Entwicklung der Aktivitätsdaten [1000 ha] des LULUCF-Sektors von 1990 bis 2040.....	359
Tabelle 130:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS .....	360
Tabelle 131:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	363
Tabelle 132:	Primärenergieverbrauch im KIS-2030 nach Energieträgern, 2008-2040 .....	366
Tabelle 133:	Primärenergieverbrauch im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) nach Energieträgern, 2008-2040.....	368
Tabelle 134:	Primärenergieverbrauch im MMS, 2008-2040.....	370
Tabelle 135:	Vergleich der Primärenergieverbräuche nach unterschiedlichen Bilanzierungssystemen.....	371
Tabelle 136:	Energetischer Einsatz von Biomasse nach KSG-Sektoren im KIS-2030, 2018-2040.....	374
Tabelle 137:	Energetischer Einsatz von Biomasse nach KSG-Sektoren im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität, 2018-2040.....	374
Tabelle 138:	Energetischer Einsatz von Biomasse nach KSG-Sektoren im MMS, 2018-2040...	375
Tabelle 139:	Energetischer Einsatz von Biomasse im Vergleich der Szenarien, 2018-2040 .....	376
Tabelle 140:	Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im KIS-2030, 2018-2040 .....	378
Tabelle 141:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030, 2018-2040 .....	379
Tabelle 142:	Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040.....	380
Tabelle 143:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040.....	381
Tabelle 144:	Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im MMS, 2018-2040 .....	383
Tabelle 145:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS, 2018-2040.....	383
Tabelle 146:	Vergleich der Endenergieverbräuche nach unterschiedlichen Bilanzierungssystemen .....	384
Tabelle 147:	Nachfrage nach und Bereitstellung von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen im KIS-2030 .....	390
Tabelle 148:	Nachfrage nach und Bereitstellung von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen im KIS-2030, BEHG-Sensitivität .....	392
Tabelle 149:	Nachfrage nach und Bereitstellung von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen im MMS.....	393

Tabelle 150:	Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen (inklusive internationalem Verkehr) nach Brennstoffen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030.....	397
Tabelle 151:	Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030, in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq.....	399
Tabelle 152:	Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030, in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq.....	401
Tabelle 153:	Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor im KIS-2030, 2005-2040.....	404
Tabelle 154:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030), KIS-2030 .....	406
Tabelle 155:	Emissionsentwicklung der KSG-Sektoren nach Regime im KIS-2030, 2005-2040.....	407
Tabelle 156:	Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen (inklusive internationalem Verkehr) nach Brennstoffen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	409
Tabelle 157:	Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	410
Tabelle 158:	Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) .....	411
Tabelle 159:	Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor im KIS-2030, 2005-2040.....	412
Tabelle 160:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030), KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).....	413
Tabelle 161:	Emissionsentwicklung der KSG-Sektoren nach Regime im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2005-2040.....	414
Tabelle 162:	Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen (inklusive internationalem Verkehr) nach Brennstoffen zwischen 1990 und 2040 im MMS .....	415
Tabelle 163:	Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS .....	416
Tabelle 164:	Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren zwischen 1990 und 2040 im MMS.....	417
Tabelle 165:	Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor im MMS, 2005-2040.....	418
Tabelle 166:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030) im MMS.....	419
Tabelle 167:	Emissionsentwicklung der KSG-Sektoren nach Regime im MMS, 2005-2040.....	420
Tabelle 168:	Entwicklung der verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien .....	421
Tabelle 169:	Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien.....	423

Tabelle 170:	Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren in den Jahren 2025 und 2030 im Vergleich der Szenarien.....	425
Tabelle 171:	Kumulierte Zielabweichung (2020-2030) in den einzelnen KSG-Sektoren im Vergleich der Szenarien.....	426
Tabelle 172:	Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien.....	427
Tabelle 173:	Klassifizierung der Branchen des tertiären Sektors im Modell FORECAST.....	453
Tabelle 174:	Energiedienstleistungen (EDL), die für die Berechnung des Energiebedarfes je Branche summiert werden .....	454
Tabelle 175:	Gerätetypen im Haushaltssektor.....	455
Tabelle A 1:	Klassifikation der Instrumententypen .....	439
Tabelle A 2:	Entwicklung der gesamten Emissionen nach CRF-Quellgruppen im KIS-2030, 1990-2040.....	439
Tabelle A 3:	Entwicklung der gesamten Emissionen nach CRF-Quellgruppen im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 1990-2040 .....	440
Tabelle A 4:	Entwicklung der gesamten Emissionen nach CRF-Quellgruppen im MMS, 1990-2040.....	440
Tabelle A 5:	Bruttostromerzeugung im KIS-2030, 2008-2040.....	441
Tabelle A 6:	Bruttostromerzeugung im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2008-2040 .....	442
Tabelle A 7:	Bruttostromerzeugung im MMS, 2008-2040 .....	443
Table 1:	Comparison of scenarios with regard to GHG emission development, 2018-2040.....	42

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AfA</b>	Absetzung für Abnutzung
<b>AGEB</b>	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
<b>AMI</b>	Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH
<b>AR</b>	Assessment Report (Sachstandsbericht)
<b>AUKM</b>	Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen
<b>BBergG</b>	Bundesberggesetz
<b>BECCS</b>	Bioenergy with carbon capture and storage (Bioenergie mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung)
<b>BEG</b>	Bundesförderung für effiziente Gebäude
<b>BEHG</b>	Bundesmissionshandelsgesetz
<b>BesAR</b>	Besondere Ausgleichsregelung
<b>BEV</b>	Battery Electric Vehicle
<b>BEW</b>	Bundesförderung effiziente Wärme- und Kältenetze
<b>BfEE</b>	Bundesstelle für Energieeffizienz
<b>BImA</b>	Bundesanstalt für Immobilienaufgaben
<b>BImSchG</b>	Bundes-Immissionsschutzgesetz
<b>BIP</b>	Bruttoinlandsprodukt
<b>BMEL</b>	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
<b>BMU</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
<b>BMWi</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
<b>BSSR</b>	Bundesamt für Bau-, Stadt- und Raumforschung
<b>BWS</b>	Bruttowertschöpfung
<b>BZ</b>	Brennstoffzelle
<b>CAPEX</b>	Capital expenditure (Kapitalkosten)
<b>CCfD</b>	Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Difference)
<b>CCS</b>	Carbon Capture and Storage
<b>CCU</b>	Carbon Capture and Utilization
<b>CNG</b>	Compressed natural gas (komprimiertes Erdgas)
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CO<sub>2</sub>-Äq</b>	CO <sub>2</sub> -Äquivalente
<b>CRF</b>	Common Reporting Format
<b>CRT</b>	Cathode Ray Tube (Kathodenstrahlröhrenbildschirm)
<b>DAK</b>	Digitale Automatische Kupplung
<b>DRI</b>	Direktreduktion (direct reduced iron)
<b>DüV</b>	Düngeverordnung
<b>EAF</b>	Elektrolichtbogenofen (Electric Arc Furnace)

<b>EDL</b>	Energiedienstleistungen
<b>EDV</b>	Elektronische Datenverarbeitung
<b>EE</b>	Erneuerbare Energien
<b>EED</b>	Energieeffizienzrichtlinie (Energy Efficiency Directive)
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>EEV</b>	Endenergieverbrauch
<b>EEW</b>	Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft
<b>EffSTRA</b>	Effizienzstrategie
<b>EFRE</b>	Europäischen Fonds für regionale Entwicklung
<b>EFZH</b>	Ein- und Zweifamilienhäuser
<b>EKF</b>	Energie- und Klimafonds
<b>eLCA</b>	Elektronische Lebenszyklusanalyse (electronic life cycle assessment)
<b>ELER</b>	Europäischen Landwirtschaftsfond für die Entwicklung des ländlichen Raumes
<b>EMAS</b>	Eco-Management and Audit Scheme
<b>EnEff-RL</b>	Energieeffizienz-Richtlinie
<b>EnergieStG</b>	Energiesteuergesetz
<b>EnEV</b>	Energieeinsparverordnung
<b>ENTSO-E</b>	European Network of Transmission System Operators for Electricity
<b>EPBD</b>	EU-Gebäuderichtlinie (Energy Performance of Buildings Directive)
<b>ERA</b>	Empfehlungen für Radverkehrsanlagen
<b>ERR</b>	Einschlagsrückrechnung
<b>ESR</b>	Effort Sharing Regulation (EU-Klimaschutzverordnung)
<b>ETCS</b>	European Train Control System (Europäisches Zugbeeinflussungssystem)
<b>EUA</b>	EU Allowance
<b>EU ETS</b>	European Union Emissions Trading System
<b>EZFH</b>	Ein- und Zweifamilienhaus
<b>FABio</b>	Forestry and Agriculture Biomass Model
<b>FCEV</b>	Fuel cell electric vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
<b>FKW</b>	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
<b>FKZ</b>	Forschungskennzahl
<b>FONA</b>	Forschung für Nachhaltigkeit
<b>FSP</b>	Förderschwerpunkt
<b>GAK</b>	Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“
<b>GAP</b>	Gemeinsame Agrarpolitik
<b>GEG</b>	Gebäudeenergie-Gesetz
<b>GfP</b>	Gute fachliche Praxis
<b>GHD</b>	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

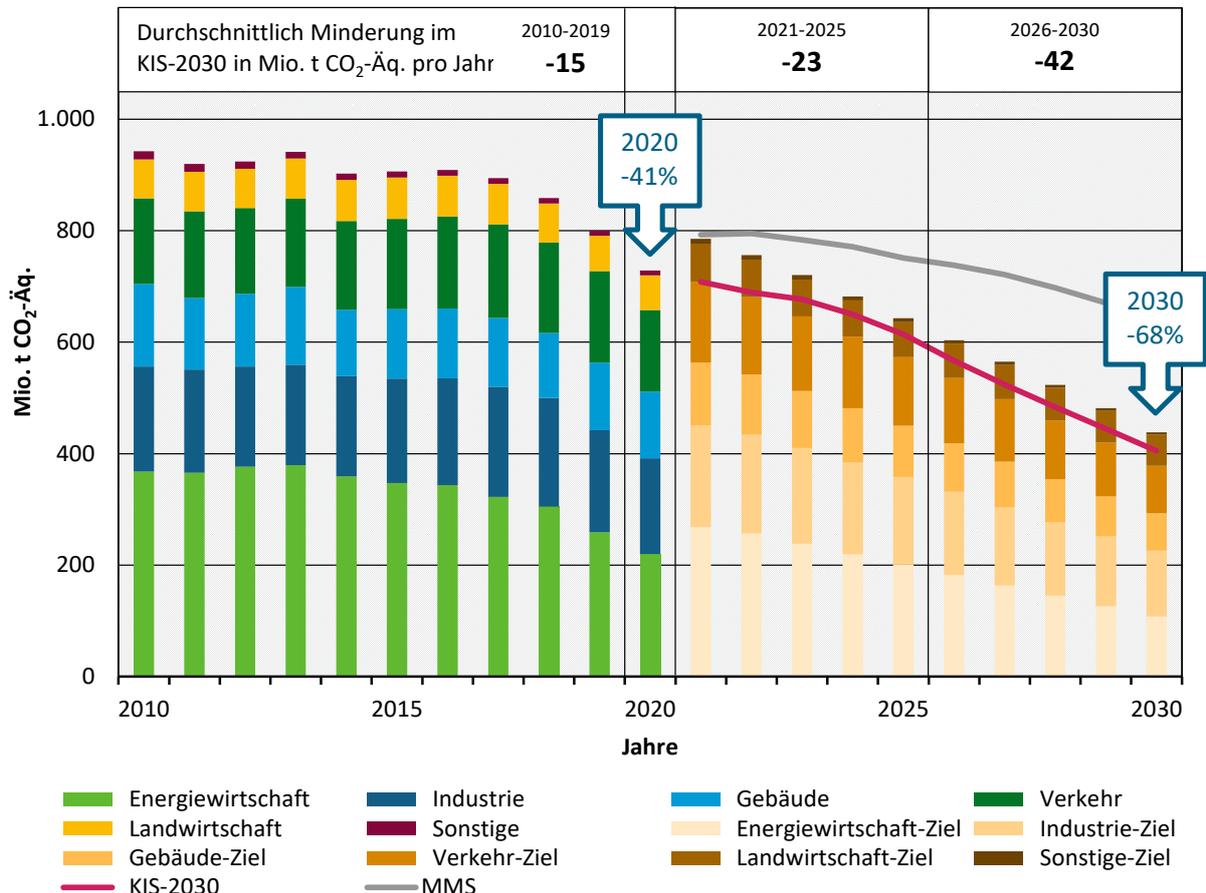
<b>GLÖZ-Standards</b>	Standards zur Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in „gutem landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand“
<b>GV(E)</b>	Großvieheinheit
<b>GW</b>	Gigawatt
<b>GWP</b>	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
<b>ha</b>	Hektar
<b>HFKW</b>	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
<b>HThP</b>	Hochtemperaturwärmepumpen (high temperature heat pumps)
<b>IEEKN</b>	Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke
<b>IKT</b>	Informations- und Kommunikationstechnologie
<b>IPCEI</b>	Important Projects of Common European Interest
<b>iSFP</b>	Individueller Sanierungsfahrplan
<b>KA</b>	Konzessionsabgabe
<b>KEA</b>	Kumulierter Energieaufwand
<b>KiD</b>	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
<b>KIS-2030</b>	Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030
<b>KMU</b>	Kleine und mittlere Unternehmen
<b>KRL</b>	Kommunalrichtlinie
<b>KSG</b>	Bundes-Klimaschutzgesetz
<b>KSM</b>	Klimaschutzmanagement
<b>KUP</b>	Kurzumtriebsplantage
<b>KV</b>	Kombinierter Verkehr
<b>KVBG</b>	Kohleverstromungsbeendigungsgesetz
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme-Kopplung
<b>KWKG</b>	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
<b>LCD</b>	Liquid crystal display (Flüssigkristallbildschirm)
<b>LED</b>	Light-emitting diode (Leuchtdiode)
<b>LF</b>	Landbaufläche
<b>LiSE</b>	Livestock, Soil and Energy Emissions
<b>LNF</b>	Leichte Nutzfahrzeuge
<b>LNG</b>	Liquefied natural gas (Flüssiggas)
<b>LPG</b>	Liquefied petroleum gas (Autogas)
<b>LuftVSt</b>	Luftverkehrssteuer
<b>LULUCF</b>	Land use, land-use change and forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)
<b>LUMAS</b>	Liegenschaftsbezogenes Umweltmanagement- und Auditsystem
<b>MAP</b>	Marktanreizprogramm
<b>MDI</b>	Metered dose inhaler (Dosier-Aerosole)
<b>MEPS</b>	Minimum energy performance standard

<b>MFH</b>	Mehrfamilienhaus
<b>MiD</b>	Mobilität in Deutschland
<b>MIE</b>	Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz
<b>Mio.</b>	Millionen
<b>MIV</b>	Motorisierter Individualverkehr
<b>MMS</b>	Mit-Maßnahmen-Szenario
<b>MW</b>	Megawatt
<b>MWMS</b>	Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario
<b>NACE</b>	Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne)
<b>NE</b>	Not estimated
<b>NEC (Directive)</b>	(Richtlinie über) nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe (National Emission Ceilings Directive)
<b>NF<sub>3</sub></b>	Stickstofftrifluorid
<b>NFz</b>	Nutzfahrzeug
<b>NIR</b>	National Inventory Report
<b>NKI</b>	Nationale Klimaschutzinitiative
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Lachgas
<b>NTC</b>	Net Transfer Capacity
<b>NWG</b>	Nichtwohngebäude
<b>NWS</b>	Nationale Wasserstoffstrategie
<b>OBEV</b>	Batterieelektrische Last- und Sattelzüge mit Stromabnehmern für Oberleitungen
<b>OPEX</b>	Operational expenditure (Betriebskosten)
<b>ÖPNV</b>	Öffentlicher Personennahverkehr
<b>ÖPV</b>	Öffentlicher Personenverkehr
<b>ÖV</b>	Öffentlicher Verkehr
<b>PB</b>	Projektionsbericht
<b>PEV</b>	Primärenergieverbrauch
<b>PHEV</b>	Plug-In Hybrid Vehicle
<b>PJ</b>	Petajoule
<b>POM</b>	Placing on the market (Inverkehrbringen)
<b>PtG</b>	Power to Gas
<b>PtL</b>	Power to Liquid
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>QNG</b>	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
<b>REA</b>	Rauchgasentschwefelungsanlage
<b>RED</b>	Renewable Energies Directive (Erneuerbare-Energien-Richtlinie)
<b>RILSA</b>	Richtlinien für Lichtsignalanlagen

<b>RL</b>	Richtlinie
<b>RVG</b>	Raufutter verzehrende Großvieheinheit
<b>SDG</b>	Sustainable Development Goals
<b>SF<sub>6</sub></b>	Schwefelhexafluorid
<b>SIFOP</b>	Simple forest projection tool
<b>SPFV</b>	Schienenpersonenfernverkehr
<b>SPI</b>	Sustainable Products Initiative
<b>SPNV</b>	Schienenpersonennahverkehr
<b>SPV</b>	Schienenpersonenverkehr
<b>SSU</b>	S-Bahnen, Straßenbahnen und U-Bahnen
<b>StBauF</b>	Städtebauförderung
<b>StoffBilV</b>	Stoffstrombilanzverordnung
<b>StromSt</b>	Stromsteuer
<b>StromStG</b>	Stromsteuergesetz
<b>StVO</b>	Straßenverkehrsordnung
<b>TCO</b>	Total cost of ownership (Gesamtkosten für die Anschaffung und Nutzung)
<b>TGA</b>	Technische Gebäudeausrüstung
<b>THG</b>	Treibhausgas
<b>TI</b>	Thünen-Institut
<b>TREMOD</b>	Transport Emission Model
<b>TWh</b>	Terawattstunde
<b>TYNDP</b>	Ten Year Network Development Plan
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt
<b>UCO</b>	Used cooking oil (Altspeisefett und -öl)
<b>UER</b>	Upstream Emission Reduction
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>VwV</b>	Verwaltungsvorschrift
<b>WACC</b>	Weighted Average Cost of Capital (gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten)
<b>WEHAM</b>	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung
<b>WLTP</b>	Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure
<b>zGG</b>	Zulässiges Gesamtgewicht
<b>ZHK</b>	Zentralheizkessel
<b>ZRE</b>	Zentrum für Ressourceneffizienz
<b>ZSE</b>	Zentrales System Emissionen

## Zusammenfassung

**Abbildung 1: Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Quellbereichen, 2010-2030**



Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut für KIS-2030

Im Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 wurde das Ziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um mindestens 65 % gegenüber 1990 bis 2030 und um mindestens 88 % bis 2040 festgelegt. Im Jahr 2045 soll Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden.

Im Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) wurden konkrete politische Klimaschutzinstrumente für die Erreichung des Treibhausgasemissionsminderungsziels von mindestens 65 % im Jahr 2030 erarbeitet. Daneben wurde in einer Sensitivitätsrechnung ermittelt, welche Treibhausgasemissionen sich ergeben würden, sofern der CO<sub>2</sub>-Preis des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) dem im Projektionsbericht 2021 angenommenen (niedrigeren) Preis entsprechen würde. Des Weiteren wurden die Ergebnisse des KIS-2030 mit dem Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts 2021 verglichen. Das KIS-2030 wurde zwar bis 2040 modelliert, aber die Erreichung der Sektorziele im Jahr 2030 stand bei der Ausgestaltung der Instrumente im Vordergrund.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Treibhausgasemissionsminderung in der Sensitivitätsrechnung sich nur geringfügig von der Treibhausgasemissionsminderung im KIS-2030 unterscheidet. Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, dass eine Erhöhung des BEHG-Preises nur eine geringe klimapolitische Wirkung hat. Der geringe Unterschied zwischen beiden Szenarien liegt vielmehr darin begründet, dass in der Sensitivitätsrechnung der gleiche Instrumentenmix zur

Geltung kommt wie im KIS-2030 und dass dieser bereits sehr ambitioniert ausgestaltet ist. Darüber hinaus wirkt die CO<sub>2</sub>-Bepreisung komplementär und unterstützt durch das Preissignal die Umsetzung der Instrumente. Dies entspricht den Ergebnissen einer weiteren Studie (Öko-Institut et al. 2022), in der gezeigt wurde, dass der Effekt einer ausschließlichen Erhöhung des BEHG-Preises gering im Vergleich zu einer Kombination der Bepreisung mit weiteren Maßnahmen ist.

### Datengrundlage der Modellierung

Das KIS-2030 wurde vor dem Angriff Russlands auf die Ukraine am 24. Februar 2022 entworfen und gerechnet, sodass damit zusammenhängende Entwicklungen nicht berücksichtigt sind. Es ist davon auszugehen, dass die im KIS-2030 beschriebenen Entwicklungen deutlich beschleunigt werden müssen und die Bedeutung von Erdgas schneller als hier dargestellt abnehmen wird.

Die Projektionen umfassen die KSG-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 nachrichtlich ausgewiesen.

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Gesamtemissionen ergeben sich einerseits aus den energiebedingten Treibhausgasemissionen und andererseits aus den Treibhausgasemissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung, der Landwirtschaft und der Abfallwirtschaft sowie Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF).

**Tabelle 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Vergleich der Szenarien, 2018-2040**

Sektor	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Energiewirtschaft</b>						
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	305,1	242,8	193,2	135,4	74,9
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	305,1	155,5	76,3	47,4	25,7
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-34,6 %	-66,6 %	-83,6 %	-89,8 %	-94,5 %
<b>Industrie</b>						
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	194,9	174,8	154,6	143,2	139,4
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	194,9	155,7	117,7	95,5	76,2
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-30,8 %	-44,7 %	-58,2 %	-66,1 %	-72,9 %
<b>Gebäude</b>						
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	116,6	107,9	90,9	69,0	50,2
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	116,6	99,6	67,0	38,5	20,6
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-44,4 %	-52,5 %	-68,1 %	-81,7 %	-90,2 %
<b>Verkehr</b>						
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	162,3	151,4	126,4	100,1	78,7
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	162,3	134,9	84,1	42,3	21,4
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-1,0 %	-17,7 %	-48,7 %	-74,2 %	-87,0 %

Sektor	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Landwirtschaft</b>						
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	69,8	67,3	62,8	62,4	62,0
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	69,8	62,0	55,8	50,1	44,7
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-22,3 %	-31,0 %	-37,9 %	-44,3 %	-50,2 %
<b>Abfallwirtschaft &amp; Sonstige</b>						
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	9,7	6,7	5,0	4,0	3,4
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	9,7	6,3	4,0	2,8	2,6
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-74,6 %	-83,6 %	-89,4 %	-92,6 %	-93,2 %
<b>Gesamt (ohne LULUCF)</b>						
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	858,3	750,9	632,9	514,0	408,7
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	858,3	614,0	405,0	276,6	191,2
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-31,3 %	-50,9 %	-67,6 %	-77,9 %	-84,7 %
Minderungsziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	---	---	438,0	287,4 (-77 %)	150,0 (-88 %)
Kumulierte Emissionen ab 2022	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq		2.629,5	5.053,7	6.676,6	7.791,7
Kumulierte Minderung ggü. MMS ab 2022	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq		548,7	2.097,4	4.447,2	7.304,9
<b>LULUCF</b>						
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	-26,9	16,9	22,3	23,0	21,9
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	-26,9	-16,4	-25,1	-33,7	-40,4
<b>Internationaler Luft- und Seeverkehr</b>						
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	34,7	35,1	36,0	37,1	38,0
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	34,7	34,4	35,2	32,9	30,5

Quelle: (UBA 2020c; 2020e), (Öko-Institut et al. 2021), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut.

Die in Tabelle 1 dargestellten Projektionen der Emissionsentwicklung sind selbst bezüglich relativ kurzer Zeiträume mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Wirtschaftsentwicklung, Energiepreise und andere Rahmenbedingungen können die tatsächliche Entwicklung stark beeinflussen. Die Ergebnisse sind daher vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen zu den Rahmendaten zu bewerten.

Wie in Tabelle 1 zu sehen ist, wird im Jahr 2030 im KIS-2030 eine Minderung von rund 68 % gegenüber den Treibhausgasemissionen des Jahres 1990 erreicht. Mit Gesamtemissionen von 405 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq wird das Minderungsziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 erfüllt (ohne Berücksichtigung der Übertragung von über- oder unterschrittenen Zielen aus früheren Jahren).

Im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) wird dieses Ziel ebenfalls erfüllt, während es im MMS deutlich verfehlt wird.

Im Sektor Energiewirtschaft reduzieren sich im KIS-2030 die Emissionen bedeutend stärker als im MMS. Im Jahr 2030 ergeben sich im KIS-2030 Emissionen von 76 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und damit um rund 75 % geringere Emissionen als im Jahr 2018. Diese Reduktion ist vor allen durch die Abnahme der Emissionen der Kohlekraftwerke bedingt – im KIS-2030 wird angenommen, dass im Jahr 2030 keine öffentlichen Kohlekraftwerke mehr in Betrieb sind. Der gegenüber dem Jahr 2018 steigende Bruttostromverbrauch wird insbesondere durch den Zubau von Wind- und Solaranlagen gedeckt. Das Sektorziel des Jahres 2030 von 108 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. wird mit den Treibhausgasemissionen von rund 76 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. deutlich unterboten.

Im Sektor Industrie kommt es im KIS-2030 ebenfalls zu bedeutenden Emissionsreduktionen gegenüber dem MMS. Im Jahr 2030 betragen die Treibhausgasemissionen rund 118 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, dies entspricht einer Reduktion von 24 % im Vergleich zum MMS und 40 % gegenüber 2018. Die größten Einsparungen gegenüber dem MMS finden im Bereich der Wärmeerzeugung (Hochtemperatur und Dampf), der Industriekraftwerke und insbesondere der Eisen- und Stahlproduktion statt. Das KSG-Sektorziel 2030 wird im KIS-2030 erreicht.

Die Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors betragen im KIS-2030 rund 67 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, dies sind 26 % weniger als im MMS und 42 % weniger als im Jahr 2018. Die wichtigsten Treiber sind die ambitionierteren Anforderungen bei der Gebäudesanierung sowie das Verbot fossiler Heizkessel, und der damit verbundene stärkere Umstieg auf Wärmepumpen und Fernwärme. Mithilfe dieser Maßnahmen wird das Sektorziel von 67 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. im KIS-2030 erreicht.

Im Verkehrssektor ist im KIS-2030 eine Emissionsreduktion um 33 % gegenüber dem MMS auf rund 84 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq bis 2030 zu verzeichnen; dieser Wert liegt 48 % unter dem Niveau von 2018. Das KIS-2030 ist das einzige Szenario, in dem das Sektorziel für 2030 eingehalten wird; im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) wird dieses Ziel knapp überschritten. Die Abnahme der Emissionen, insbesondere im Zeitraum ab 2025, erklärt sich durch die zunehmende Elektrifizierung des Fahrzeugbestands. Im Vergleich zum MMS kann mit dem zusätzlichen Instrumentenset des KIS-2030 eine deutlich stärkere Treibhausgasreduzierung bis zum Jahr 2030 erreicht werden. Im Jahr 2025 beträgt die zusätzliche Minderung bereits 16,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und steigt bis zum Jahr 2030 auf 42,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq an. Bereits ein weniger ambitionierter CO<sub>2</sub>-Preispfad (BEHG-Sensitivität) sorgt bei ansonsten gleicher Ausgestaltung des Szenarios dafür, dass das Sektorziel im Jahr 2030 leicht verfehlt wird. Im MMS wird dieses mit Überschreitung um 41,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq sogar sehr deutlich verfehlt. Selbst in der ambitioniertesten Ausgestaltung im KIS-2030 werden die Ziele des Klimaschutzgesetzes in den vorangehenden Jahren verfehlt, auch wenn sich die Lücke bis zum Jahr 2030 kontinuierlich verringert. Den Szenarien gemein ist, dass sich die Treibhausgasreduzierung zunehmend beschleunigt und sich dabei insbesondere die zunehmende Elektrifizierung des Fahrzeugbestands nach 2025 deutlich bemerkbar macht. So rangiert die Bandbreite der Treibhausgasreduzierung gegenüber dem Basisjahr 1990 im Jahr 2025 noch im Bereich von 7,6 % (MMS) bis 17,7 % (KIS-2030) und erhöht sich innerhalb von 5 Jahren auf bereits 22,9 % (MMS) bis 48,7 % (KIS-2030) im Jahr 2030.

Die Emissionen aus der Landwirtschaft sinken im Vergleich zu den anderen Sektoren weniger stark: Mit rund 56 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 sind sie um 11 % geringer als im MMS und liegen um 20 % unter dem Wert des Jahres 2018. Die wichtigsten Treiber sind die Verschärfung der Düngeverordnung und die Förderung des Öko-Landbaus.

Im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges liegen die Treibhausgasemissionen im KIS-2030 mit rund 4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 um 20 % unter den Emissionen im MMS und um 58 % unter

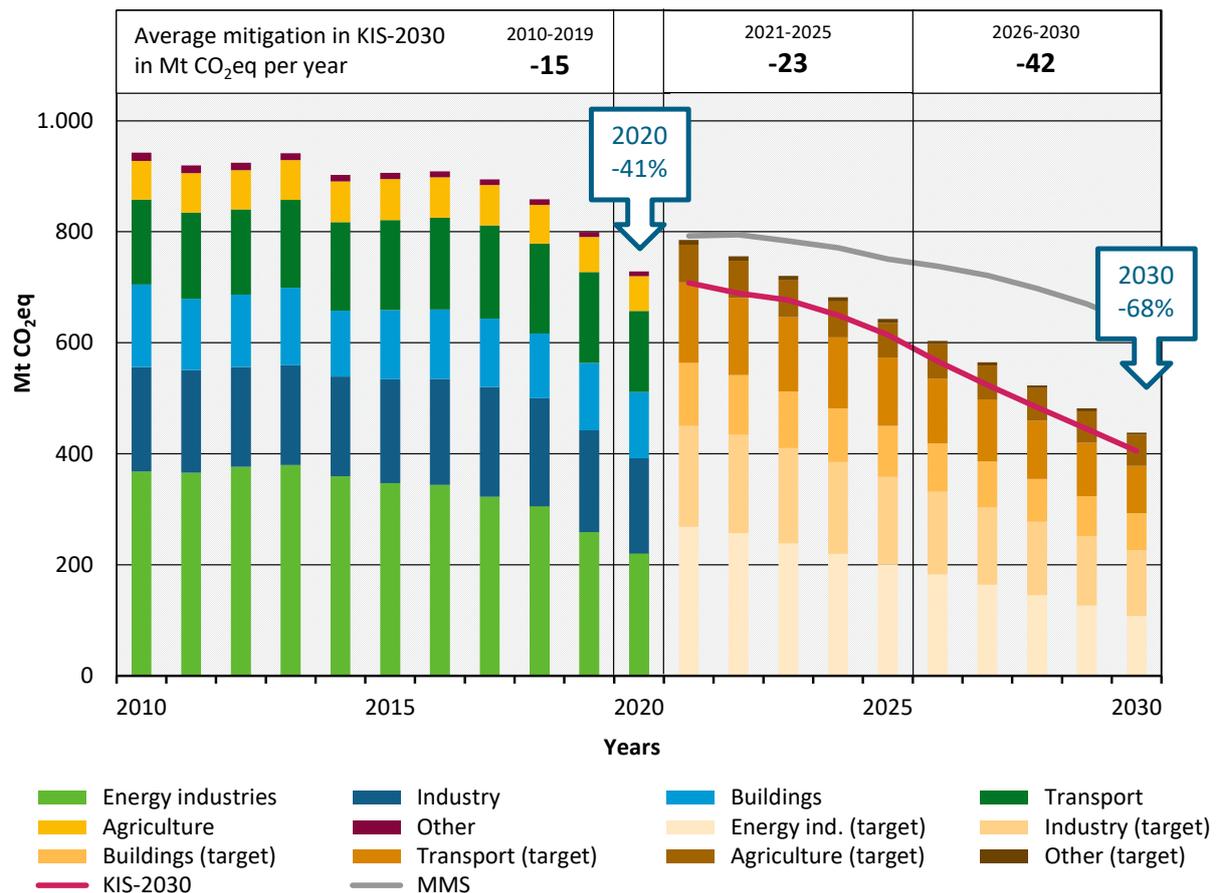
jenen von 2018. Die wichtigsten Treiber sind die Ausweitung der Deponiebelüftung und die Optimierung der Gasfassung.

Im Sektor LULUCF werden im MMS für 2030 CO<sub>2</sub>-Emissionen von 22,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq projiziert, während der Sektor im KIS-2030 eine Senke in der Größe von 25,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq darstellt. Dieser Unterschied ist vor allem in der unterschiedlichen Abbildung der lebenden Biomasse auf der Waldfläche begründet, die aus Sicht der Autoren im MMS als deutlich zu gering bilanziert wird (methodische Abweichung um 39,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq). Darüber hinaus sind die wichtigsten Treiber ein ambitionierterer Moorbodenschutz auf landwirtschaftlichen Flächen und der Humusaufbau auf landwirtschaftlichen Flächen durch Agroforstsysteme.

Die wichtigsten Rahmendaten sowie Indikatoren sind im Kapitel zu Kernindikatoren dargestellt.

## Summary

**Figure 1: Development of total greenhouse gas emissions by source category, 2010-2030**



Source: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) for MMS, modelling by Fraunhofer ISI, IREES and Oeko-Institut for KIS-2030

The Federal Climate Change Act of 2021 set the target of reducing Germany's greenhouse gas emissions by at least 65 % by 2030 and by at least 88 % by 2040 compared to 1990 levels. Net greenhouse gas neutrality is to be achieved in 2045.

In the Climate Policy Instruments Scenario 2030 (KIS-2030), concrete climate policy instruments were developed for achieving the greenhouse gas reduction target of at least 65 % in 2030. In addition, a sensitivity calculation was carried out to determine the greenhouse gas emissions that would result if the CO<sub>2</sub> price of the Fuel Emissions Trading Act (BEHG) corresponded to the (lower) price assumed in the 2021 Projection Report. Furthermore, the results of the KIS-2030 were compared to the With Measures Scenario (MMS) of the 2021 Projection Report. Although the KIS-2030 was modelled up to 2040, the achievement of the sector targets in 2030 was the main focus in the design of the instruments.

It should be noted at this point that the GHG reduction in the sensitivity calculation differs only slightly from the GHG reduction in the KIS-2030. This does not mean, however, that an increase in the BEHG price has only a minor climate policy effect. The small difference between the two scenarios is much more due to the fact that the same instrument mix is used in the sensitivity calculation as in the KIS-2030 and that this mix is already very ambitious. Furthermore, the CO<sub>2</sub> price has a complementary effect and supports the implementation of the instruments through the price signal. This corresponds to the results of another study (Öko-Institut et al. 2022),

which showed that the effect of an increase of the BEHG price on its own is low compared to the effect of combining pricing with other measures.

#### Data basis of the modelling

The KIS-2030 was designed and calculated before Russia's invasion of Ukraine on 24<sup>th</sup> February 2022, with the consequence that developments connected with this are not considered. It can be assumed that the developments described in the KIS-2030 will have to be significantly accelerated and that the prominence of natural gas will decrease more quickly than shown here.

The projections include the sectors of energy, industry, buildings, transport, agriculture, waste management and other, and land use, land use change and forestry (LULUCF). For information purposes, the emissions of international aviation and maritime transport relevant for Germany are shown.

The development of greenhouse gas emissions is shown in Table 1. The total emissions result from the energy-related greenhouse gas emissions and from the greenhouse gas emissions from industrial processes and product use, agriculture and waste management and land use, land use change and forestry (LULUCF).

**Table 1: Comparison of scenarios with regard to GHG emission development, 2018-2040**

Sector	Unit	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Energy sector</b>						
MMS	Mt CO <sub>2</sub> eq	305.1	242.8	193.2	135.4	74.9
KIS-2030	Mt CO <sub>2</sub> eq	305.1	155.5	76.3	47.4	25.7
<i>Mitigation compared to 1990</i>		-34.6 %	-66.6 %	-83.6 %	-89.8 %	-94.5 %
<b>Industry</b>						
MMS	Mt CO <sub>2</sub> eq	194.9	174.8	154.6	143.2	139.4
KIS-2030	Mt CO <sub>2</sub> eq	194.9	155.7	117.7	95.5	76.2
<i>Mitigation compared to 1990</i>		-30.8 %	-44.7 %	-58.2 %	-66.1 %	-72.9 %
<b>Buildings</b>						
MMS	Mt CO <sub>2</sub> eq	116.6	107.9	90.9	69.0	50.2
KIS-2030	Mt CO <sub>2</sub> eq	116.6	99.6	67.0	38.5	20.6
<i>Mitigation compared to 1990</i>		-44.4 %	-52.5 %	-68.1 %	-81.7 %	-90.2 %
<b>Transport</b>						
MMS	Mt CO <sub>2</sub> eq	162.3	151.4	126.4	100.1	78.7
KIS-2030	Mt CO <sub>2</sub> eq	162.3	134.9	84.1	42.3	21.4
<i>Mitigation compared to 1990</i>		-1.0 %	-17.7 %	-48.7 %	-74.2 %	-87.0 %

Sector	Unit	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Agriculture</b>						
MMS	Mt CO <sub>2</sub> eq	69.8	67.3	62.8	62.4	62.0
KIS-2030	Mt CO <sub>2</sub> eq	69.8	62.0	55.8	50.1	44.7
Mitigation compared to 1990		-22.3 %	-31.0 %	-37.9 %	-44.3 %	-50.2 %
<b>Waste management &amp; other</b>						
MMS	Mt CO <sub>2</sub> eq	9.7	6.7	5.0	4.0	3.4
KIS-2030	Mt CO <sub>2</sub> eq	9.7	6.3	4.0	2.8	2.6
Mitigation compared to 1990		-74.6 %	-83.6 %	-89.4 %	-92.6 %	-93.2 %
<b>Total (without LULUCF)</b>						
MMS	Mt CO <sub>2</sub> eq	858.3	750.9	632.9	514.0	408.7
KIS-2030	Mt CO <sub>2</sub> eq	858.3	614.0	405.0	276.6	191.2
Mitigation compared to 1990		-31.3 %	-50.9 %	-67.6 %	-77.9 %	-84.7 %
Mitigation target of Federal Climate Change Act 2021	Mt CO <sub>2</sub> eq	---	---	438.0	287.4 (-77 %)	150.0 (-88 %)
Cumulative emissions from 2022	Mt CO <sub>2</sub> eq		2,629.5	5,053.7	6,676.6	7,791.7
Cumulative reduction compared to MMS from 2022	Mt CO <sub>2</sub> eq		548.7	2,097.4	4,447.2	7,304.9
<b>LULUCF</b>						
MMS	Mt CO <sub>2</sub> eq	-26.9	16.9	22.3	23.0	21.9
KIS-2030	Mt CO <sub>2</sub> eq	-26.9	-16.4	-25.1	-33.7	-40.4
<b>International air and maritime transport</b>						
MMS	Mt CO <sub>2</sub> eq	34.7	35.1	36.0	37.1	38.0
KIS-2030	Mt CO <sub>2</sub> eq	34.7	34.4	35.2	32.9	30.5

Source: (UBA 2020c; 2020e), (Öko-Institut et al. 2021), modelling by Fraunhofer ISI, IREES and Oeko-Institut

The projected emission development shown in Table 1 is subject to considerable uncertainty, even as regards relatively short time periods. Economic development, energy prices and other framework conditions can strongly influence the actual development. The results must therefore be evaluated against the background of the assumptions made about the framework data.

As can be seen in Table 1, a reduction of approx. 68 % compared to the greenhouse gas emissions of 1990 is achieved in 2030 in the KIS-2030. With total emissions of 405 Mt CO<sub>2</sub>eq, the reduction target of the Federal Climate Change Act 2021 is met (without taking into account the

carry-over of over- or under-achieved targets of previous years). In the KIS-2030 (BEHG sensitivity), this target is also met, while it is clearly missed in the MMS.

In the energy sector, emissions are reduced to a significantly greater extent in the KIS-2030 than in the MMS. In 2030, the KIS-2030 leads to emissions of 76 Mt CO<sub>2</sub>eq; these total emissions are approx. 75 % lower than in 2018. This reduction is mainly due to the decrease in emissions from coal-fired power plants; in the KIS-2030, it is assumed that no public coal-fired power plants will be in operation in 2030. The increase in gross electricity consumption compared to 2018 is covered by the expansion of wind and solar power plants. The 2030 sector target of 108 Mt CO<sub>2</sub>eq is clearly missed, with greenhouse gas emissions of approx. 76 Mt CO<sub>2</sub>eq.

In the industry sector, there are also significant emission reductions in the KIS-2030 compared to the MMS. In 2030, greenhouse gas emissions amount to approx. 118 Mt CO<sub>2</sub>eq, which corresponds to a reduction of 24 % compared to the MMS and of 40 % compared to 2018. The largest emission savings compared to the MMS take place in heat generation (high temperature and steam), industrial power plants and in particular iron and steel production. The 2030 sector target of the Federal Climate Change Act is achieved in the KIS-2030.

The GHG emissions of the buildings sector amount to approx. 67 Mt CO<sub>2</sub>eq in the KIS-2030; this total is 26 % lower than in the MMS and 42 % lower than in 2018. The most important drivers are the more ambitious requirements regarding building renovation and the ban on fossil boilers as well as the corresponding larger switch to heat pumps and district heating. With the help of these measures, the sector target of 67 Mt CO<sub>2</sub>eq is achieved in the KIS-2030.

In the transport sector, the KIS-2030 shows a 33 % reduction in emissions by 2030 to approx. 84 Mt CO<sub>2</sub>eq compared to the MMS; this total is 48 % below the 2018 level. The KIS-2030 is the only scenario in which the sector target for 2030 is met; in the KIS-2030 (BEHG sensitivity), this target is just missed. The decrease in emissions, particularly from 2025, is explained by the increasing electrification of the vehicle fleet. Compared to the MMS, the additional set of instruments in the KIS-2030 enables a significantly higher greenhouse gas reduction to be achieved by 2030. The additional reduction amounts to 16.5 Mt CO<sub>2</sub>eq in 2025 and increases to 42.3 Mt CO<sub>2</sub>eq by 2030. Even a less ambitious CO<sub>2</sub> price path (BEHG sensitivity) leads to the sector target being just missed in 2030, with all other things being equal. In the MMS, this target is missed by a very large margin: it is exceeded by 41.4 Mt CO<sub>2</sub>eq. Even in the most ambitious design in the KIS-2030, the targets of the Federal Climate Change Act are missed in the preceding years, although the gap is continuously reduced up to 2030. The scenarios have in common that over time, the reduction of GHG emissions occurs more quickly; the increasing electrification of the vehicle fleet is particularly noticeable after 2025. Compared to the base year of 1990, the reduction in greenhouse gas emissions still ranges from 7.6 % (MMS) to 17.7 % (KIS-2030) in 2025 and increases within 5 years to 22.9 % (MMS) and 48.7 % (KIS-2030) in 2030.

The emissions from the agricultural sector show a lower decrease compared to the other sectors: at approx. 56 Mt CO<sub>2</sub>eq in 2030, these emissions are 11 % lower than in the MMS and 20 % lower than in 2018. The main drivers are the tightening of the German Fertilizer Ordinance and the promotion of organic farming.

In the waste management and other sector, GHG emissions are 20 % lower in the KIS-2030 than in the MMS and 58 % lower than in 2018, at approx. 4 Mt CO<sub>2</sub>eq in 2030. The main drivers are the expansion of landfill aeration and the optimization of gas capture.

In the LULUCF sector, CO<sub>2</sub> emissions are projected to be 22.3 Mt CO<sub>2</sub>eq in 2030 in the MMS, while in the KIS-2030 the sector is a sink of the magnitude of 25.1 Mt CO<sub>2</sub>eq. This difference is mainly due to the different mapping of living biomass on the forest area; in the authors' view, it

is clearly too low in the MMS (methodological deviation of 39.6 Mt CO<sub>2</sub>eq). Furthermore, the main drivers are more ambitious peatland protection in agricultural land and humus build-up on agricultural land through agroforestry systems.

# 1 Kernindikatoren

**Tabelle 2: Entwicklung der Rahmendaten im Vergleich der Szenarien, 2025-2040**

Parameter	Einheit	2025	2030	2035	2040
Bevölkerung (Annahme)	Mio.	83,6	83,8	83,8	83,5
Bruttoinlandsprodukt	Mrd. €2016	3.411	3.555	3.725	3.949
<b>CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis</b>					
MMS	€2016/EUA	25,0	30,0	40,0	53,0
KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	€2016/EUA	82,0	115,0	160,0	225,0
<b>BEHG-Preis</b>					
MMS	€/t (nominal)	55,0	125,0	200,0	275,0
KIS-2030	€/t (nominal)	100,0	240,0	340,0	440,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	€/t (nominal)	55,0	125,0	200,0	275,0

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021; Matthes et al. 2021).

**Tabelle 3: Entwicklung energiebezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2018-2040**

Indikator	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Primärenergieverbrauch</b>						
MMS	PJ	12.989	11.627	10.791	9.802	9.021
KIS-2030	PJ	12.989	10.754	9.263	8.378	7.852
<b>Endenergieverbrauch</b>						
MMS	PJ	9.076	8.790	8.278	7.743	7.293
KIS-2030	PJ	9.076	8.427	7.460	6.724	6.229
<b>Bruttostromverbrauch</b>						
MMS	TWh	595	579	598	632	673
KIS-2030	TWh	595	606	728	847	922
<b>Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch</b>						
MMS		37,8 %	51,2 %	62,9 %	77,6 %	83,9 %
KIS-2030		37,8 %	55,5 %	79,0 %	92,8 %	102,8
<b>Installierte Leistung Wind an Land</b>						
MMS	GW	52,3	62,8	71,0	92,0	107,2
KIS-2030	GW	52,3	69,9	102,6	127,4	146,7
<b>Installierte Leistung Wind auf See</b>						

Indikator	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
MMS	GW	6,4	10,5	20,0	32,2	39,8
KIS-2030	GW	6,4	10,3	29,9	46,6	58,6
<b>Installierte Leistung PV</b>						
MMS	GW	45,2	75,5	100,0	118,2	122,4
KIS-2030	GW	45,2	101,7	199,1	286,4	362,2
<b>Emissionsfaktor des Strommixes</b>						
MMS	g CO <sub>2</sub> /kWh	468,3	397,6	287,6	176,8	87,0
KIS-2030	g CO <sub>2</sub> /kWh	468,3	240,7	81,8	36,8	12,3

\* Ein Verhältnis zwischen erneuerbaren Energien und Bruttostromverbrauch größer als 100 % bedeutet, dass mehr Strom aus erneuerbaren Energien in Deutschland erzeugt wird als insgesamt verbraucht wird, d.h. dass ein Netto-Stromexport vorliegt.

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021), (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut.

**Tabelle 4: Entwicklung weiterer Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2018-2040**

Indikator	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Anzahl E-Pkw</b>						
MMS	Mio.	0,2	3,9	8,4	13,4	17,8
KIS-2030	Mio.	0,2	7,0	14,7	21,6	27,1
<b>Verkehrsnachfrage Pkw</b>						
MMS	Mrd. Pkm	895	906	893	899	914
KIS-2030	Mrd. Pkm	895	873	789	752	747
<b>Elektrische Fahrleistung Lkw</b>						
MMS		0 %	5 %	12 %	19 %	29 %
KIS-2030		0 %	9 %	37 %	70 %	86 %
<b>Güterverkehrsleistung Straße</b>						
MMS	Mrd. tkm	499	526	544	557	574
KIS-2030	Mrd. tkm	499	492	521	546	559
<b>Anzahl Wärmepumpen<sup>2</sup></b>						
MMS	Mio.		0,36	0,88	1,73	2,93
KIS-2030	Mio.		1,76	5,87	10,85	14,77
<b>Änderung Endenergieverbrauch Gebäudesektor ggü. 2018 durch:</b>						
<b>Gebäudesanierung</b>						

<sup>2</sup> Kumulierte, absolute Anzahl an installierten Wärmepumpen

Indikator	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
MMS	TWh		-19,3	-46,0	-81,7	-124,7
KIS-2030	TWh		-50,5	-107,0	-164,0	-215,5
<b>Austausch des Wärmeversorgungssystems<sup>3</sup></b>						
MMS	TWh		-8,8	-29,3	-59,6	-86,1
KIS-2030	TWh		-28,5	-88,9	-139,7	-162,8
<b>Steigende Außentemperatur<sup>4</sup></b>						
MMS	TWh		-16,7	-27,1	-35,5	-42
KIS-2030	TWh		-17	-26,4	-34,5	-39,9

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021), (BMWi 2021), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut.

<sup>3</sup> Inklusive Umweltwärme für Wärmepumpen

<sup>4</sup> Veränderung des Endenergieverbrauchs von Raumwärme und Warmwasser durch gestiegene Außentemperaturen im Zuge des Klimawandels.

**Tabelle 5: Entwicklung von Nachfrage und Produktion neuer Treib- und Brennstoffe im Vergleich der Szenarien, 2025-2040**

Indikator	Einheit	2025	2030	2035	2040
<b>Elektrische Leistung Elektrolyseure (Wasserstoff und PtL)</b>					
MMS	GW	2,9	5,0	7,5	10,0
KIS-2030	GW	2,9	10,0	15,0	20,0
<b>Nachfrage nach Elektrolysewasserstoff</b>					
MMS	PJ (TWh)	8 (2)	29 (8)	49 (14)	67 (19)
KIS-2030	PJ (TWh)	45 (13)	147 (41)	224 (62)	297 (82)
<b>Inländische Wasserstoffproduktion</b>					
MMS	PJ (TWh)	8 (2)	29 (8)	49 (14)	67 (19)
KIS-2030	PJ (TWh)	17 (5)	90 (25)	140 (39)	190 (53)
<b>Wasserstoffimporte</b>					
MMS	PJ (TWh)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
KIS-2030	PJ (TWh)	28 (8)	58 (16)	84 (23)	106 (30)
<b>Inländischer Stromverbrauch d. Elektrolyseure</b>					
MMS	PJ (TWh)	11 (3)	41 (11)	69 (19)	96 (27)
KIS-2030	PJ (TWh)	24 (7)	128 (36)	200 (56)	272 (76)
<b>Nachfrage strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe</b>					
MMS	PJ (TWh)	0 (0)	39 (11)	70 (19)	71 (20)
KIS-2030	PJ (TWh)	0 (0)	37 (10)	114 (32)	162 (45)
<b>Inländische Produktion strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe</b>					
MMS	PJ (TWh)	0 (0)	8 (2)	8 (2)	9 (2)
KIS-2030	PJ (TWh)	0 (0)	8 (2)	9 (2)	9 (2)
<b>Import strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe</b>					
MMS	PJ (TWh)	0 (0)	31 (9)	62 (17)	63 (17)
KIS-2030	PJ (TWh)	0 (0)	29 (8)	106 (29)	152 (42)
<b>Inländischer Stromverbrauch der PtL-Herstellung</b>					
MMS	PJ (TWh)	0 (0)	16 (4)	16 (4)	17 (5)
KIS-2030	PJ (TWh)	0 (0)	16 (4)	18 (5)	19 (5)

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut.

**Tabelle 6: Treibhausgasminderungswirkung von zentralen Instrumenten und Instrumentenbündeln im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2025 und 2030**

Instrumente im KIS-2030	Instrumententyp	Wirkungsbeginn	2025	2030
			Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	
<b>Instrumente im Sektor Energiewirtschaft</b>				
Steigerung der Ambition im EU ETS und höherer Zertifikatspreis	E	2021	104,54	131,65
Anhebung und Beschleunigung des Dekarbonisierungspfad in der Stromerzeugung	E, R	2021		
Verpflichtende kommunale Wärmeplanung	R			
Energieflächenverpflichtung öffentlicher Eigentümer	R	2021	0,13	4,23
Bundesförderung effiziente Wärmenetze mit flankierenden Maßnahmen (BEW)	F	2021		
Umsetzung der Wasserstoffstrategie in Raffinerien		2021	0,5	2,1
<b>Instrumente im Sektor Industrie</b>				
Steigerung der Ambition im EU ETS und höherer Zertifikatspreis	E	2021	8,27	12,16
Energiesteuerreform (BEHG+Energiepreise)	E	2021	0,70	1,51
Aufstockung der Mittel für die Investitionsförderung CO <sub>2</sub> -armer und -freier Technologien	F	2023	5,79	17,99
Instrumentenbündel "Materialeffizienz"	R, E, V, D	2023	2,98	1,20
Instrumentenbündel "Energieeffizienz"	R, E, V, D	2022	1,36	4,05
<b>Instrumente im Sektor Gebäude</b>				
BEHG (Preisfad KIS-2030)	E	2021	0,5	1,2
Förderung - 1 Mio. Wärmepumpenprogramm	F	2022	3,1	4,9
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG) - Schärfung Neubau und Bestandsanforderungen	R	2023/2025	1,4	2,8
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG) - Öl- und Gaskesselverbot	R	2023/2025	1,3	6,2
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG) - MEPS	R	2022	0,2	3,8
<b>Instrumente im Sektor Verkehr</b>				
Erhöhte CO <sub>2</sub> -Bepreisung für die Sektoren Wärme und Verkehr (BEHG)	E	2023	4,7	14,4
Stärkere CO <sub>2</sub> -Spreizung der Kfz-Steuer im 1. Jahr (Malus)	E	2023	3,2	9,4
Ausweitung der Lkw-Maut	E	2025	0,8	4,6
Ausbau Lkw-Energieinfrastruktur	F	2022	0,2	4,0

Instrumente im KIS-2030	Instrumententyp	Wirkungsbeginn	2025	2030
Abschaffung des Dieselsteuerprivilegs	E	2023		
Nationale Umsetzung der RED II / THG-Quote	E	2022	2,5	6,1
Absenkung EEG-Umlage	E	2022		
EU-Mindestenergiesteuersatz für inländische Flüge	E	2023		
PtL im Flugverkehr nach 2030 beschleunigt einführen	E	2030	0,4	0,4
Kaufprämien für elektrische Fahrzeuge	F	2022		
Umgestaltung der Besteuerung von Dienstwagen	E	2023	4,6	3,5
<b>Instrumente im Sektor Landwirtschaft</b>				
Förderung des Öko-Landbaus	F	2022	0,5	1,7
Verschärfung der DÜV auf mineralischen Böden in Kombination mit Tierwohlförderung	R, F	2023	1,7	2,0
<b>Instrumente im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges<sup>5</sup></b>				
Förderprogramm zur Ausweitung der Deponiebelüftung und Optimierung der Gasfassung			0,34	0,87
<b>Instrumente im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft</b>				
Methodenwechsel: Abbildung MMS in FABio-Land (inkl. Übernahme der Ergebnisse zum Waldmodell und Holzprodukten)			1,5	1,4
Methodenwechsel: Waldmodellierung und Holzprodukte			28,6	39,6
Mehr Moorbodenschutz			1,1	2,3
Humusaufbau (Agroforst, Kurzumtriebsplantagen)			2,0	3,8

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

Anmerkung: Erklärung der Instrumententypen: Tabelle A 1 im Anhang A1. Gerundet als „0,0“ ausgewiesene Minderungswirkungen sind größer als Null, aber kleiner als 0,05.

<sup>5</sup> In diesem Sektor gibt es kein Instrument, das eine Wirkung von mindestens 1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 aufweist. Aus diesem Grund wurde das wirkmächtigste Instrument im Sektor aufgeführt.

## 2 Einleitung

Im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) wurde berechnet, wie sich die Treibhausgasemissionen entwickeln könnten, sofern alle bis Ende August 2020 beschlossenen Klimaschutzinstrumente umgesetzt werden. *„Für die gesamten Treibhausgasemissionen (ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) ergibt sich im Zeitraum 1990 bis 2030 eine Minderung um 49 %, [...] bis 2040 wird eine Minderung von 67 % erreicht“* (Öko-Institut et al. 2021). Auf Basis dieser Instrumente wird damit das zum Zeitpunkt der Modellierung gültige Treibhausgasminderungsziel von 55 % im Jahr 2030 laut Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verfehlt. Am 29. April 2021 entschied das Bundesverfassungsgericht, *„dass die Regelungen des Klimaschutzgesetzes vom 12. Dezember 2019 (Klimaschutzgesetz <KSG>) über die nationalen Klimaschutzziele und die bis zum Jahr 2030 zulässigen Jahresemissionsmengen insofern mit Grundrechten unvereinbar sind, als hinreichende Maßgaben für die weitere Emissionsreduktion ab dem Jahr 2031 fehlen“* (BVerfG 2021). Das Gericht befand, dass *„die zum Teil noch sehr jungen Beschwerdeführenden [...] durch die angegriffenen Bestimmungen [...] in ihren Freiheitsrechten verletzt [sind]. Die Vorschriften verschieben hohe Emissionsminderungslasten unumkehrbar auf Zeiträume nach 2030“* (ebd.). Um die Verpflichtungen nach dem Pariser Klimaschutzabkommen zu erreichen, *„müssen die nach 2030 noch erforderlichen Minderungen dann immer dringender und kurzfristiger erbracht werden. Von diesen künftigen Emissionsminderungspflichten ist praktisch jegliche Freiheit potenziell betroffen, weil noch nahezu alle Bereiche menschlichen Lebens mit der Emission von Treibhausgasen verbunden und damit nach 2030 von drastischen Einschränkungen bedroht sind“* (ebd.).

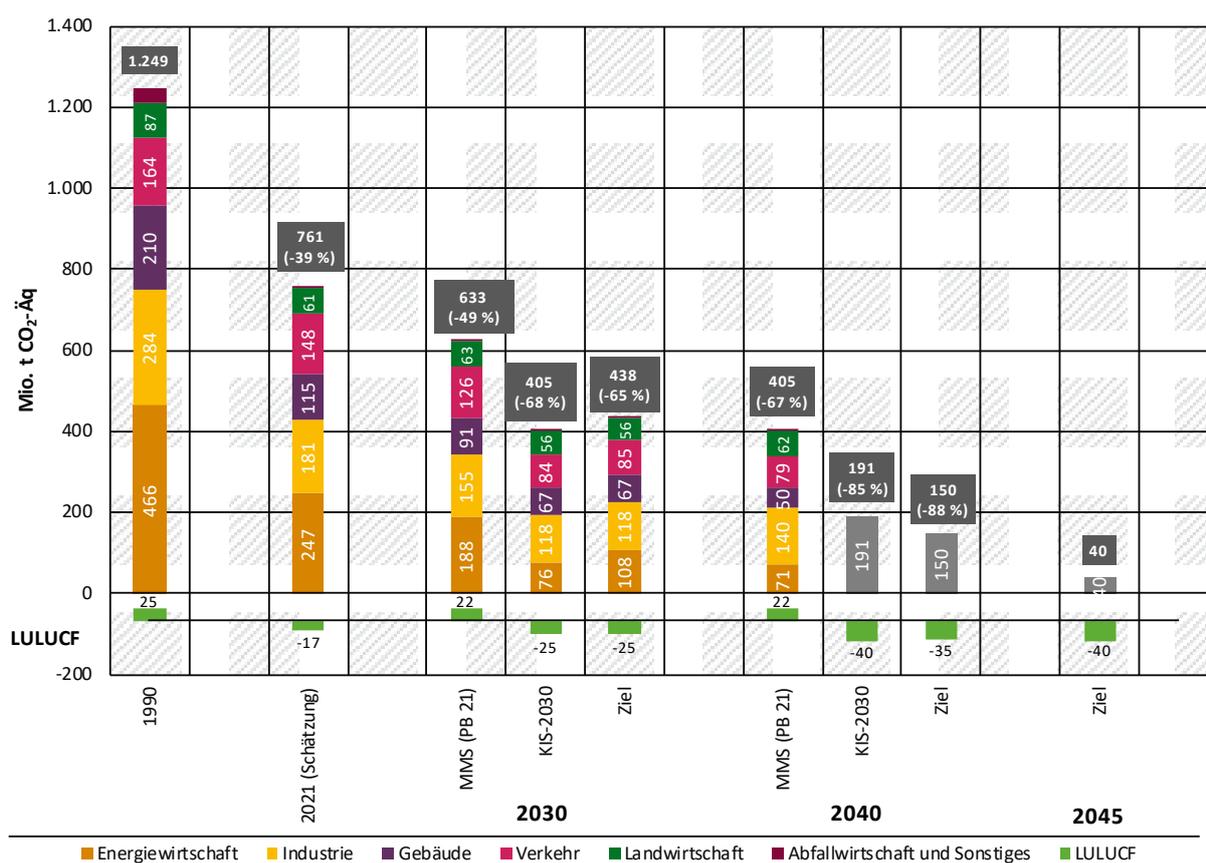
Um dem Beschluss des Bundesverfassungsgericht Rechnung zu tragen, wurde am 24. Juni 2021 das Bundes-Klimaschutzgesetz novelliert<sup>6</sup>. Es sieht nun eine Treibhausgasminderung um mindestens 65 % gegenüber 1990 im Jahr 2030 sowie von mindestens 88 % im Jahr 2040 vor. Im Jahr 2045 soll Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden.

Im Rahmen des Projekts „THG-Projektionen: „Politiksznarien für den Klimaschutz X“ (FKZ 3720 41 501 0) wurde ein Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) erarbeitet, dessen Instrumente eine Erreichung des Treibhausgasminderungsziels von etwa 65 % im Jahr 2030 ermöglichen sollten. Dieser Bericht stellt die Ergebnisse der Modellierung, einschließlich der Treibhausgasminderung der einzelnen Politikinstrumente dar, die durch ein Konsortium deutscher Forschungsinstitute aus Öko-Institut, dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und dem Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt wurde.

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wird für das Jahr 2030 im KIS-2030 das Minderungsziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 eingehalten, während es im ursprünglichen Szenario des Projekts „Politiksznarien X“, dem Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) deutlich verfehlt wird.

---

<sup>6</sup> Verabschiedung durch den Deutschen Bundestag am 18. August 2021.

**Abbildung 2: Treibhausgasemissionen in den Szenarien MMS und KIS im Vergleich zum Minde-  
rungsziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021**

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut für KIS-2030, Umweltbundesamt

Die Berechnungen begannen im Herbst 2021 und wurde im Januar 2022 abgeschlossen. Vorgaben des Koalitionsvertrags von SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP vom 24. November 2021 (SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP 2021) konnten aufgrund zeitlicher Einschränkungen nur noch teilweise bei der Modellierung berücksichtigt werden. Die in der Eröffnungsbilanz des Bundesministers für Wirtschaft und Klimaschutz am 11. Januar 2022 angekündigten gesetzlichen Maßnahmen haben keine Berücksichtigung mehr gefunden.

In einer Sensitivitätsrechnung wurde ermittelt, welche Treibhausgasemissionen sich ergeben würden, sofern der CO<sub>2</sub>-Preis des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) dem im Projektionsbericht 2021 angenommenen (niedrigeren) Preis entsprechen würde. Des Weiteren werden die Ergebnisse des KIS-2030 mit dem Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts 2021 verglichen.

Wie im Projektionsbericht 2021 erfolgt „die Darstellung der Ergebnisse [...] gemäß dem Zuschnitt der Sektoren des KSG: Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, Landnutzung, LULUCF sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges. Die Ergebnisse der sektoralen Modelle werden hierbei in einem übergeordneten Modell integriert. Hierdurch können Wechselwirkungen zwischen den Sektoren berücksichtigt werden, die in einer rein sektoralen Analyse nicht systematisch erfasst werden können“ (Öko-Institut et al. 2021).

Kapitel 3 enthält eine Übersicht zum methodischen Ansatz der Szenarientwicklung und beschreibt die modellierten Szenarien und Sensitivitäten. Im Kapitel 4 werden die Rahmenannahmen kurz beschrieben. Kapitel 5 umfasst die Beschreibung der in der Modellierung berücksichtigten übergreifenden Instrumente und deren Parametrisierung. Die Kapitel 6 bis 12 enthalten die Analysen zu den sektoralen Projektionen. In den Kapiteln 13 und 14 wird die Entwicklung des Primär- und Endenergieverbrauchs dargestellt. Kapitel 15 enthält die Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen.

### 3 Methodischer Ansatz

Dieses Kapitel ist eine überarbeitete und ergänzte Fassung der Beschreibung des methodischen Ansatzes des Projektionsberichts 2021 (Öko-Institut et al. 2021), auf dem diese Studie aufbaut.

#### 3.1 Definition und Abgrenzung der Sektoren

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

- ▶ **Energiewirtschaft:** Der Sektor Energiewirtschaft umfasst öffentliche Kraftwerke und Heizwerke (1.A.1.a), Raffinerief Feuerungen und -kraftwerke (1.A.1.b) sowie Kokereien und andere Anlagen des Umwandlungssektors einschließlich deren Kraftwerke (1.A.1.c). Darüber hinaus umfasst die Energiewirtschaft im KSG den Erdgaspipelinetransport (1.A.3.e) sowie diffuse Emissionen aus der Energienutzung (1.B) [..].
- ▶ **Industrie:** Neben industriellen Prozessfeuerungen und Wärmeerzeugungsanlagen sowie Industriekraftwerken (1.A.2) sind im Sektor Industrie auch die Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung (2) enthalten. Da der Sektor Industrie genauer als Verarbeitendes Gewerbe und Bauwirtschaft definiert ist, sind auch die Emissionen des bauwirtschaftlichen Sonderverkehrs (1.A.2.g.vii) enthalten. Nicht enthalten hingegen sind Raffinerien (1.A.1.b), Kokereien und andere Anlagen des Umwandlungssektors (1.A.1.c) [..].
- ▶ **Gebäude:** Der Sektor Gebäude umfasst die direkten Emissionen der Gebäude. Dies sind „neben der Gebäudewärme aus Heizungsanlagen auch de[r] Brennstoffeinsatz für die Warmwasserbereitung sowie weitere[r] 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 [..]. [Indirekte Emissionen von Strom- und Fernwärmebezug werden nicht im Gebäudesektor, sondern in der Energiewirtschaft bilanziert.]
- ▶ **Verkehr:** Dieser Sektor umfasst den inländischen Straßen- (1.A.3.b), Schienen- (1.A.3.c) und Luftverkehr (1.A.3.a) sowie die Binnen- und Küstenschifffahrt (1.A.3.d). Der internationale Luftverkehr (1.D.1.a) und die Hochseeschifffahrt (1.D.1.b) werden hier auch behandelt, allerdings werden deren Treibhausgasemissionen nicht auf die inländischen Emissionen angerechnet, sondern lediglich nachrichtlich ausgewiesen. Sonderverkehre sind teilweise in anderen Sektoren enthalten, so ist der bauwirtschaftliche Verkehr im Industriesektor (1.A.2.g.vii), der landwirtschaftliche Verkehr (1.A.4.b.ii) und die Fischereischifffahrt (1.A.4.b.iii) im Sektor Landwirtschaft und Erdgaspipelinetransport (1.A.3.e) in der Energiewirtschaft enthalten [..].
- ▶ **Landwirtschaft:** Neben den biologisch-chemischen Emissionen von Tieren und landwirtschaftlichen Böden (3) umfasst dieser Sektor auch die energetischen Emissionen der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei (1.A.4.c) [..].
- ▶ **Abfallwirtschaft und Sonstiges:** Dieser Sektor umfasst die Emissionen, die aus der Behandlung und Lagerung von Abfall (Deponien und andere) sowie von Abwasser entstehen (5) [..].

- *Landnutzung und Forstwirtschaft: Dieser Sektor umfasst die Emissionen von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (englisch: Land use, land-use change and forestry) (4) [...].<sup>7</sup>*

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

*[Tabelle 7] 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“ (Öko-Institut et al. 2021).*

**Tabelle 7: Zuordnung von CRF-Kategorien zu KSG-Sektoren und zur Inventarstruktur laut UNFCCC und Governance-Verordnung**

CRF-Kategorie	KSG-Sektor	UNFCCC / Governance-VO	Kommentar
1.A.1.a Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	Energiewirtschaft	Energiewirtschaft	Öffentliche Kraftwerke, Heizkraftwerke und Heizwerke
1.A.1.b Mineralölraffinerien	Energiewirtschaft	Energiewirtschaft	Raffineriekraftwerke und -feuerungen
1.A.1.c Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	Energiewirtschaft	Energiewirtschaft	U.a. Kokereien, Brikettfabriken, Antriebe im Kohlenbergbau, sonstige Kraftwerke der Energiewirtschaft
1.A.2 Verarbeitendes Gewerbe	Industrie	Industrie	Industriekessel, Prozessfeuerungen sowie Industriekraftwerke, die nicht in 1.A.1.b oder 1.A.1.c enthalten sind
1.A.3.a Ziviler Luftverkehr	Verkehr	Verkehr	
1.A.3.b Straßenverkehr	Verkehr	Verkehr	
1.A.3.c Schienenverkehr	Verkehr	Verkehr	
1.A.3.d Schifffahrt	Verkehr	Verkehr	Binnen- und Küstenschifffahrt
1.A.3.e Übriger Verkehr	Energiewirtschaft	Verkehr	Erdgaspipelineverdichter
1.A.4.a Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	Gebäude	GHD	
1.A.4.b Haushalte	Gebäude	Private Haushalte	

<sup>7</sup> [...] Bei der Berechnung der Gesamtemissionen [wird der Sektor LULUCF] nicht miteinbezogen, [sondern][...] 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund des nachwachsenden Rohstoffs lediglich nachrichtlich ausgewiesen werden).

CRF-Kategorie	KSG-Sektor	UNFCCC / Governance-VO	Kommentar
1.A.4.c Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei	Landwirtschaft	GHD	Energiebedingte Emissionen
1.A.5 Andere Bereiche	Gebäude	GHD	Militär (stationär und mobil)
1.B Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	Energiewirtschaft	Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	
1.D.1 Internationaler Luftverkehr und Hochseeschifffahrt	Keiner	Keiner	
2 Industrieprozesse	Industrie	Industrieprozesse und Produktverwendung	Einschließlich Produktverwendung
3 Landwirtschaft	Landwirtschaft	Landwirtschaft	Biologisch-chemische Emissionen
4 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft	Landnutzung und Forstwirtschaft	LULUCF	
5 Abfall und Abwasser	Abfallwirtschaft und Sonstiges	Abfallwirtschaft	Abfallverbrennung ist in Energiewirtschaft und Industrie enthalten

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

„[Tabelle 8] zeigt zur Erläuterung, wie sich die deutschen Treibhausgasemissionen im Basisjahr 2018 auf die im KSG definierten Sektoren verteilen und aus welchen Inventarkategorien sich die Sektoren zusammensetzen. Insgesamt betragen die Treibhausgasemissionen im Basisjahr 858,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq<sup>8</sup>. Davon entfielen 146,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf nicht-verbrennungsbedingte Emissionen und 711,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf verbrennungsbedingte Emissionen“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Tabelle 8: Zusammensetzung der Treibhausgasemissionen der im Klimaschutzplan aufgeführten Sektoren (Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) im Basisjahr 2018**

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

<sup>8</sup> Die Emissionen im Basisjahr 2018 wurden dem deutschen Treibhausgasinventar mit Datenstand 18. März 2020 entnommen. Diese Emissionen wurden als Basis für die Projektionen verwendet. Das Treibhausgasinventar wird jährlich aktualisiert; durch Rückrechnungen kann es zu Unterschieden zwischen den Inventaren kommen, die 2020 bzw. in den Folgejahren veröffentlicht werden.

	Verbrennungsbedingte Emissionen				Nicht-verbrennungsbedingte Emissionen		Summe
Sonstige					9,7	5	9,7
<b>Summe</b>	<b>711,8</b>				<b>146,6</b>		<b>858,3</b>

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

### 3.2 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektionen

„Die Erstellung der [Emissions]projektionen [...] für die (deutschen) Treibhausgasemissionen bis 2040 erfolgt auf der Basis von [...] im Rahmen der Erstellung des Projektionsberichts 2021 mit] den Ressorts abgestimmten Annahmen zur

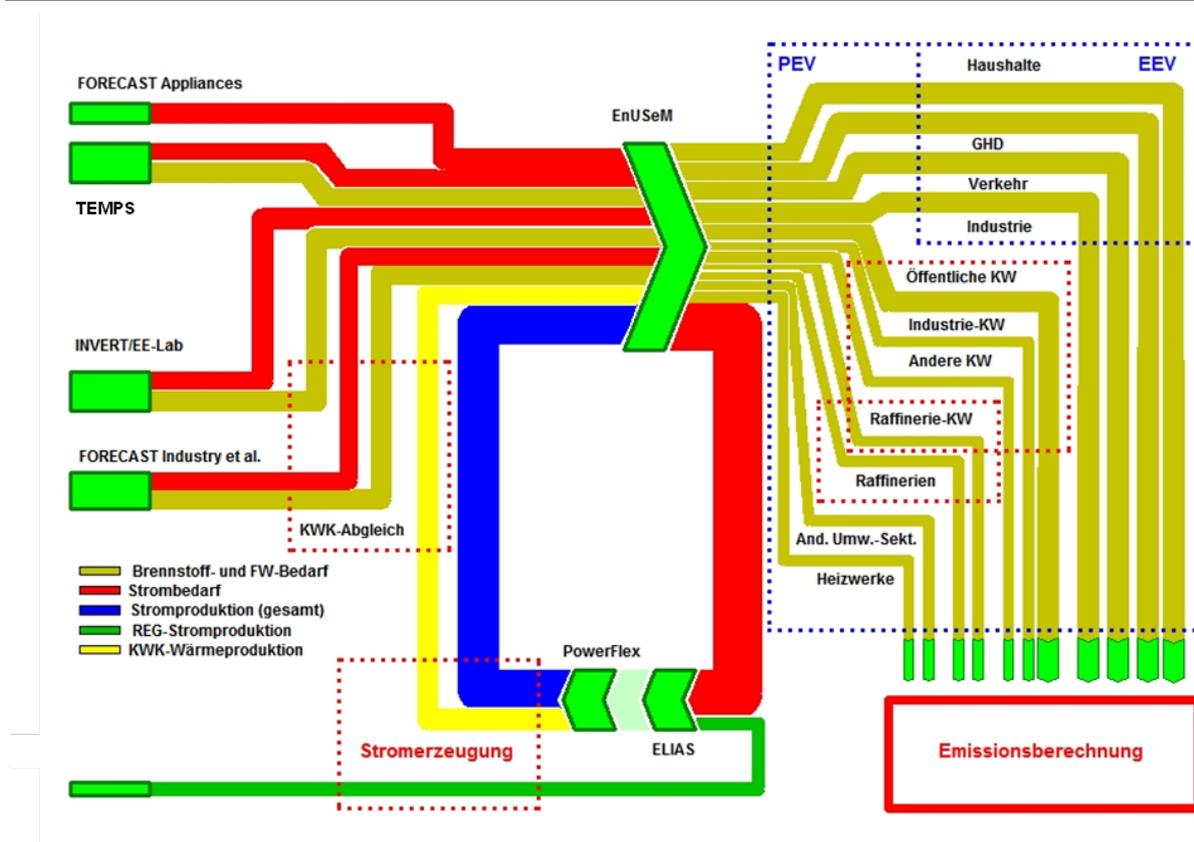
- ▶ *Bevölkerungsentwicklung,*
- ▶ *Wirtschafts- und Wirtschaftsstrukturentwicklung,*
- ▶ *Energiepreisentwicklungen [...] sowie*
- ▶ *technische und sektorspezifische Faktoren“* (Öko-Institut et al. 2021).

Die anzusetzenden Klimaschutzinstrumente und -maßnahmen wurden für das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts 2021 ebenfalls mit den Ressorts abgestimmt. Für das Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) sowie die BEHG-Sensitivität wurden die Klimaschutzinstrumente und -maßnahmen zwischen Auftragnehmer einerseits und Umweltbundesamt und BMU andererseits abgestimmt (Abschnitt 3.5).

Grundsätzlich erfolgt die Modellierung instrumentengetrieben. D.h. es werden stets klimapolitische Reformschritte spezifiziert beispielsweise bei Gesetzen, Regulierungen, ökonomischen Instrumenten (z. B. CO<sub>2</sub>-Bepreisung) oder bei den vorgesehenen Haushaltsmitteln. 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. Vor allem bei der Ableitung der Instrumentierung des KIS-2030 lagen jedoch z.T. nur unzureichende Angaben in Bezug auf die Ausgestaltung und Parametrisierung vor (insbesondere bei Vorgaben aus dem Koalitionsvertrag). In diesen Fällen wurde maßnahmengetrieben modelliert, beispielsweise durch Annahme einer installierten Leistung von Photovoltaik-Anlagen von 200 GW im Jahr 2030 oder zur Waldentwicklung.

Neben quantifizierbaren Instrumenten gibt es flankierende Instrumente. Flankierende Instrumente unterstützen die Umsetzung quantifizierbarer Instrumente. So können beispielsweise durch Beratungsnetzwerke informatorische Hemmnisse bei Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümern behoben werden und die Qualität energetischer Sanierungen verbessert werden (Abschnitt 8.3.3.1.13). Die Instrumentenwirkung wird dabei dem quantifizierbaren Instrument zugeordnet.

„Die Analyse und Bewertung der verschiedenen [Instrumente und] Maßnahmen, die Ermittlung der entsprechenden sektoralen Treibhausgasemissionen sowie der notwendigen Hintergrundinformationen und -indikatoren für diesen Bericht folgen für die verschiedenen Sektoren unterschiedlichen methodischen Ansätzen bzw. basieren auf unterschiedlichen Modellinstrumentarien, die für die verschiedenen Bereiche auf Basis der verfügbaren Daten und Informationen eine adäquate Analyse erlauben“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Abbildung 3: Modellübersicht zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen**

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

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

- Die Stromerzeugung auf Basis fossiler Energieträger sowie die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird mit dem PowerFlex-Modell<sup>9</sup> des Öko-Instituts analysiert (Abschnitt [6.1.2]). Die Wärmeerzeugung von KWK-Anlagen wird in diesem Modell ebenfalls modelliert.
- Die Integration des Mengengerüsts für den Endenergieverbrauch (EEV), die Ermittlung des Primärenergieverbrauchs (PEV) sowie des Energieeinsatzes in den anderen Umwandlungssektoren wird mit dem Integrationsmodell ENUSEM des Öko-Instituts durchgeführt (Kapitel 13 und 14).
- Für den Verkehrsbereich erfolgt die Modellierung mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts (Abschnitt [9.2]).
- Für den Gebäudesektor (im Bereich der Wohn- und Nichtwohngebäude) wird das Modell INVERT/EE-Lab von IREES eingesetzt. Die Abschätzung der Wirkung einzelner Politikinstrumente erfolgt durch das Öko-Institut anhand bestehender Evaluationen oder Auswertungen der entsprechenden Instrumente (Abschnitt [8.3.1]).
- Analysen für den verbleibenden Brennstoff- und Strombedarf im Sektor Gebäude werden unter der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI durchgeführt (Abschnitt 8.4.1)].

<sup>9</sup> Die Kraftwerksstilllegung wird auf Basis des Stilllegungsmoduls des Modells ELIAS durchgeführt.

- f) Die Analysen für den Strom- und Brennstoffbedarf der Sektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistung erfolgen unter der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI, die auf einzelnen Sektormodellen beruht (Abschnitte [7.1.2] und [8.5.1]).
- g) Die Emissionsermittlung für die Treibhausgasemissionen aus Verbrennungsprozessen erfolgt mit dem Emissionsmodell des Öko-Instituts, das die in ENUSEM aggregierten Energiebedarfsprojektionen für die verschiedenen Endverbrauchs- und Umwandlungssektoren in der Systematik der Nationalen Treibhausgasemissionen emissionsseitig bewertet (Abschnitt 3.3).

Für die flüchtigen Emissionen des Energiesektors erfolgt eine quellgruppenspezifische Modellierung auf Basis des Mengengerüsts für die Energienachfrage und -bereitstellung sowie den für das Nationale Treibhausgasinventar genutzten Methoden (Abschnitt [6.3.2]).

Für die Emissionen aus Industrieprozessen werden die folgenden Ansätze verfolgt:

- a) Prozessbedingte Emissionen der mineralischen Industrie und der chemischen Industrie (mit Ausnahme der petrochemischen Industrie) werden mit Hilfe des Modells FORECAST modelliert.
- b) Für die restlichen prozessbedingten Emissionen mit Bezug zum Energiesektor werden die Emissionen auf Basis des Mengengerüsts für die Energienachfrage und -bereitstellung im Emissionsmodell ENUSEM des Öko-Instituts mit den für das Nationale Treibhausgasinventar verwendeten Methoden ermittelt (Abschnitt [7.4.1]).
- c) Für die verbleibenden prozessbedingten Emissionen ohne Bezug zum Energiesektor werden die Emissionen auf der Basis von Produktionsschätzungen im Emissionsmodell ENUSEM des Öko-Instituts in Anlehnung an die für das Nationale Treibhausgasinventar verwendeten Methoden ermittelt (Abschnitt [7.4.1]).
- d) Für die HFKW-, FKW-, SF<sub>6</sub>- und NF<sub>3</sub>-Emissionen werden vorliegende Projektionen aktualisiert und angepasst (Abschnitt [7.5.1]).

Die Projektionen der Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft [(Kapitel 10)] in Bezug auf landwirtschaftliche Böden, Nutztierhaltung und Sonstiges werden [für das MMS] vom Thünen-Institut [und für das KIS-2030 vom Öko-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 [für das MMS] vom Thünen-Institut [und für das KIS-2030 vom Öko-Institut] berechnet (Kapitel 12).

Für die Treibhausgasemissionen aus der Abfallwirtschaft wird das für die Erstellung nationaler Treibhausgasinventare verwendete IPCC Waste Model des Öko-Instituts für die Projektion verwendet (Abschnitt [11.2]).

Die Berechnungen der Szenarien in diesem Bericht sind in großem Maß vom nationalen Treibhausgasinventar abhängig. Das aktuelle zum Zeitpunkt der Berechnung [...] [des MMS des Projektionsberichts 2021] verfügbare Treibhausgasinventar ist aus dem Berichtsjahr 2020 (UBA 2020a) und wurde unter Anwendung der 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC 2006a) unter Verwendung von Treibhausgaspotentialen gemäß den aktuellen Inventar-Berichterstattungsrichtlinien (UNFCCC 2013) erstellt. Es enthält Daten für die Jahre 1990 bis 2018. Die primären Datenquellen zur Erstellung dieses Berichts sind die historischen Daten im Treibhausgasinventar (UBA 2020a) sowie eine zu diesem Inventar konsistente Datenauspielung aus dem Zentralen System Emissionen (ZSE) im Umweltbundesamt (UBA 2020d). Das Treibhausgasinventar ist nicht vollständig kompatibel mit den Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland (u.a. teilweise andere Sektordefinitionen und Brennstoffaggregationen). Daher kommt es teilweise zu Diffe-

renzen gegenüber der Energiebilanz. Im Treibhausgasinventar sind nur Aktivitätsdaten zu brennstoffförmigen Energieträgern enthalten. Als primäre Datenquelle für nichtbrennstoffförmige Energieträger dienen die Energiebilanzen<sup>10</sup> (Öko-Institut et al. 2021).

### 3.3 Ergebnisintegration

„Wie in Abschnitt 3.2 ausgeführt, wird der Energiebedarf einzelner Sektoren mit Hilfe von sektorspezifischen Modellen bestimmt. Für einzelne Sektoren werden auch die Treibhausgasemissionen separat modelliert. Im Folgenden wird die Ergebnisintegration beschrieben, d.h. die Modellierung des gesamten Energiebedarfs und der gesamten Treibhausgasemissionen anhand der Resultate der einzelnen Modelle.

In Abbildung 4 sind die sektorspezifischen Modelle sowie die Elemente des Modells ENUSEM dargestellt, das zur Integration der Ergebnisse verwendet wird. Die gelb dargestellten Energiemodelle liefern den Energiebedarf verschiedener Subsektoren (Verkehr, Energiebedarf der Landwirtschaft, Gebäude und Industrie). Dieser Energiebedarf wird u.a. durch Stromerzeugung und Wärmeerzeugung von KWK-Anlagen gedeckt; dies wird mit Hilfe des Modells PowerFlex modelliert.

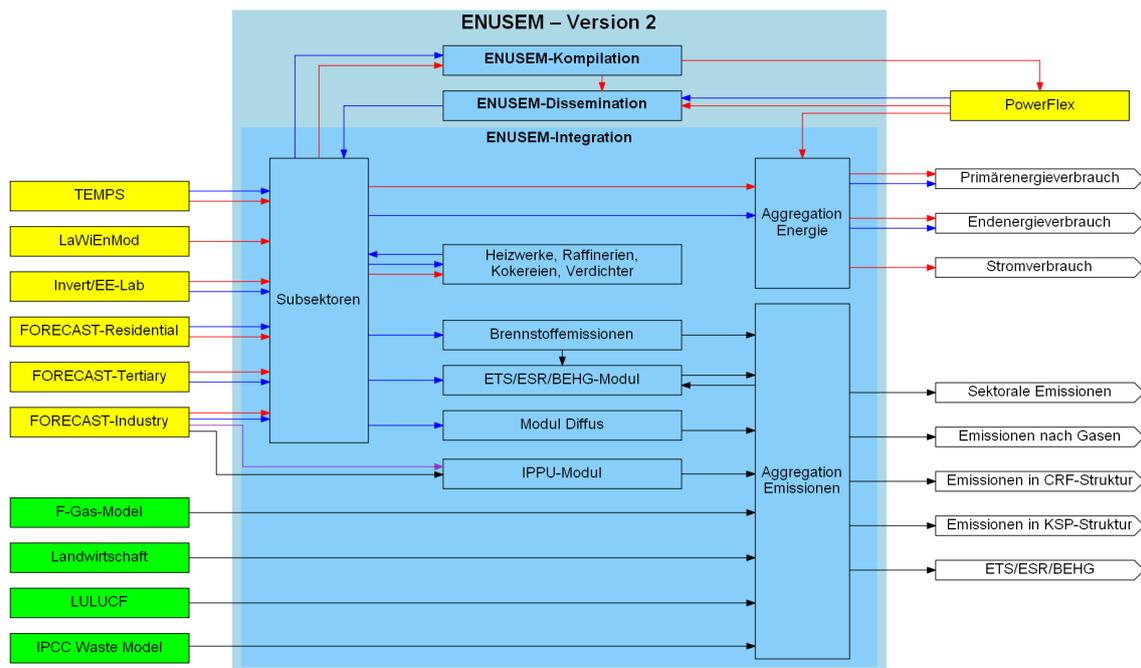
Das Modell Powerflex liefert als Resultat den Bedarf an Brennstoffen für die Strom- bzw. Wärmeerzeugung. Aus diesem Bedarf und aus dem Bedarf nach Energieträgern in andere Sektoren werden im Modell ENUSEM die bei der Nutzung dieser Energieträger entstehenden Emissionen berechnet. Je nach Brennstoff und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

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

Die in Abbildung 4 grün dargestellten Modelle liefern anstelle des Energiebedarfs direkt die im entsprechenden Sektor entstehenden Emissionen. In ENUSEM werden die Emission aggregiert und können in unterschiedlichen Darstellungen abgerufen werden, nach Sektoren oder Gasen. ENUSEM liefert auch den gesamten Primärenergie-, Endenergie- und Stromverbrauch.“ (Öko-Institut et al. 2021).

---

<sup>10</sup> Siehe auch Abschnitte 13.1 und 14.1.

**Abbildung 4: Integrationsmodell ENUSEM und Interaktion mit den Sektormodellen**

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

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

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

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

Für die Berechnung von Emissionen in Treibhausgasäquivalenten werden in Konsistenz mit dem Treibhausgasinventar die Treibhauspotentiale aus dem 4. IPCC Assessment Report (AR4) genutzt.

### 3.4 Berücksichtigung der Corona-Pandemie in den Projektionen

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

Des Weiteren wurden die Modellierungsarbeiten für den Projektionsbericht [2021] im vierten Quartal 2020 begonnen und gegen Ende des ersten Quartals 2021 fertiggestellt. Dies bedeutet, dass die Berichterstattung für das Jahr 2020 erst nachträglich im Jahr 2021 erfolgt[e]. [Die Modellierung des KIS-2030 basierte wiederum auf dem Basisjahr und den Rahmendaten des Projektionsberichts 2021].

Die Effekte der Corona-Pandemie wurden bei der Modellierung im Wesentlichen auf zwei Arten berücksichtigt. Zum einen berücksichtigen wesentliche Rahmendaten die Effekte der Pandemie. So geht die angesetzte Wirtschaftsentwicklung von einem starken Einbruch im Jahr 2020 und einer schnellen Erholung im Jahr 2021 aus [(Kapitel 4)]. Die wirtschaftliche Entwicklung wirkt sich auf die Bruttowertschöpfung aus, die 2020 ebenfalls einen Einbruch verzeichnete (Abschnitt [7.2.2]). Über die Verknüpfung der Modelle (Abschnitt 3.2) kommt es so ebenfalls zu Effekten in anderen Sektoren. So führt eine geringere Bruttowertschöpfung zu einer geringeren Stromnachfrage der Industrie, was sich wiederum auf die Emissionen von Kraftwerken in Energiewirtschaft und Industrie auswirkt. Zum anderen wurde speziell zur Abfederung der Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Wirtschaft im Sommer 2020 ein Konjunkturprogramm auf den Weg gebracht. Die damit verbundenen Maßnahmen werden bei der Modellierung berücksichtigt und wirken sich so auf die projizierten Treibhausgasemissionen aus.

Aufgrund der genannten Herausforderungen wurden für diesen Bericht als Quelle für die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 in den Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr und Abfallwirtschaft die Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2021b) herangezogen. Es handelt sich dabei um die aktuellen verfügbaren Emissionsdaten für das Jahr 2020 zum Zeitpunkt der Veröffentlichung [des Projektionsberichts 2021]. Für die Vorjahresschätzung werden sämtliche bis Ende Februar eines Jahres vorliegenden statistischen Daten verwendet. Neben den Daten zum Primärenergieverbrauch werden auch Zusatzinformationen wie Produktionszahlen und meteorologische Daten herangezogen und Fachleute befragt. Angaben zu den verwendeten Datenquellen und Methoden in den einzelnen Quellgruppen sind in UBA (2020a) zu finden. Wo die Vorjahresschätzung für das Jahr 2020 angesetzt wurde, wurde dies jeweils unter der Tabelle in Form einer Anmerkung kenntlich gemacht. Da die Daten der Vorjahresschätzung nicht in gleicher Detailtiefe vorliegen wie für historische Jahre bzw. wie für Modellierungsjahre, wurde in der relevanten Berichterstattungsdatei [des Projektionsberichts 2021]<sup>11</sup> z.T. „NE“ (not estimated) ausgewiesen“ (Öko-Institut et al. 2021).

## 3.5 Modellierte Szenarien und Sensitivitäten

### 3.5.1 MMS

„Das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) für den Projektionsbericht 2021 beinhaltet alle Klimaschutzinstrumente- und maßnahmen, die bis zum Stichtag 31. August 2020 bereits beschlossen und soweit implementiert waren, dass alle Daten und sonstigen Informationen, die für die Parametrisierung der Maßnahme erforderlich sind, zu Modellierungsbeginn vorlagen. Die Parametrisierung der Maßnahmen wurde mit den Ressorts abgestimmt. Das MMS beinhaltet damit neben schon länger gültigen – vor allem regulatorischen und ökonomischen – Instrumenten insbesondere die Maßnahmen des am 3. Dezember 2014 von der Bundesregierung beschlossenen Aktionsprogrammes Klimaschutz 2020 (APK 2020), das auch die Maßnahmen des Nationalen Aktionsplanes Energieeffizienz (NAPE) beinhaltet, als auch die Maßnahmen des Klimaschutzprogrammes 2030 (KSP 2030), das am 9. Oktober 2019 beschlossen wurde. Hinzu kommen einzelne zusätzliche Maßnahmen aus der am 18. Dezember 2019 vom Bundeskabinett verabschiedeten Energieeffizienzstrategie 2050

<sup>11</sup> Template 1a.

*(EffSTRA), die über die Maßnahmen des Klimaschutzprogrammes 2030 hinausgehen, sowie die THG-relevanten Maßnahmen aus dem Konjunkturprogramm der Bundesregierung vom 3. Juni 2020.*

*Es werden sowohl sektorübergreifende als auch sektorale Maßnahmen berücksichtigt. Die Quantifizierung der Wirkung sektorübergreifender Maßnahmen erfolgt weitgehend auf sektoraler Ebene. Außerdem werden auf beiden Ebenen auch eine Reihe flankierender Maßnahmen berücksichtigt, insbesondere Instrumente informatorischer Art. Diese gehen zwar in die Szenarien ein, ihre Wirkung wird jedoch nicht separat quantifiziert, sondern über die Wirkung anderer – in der Regel ökonomischer oder regulatorischer Instrumente – quantifiziert, deren Wirkung sie unterstützen“ (Öko-Institut et al. 2021).*

### **3.5.2 KIS-2030**

Aufbauend auf dem MMS wurde ein Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) erarbeitet, dessen politische Klimaschutzinstrumente eine Erreichung des Treibhausgasminderungszieles von 65 % im Jahr 2030 ermöglichen sollten. Zur Abstimmung der zu berücksichtigenden Instrumente wurden mit UBA und BMU<sup>12</sup> mehrere sektorale Webinare durchgeführt, in denen die Auswahl, Ausgestaltung und Parametrisierung der Instrumente abgestimmt wurde.

Darüber hinaus gab es sektorübergreifende Abstimmungen. Hier wurden zum einen übergreifende Instrumente entwickelt und deren Parametrisierung festgelegt (Abschnitt 5.1). Zum anderen wurden Modellübergaben abgestimmt, sodass eine sektorübergreifende Zielerreichung sichergestellt und vorgegebene Leitplanken eingehalten werden konnte. So wurden vorläufige Abschätzungen der Stromnachfrage aus den Sektoren mit der Modellierung der Stromerzeugung abgestimmt, sodass die Zielerreichung in der Energiewirtschaft (und der Industrie) bei steigender Stromnachfrage in den Endverbrauchssektoren sichergestellt werden konnte. Gleichermaßen wurden die sektoralen Biomassebedarfe abgestimmt und mit dem zur Verfügung stehenden Angebot abgeglichen. Diese Abstimmungen erfolgten iterativ. Sofern die Zielerreichung in einem Sektor gefährdet war, musste die Parametrisierung in den Sektoren entsprechend angepasst werden. So konnte beispielsweise einer möglichen Zielverfehlung in der Energiewirtschaft durch den Ausbau zusätzlicher erneuerbarer Energien oder durch zusätzliche Instrumente zur Begrenzung der Stromnachfrage in den Endverbrauchssektoren begegnet werden.

Die Berechnungen begannen im Herbst 2021 und wurde im Januar 2022 abgeschlossen. Vorgaben des Koalitionsvertrages von SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP vom 24. November 2021 (SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP 2021) konnten aufgrund zeitlicher Einschränkungen nur noch teilweise bei der Modellierung berücksichtigt werden. Insbesondere aufgrund der in die Modellierung übernommenen ambitionierten Ausbauziele der erneuerbaren Energien kommt es im Jahr 2030 zu einer Übererfüllung des Klimaschutzzieles.

Die in der Eröffnungsbilanz des Bundesministers für Wirtschaft und Klimaschutz am 11. Januar 2022 angekündigten gesetzlichen Maßnahmen haben keine Berücksichtigung mehr gefunden.

In den Sektoren Landwirtschaft und LULUCF wurde die Modellierung im MMS vom Thünen-Institut durchgeführt (Öko-Institut et al. 2021). Im KIS-2030 wurden diese beiden Sektoren vom Öko-Institut modelliert. Die methodischen Änderungen sowie deren Auswirkungen auf die Ergebnisse sind in den Kapiteln 10 und 12 beschrieben.

<sup>12</sup> Ressortbezeichnung zum Zeitpunkt der Abstimmung der Instrumente.

### **3.5.3 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

In einer Sensitivitätsrechnung wurde ermittelt, welche Treibhausgasemissionen sich ergeben würden, sofern der CO<sub>2</sub>-Preis des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) dem im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) angenommenen (niedrigeren) Preispfad entsprechen würde. Eine Erreichung der Klimaschutzziele für das Jahr 2030 wurde entsprechend nicht vorausgesetzt. Die berücksichtigten Instrumente und deren Parametrisierung entsprechen denen im KIS-2030.

## 4 Rahmenannahmen

Für den Projektionsbericht 2021 wurden allgemeine Rahmendaten mit den Bundesressorts abgestimmt. Dieses Rahmendatenset wurde auch für das KIS-2030 verwendet. Die Rahmendaten betreffen die Entwicklung demographischer und gesamtwirtschaftlicher Parameter, die Entwicklung der Primärenergiepreise, die ETS- und BEHG-Preise sowie Preise für grünen Wasserstoff. Details zur Herleitung der Annahmen können dem Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) entnommen werden

Die ETS-CO<sub>2</sub>-Preise wurden für das KIS-2030 angepasst. Die Herleitung der Preise findet sich im Kapitel zu den übergreifenden Instrumenten (Abschnitt 5).

Als wichtiges neues Element ist der Preis für importierten grünen Wasserstoff (frei Kraftwerk) hinzugekommen. Die angenommenen Preise orientieren sich an folgenden Annahmen für Stützjahre: Zwischen den Stützjahren wurden die Werte interpoliert. Bis 2025 werden grüne Wasserstoff-Importe absehbar nicht in nennenswerten Mengen zu Verfügung stehen. Importe ab 2025 stellen eine sehr optimistische Annahme dar (siehe dazu Matthes et al. (2021)). Den Berechnungen liegen folgende Annahmen zu Grunde: Investitionskosten von 700 €/kW, 5 % WACC, 3 % fixe Betriebskosten bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren; 2.000 Betriebsstunden pro Jahr bei Strombezugskosten von 27 €/MWh, einem Wirkungsgrad der Anlage von 65 % und keine weiteren Belastungen durch weitere Abgaben. Der Wert für 2030 wird in der Wasserstoffstrategie 2.0 (Matthes et al. 2021) als Zielmarke für ein durch Skalierung der Technologien zu erreichendes Niveau genannt. Der Wert für 2040 ist eine erste Abschätzung, da hier auf Grund der dynamischen Entwicklungen keine robusten Abschätzungen vorgenommen werden können. Die Transportkosten wurden mit dem für den pipelinegebundenen Gastransport frei Anlage üblichen Wert von 4 €/MWh (H<sub>u</sub> Erdgas) berechnet und um das Volumenverhältnis von Erdgas und Wasserstoff angepasst.

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die wichtigsten Rahmendaten, die für die Modellierung des KIS-2030 verwendet werden.

**Tabelle 9: Überblick über verwendete Rahmendaten (PB 2021 (MMS), KIS-2030)**

	Einheit	2019	2020	2025	2030	2035	2040
<b>Wohnbevölkerung</b>	Mio.		83,2	83,6	83,8	83,8	83,5
<b>Bruttoinlandsprodukt</b>	Mrd. €(2016)	3.275	3.094	3.228	3.310	3.343	3.377
<b>Primärenergiepreise</b>							
Rohöl	€(2016)/GJ	9,4	5,9	10,3	11,1	11,8	12,4
Steinkohle	€(2016)/GJ	2,4	1,9	2,2	2,4	2,4	2,3
Erdgas	€(2016)/GJ	5,6	4,5	6,0	6,7	7,1	7,4
<b>ETS-CO<sub>2</sub>-Preis (MMS)</b>	€(2016)/EUA	24,1	22,9	25,0	30,0	40,0	53,0
<b>ETS-CO<sub>2</sub>-Preis (KIS-2030)</b>	€(2016)/EUA	24,1	22,9	82,0	115,0	160,0	225,0
<b>BEHG-CO<sub>2</sub>-Preis(MMS)</b>	€(2016)/t CO <sub>2</sub>			50	109	165	220
<b>BEHG-CO<sub>2</sub>-Preis (KIS-2030)</b>	€(2016)/t CO <sub>2</sub>			91	208	281	346
<b>Grüner Wasserstoff (frei Anlage)</b>	€(2016)/GJ			33	31	27	22

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021; Matthes et al. 2021)

Das inländisch verfügbare energetische Biomasseangebot ist begrenzt<sup>13</sup>. Die tatsächliche Höhe ist abhängig von der Verfügbarkeit und der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen, aber auch von der Nutzung von Anbaubiomasse auf landwirtschaftlichen Nutzflächen und der Nutzung von Waldholz. Im KIS-2030 wurden Rahmenbedingungen für den Einsatz von Biomasse festgelegt. Dazu zählten unter anderem:

- ▶ Rückgang der Anbaubiomasse ggü. 2018 auf landwirtschaftlichen Nutzflächen durch geänderte Nutzungsansprüche wie Ausweitung der ökologischen Vorrangflächen, Moorwiedervernässung und die Ausweitung des Ökolandbaus
- ▶ Erfüllung der Senkenziele im LULUCF-Sektor
- ▶ Verstärkte Nutzung von Abfall- und Reststoffpotenzialen (z. B. Gülle, Stroh, Bioabfälle). Es wird vorausgesetzt, dass die Erschließung der Potenziale im KIS-2030 möglich ist.<sup>14</sup>
- ▶ Import von Biokraftstoffen zulässig, Nachfrage nach Biokraftstoffen darf Niveau des MMS nicht überschreiten
- ▶ Holz-Importe weiterhin zulässig, Nachfrage soweit wie möglich beschränken
- ▶ Maximale Reduktion der Biomassenachfrage in den Sektoren

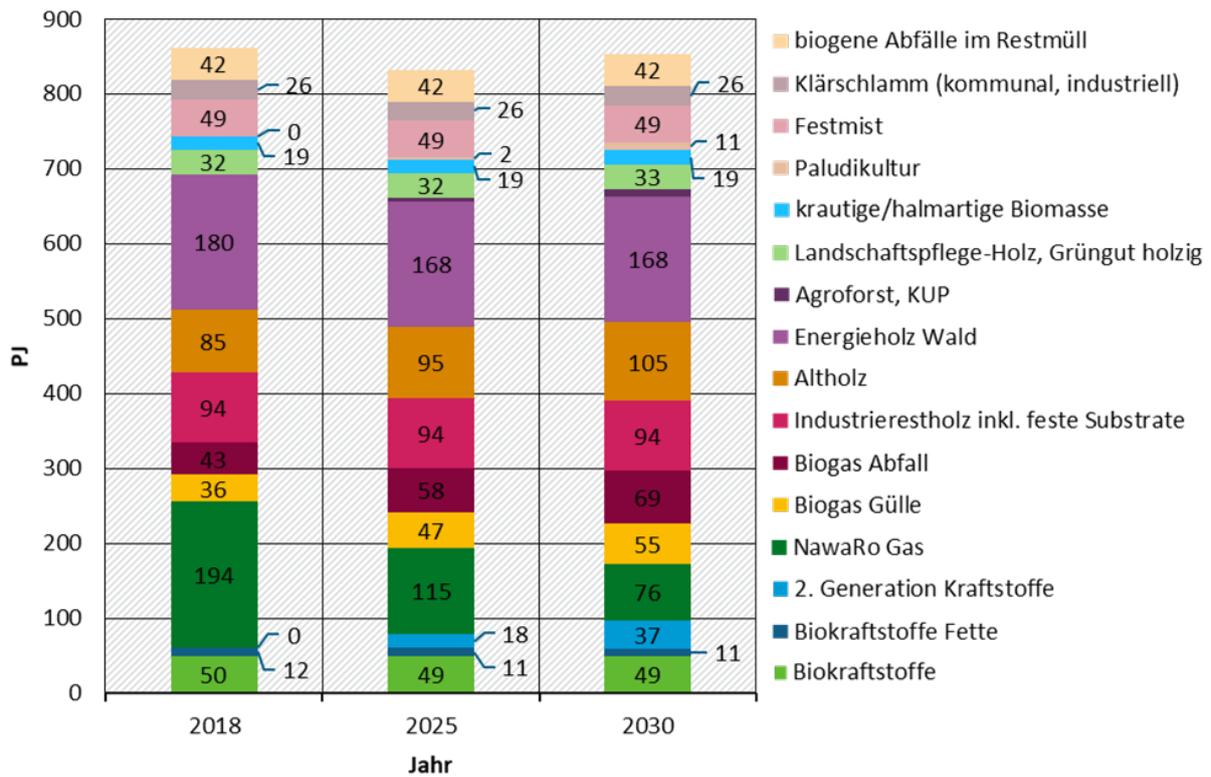
Basierend auf den Vorgaben wurde eine verfügbare Einsatzmenge von inländisch erzeugter Biomasse ermittelt. Bis zum Jahr 2030 sinkt das inländisch Biomasseangebot geringfügig ggü. 2018 (-5 %). Vor allem die inländische Energieerzeugung aus Anbaubiomasse (z. B. Biogas Nawaro) und Energieholz aus dem Wald ist rückläufig (ca. -130 PJ), während durch den Ausbau der Reststoffnutzung (Biogas Gülle, Stroh für 2. Generation-Biokraftstoffe) und der Zunahme der Bioabfallvergärung (Biogas Abfall) ca. 63 PJ dazu kommen. Durch die Nutzung von umweltverträglicheren Anbauformen wie den Paludikulturen (nasse Nutzung von Moorstandorten) und Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) werden weitere 20 PJ bis 2030 erzeugt. Bei den übrigen Biomassen, bei denen es sich v.a. um Reststoffe aus der Landschaftspflege und Landwirtschaft handelt, gibt es keine nennenswerten Veränderungen zwischen den betrachteten Jahren. Insgesamt sinkt die Anbaufläche für Energiepflanzen von heute ca. 2,4 Mio. ha auf 1,5 Mio. ha im Jahr 2030. Die festen Reststoffe und Abfälle umfassen Altholz, Industrieholz, Landschaftspflege, Siedlungsabfall etc.). Dieser Stoffstrom zeigt einen geringfügigen Anstieg ggü. heute.

Abbildung 5 zeigt das inländisch verfügbare Biomasseangebot in Form der entsprechenden Energieträger in den Jahren 2018, 2025 und 2030.

<sup>13</sup> Die Nutzung von stofflicher Biomasse wurde in diesem Szenario nicht berücksichtigt.

<sup>14</sup> Maßnahmen, die zur Erschließung der Reststoffpotenziale nötig sind, wurden im Rahmen des KIS-2030 nicht genauer betrachtet. Folgende Überlegungen liegen zugrunde: Güllevergärung wird als Emissionsvermeidungsmaßnahmen in entsprechender Höhe angestrebt und gefördert; die Strohnutzung findet im KIS-2030 ausschließlich als Biokraftstoff statt, wobei hier die größten Unsicherheiten in Bezug auf die Erschließung des Potenzials bestehen. Fehlende Mengen können ggf. über Importe ausgeglichen werden. Bioabfälle unterliegen dem Kreislaufwirtschaftsgesetz und müssen seit 2015 getrennt erfasst und verwertet werden. Die Vorgabe ist derzeit noch nicht komplett umgesetzt, daher sind weitere Steigerungsraten zu erwarten.

**Abbildung 5: Inländisches Biomasseangebot im KIS-2030 zur energetischen Nutzung**



Anmerkung: Die Darstellung berücksichtigt bereits Umwandlungsverluste bei Biokraftstoffen und Kraftstoffen der 2. Generation. Es wird jeweils der Heizwert der Rohbiomasse (Festbrennstoff aus Paludikulturen, KUP, Energieholz Wald) angegeben, bei der Vergärung des Biogases. Eine Aufbereitung zu höherwertigen Energieträgern z. B. Biomethan oder Pellets (aus KUP oder Paludikulturen) wird nicht berücksichtigt.

Krautige/halmartige Biomasse umfasst Landschaftspflege-Halm, Grüngut-krautig und Ernterückstände.

Quelle: eigene Berechnung Öko-Institut auf Basis von FNR (2020) und UBA (2019).

## 5 Übergreifende Instrumente und deren Parametrisierung

### 5.1 KIS-2030

#### 5.1.1 Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung

Mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) und der ebenfalls beschlossenen Senkung der EEG-Umlage, die u.a. durch Einnahmen aus dem BEHG finanziert werden soll, wurde bereits eine erste Umgestaltung der staatlich bestimmten Energiepreisbestandteile eingeleitet. Diese beiden Elemente werden im Mit-Maßnahmen-Szenario des Projektionsberichts 2021 berücksichtigt. Zielrichtung einer umfassenderen Reform ist eine weitere Senkung der Umlagen, Steuern und Abgaben auf Strom bei gleichzeitiger Erhöhung der Belastung von fossilen Energieträgern. Damit soll die Wettbewerbsfähigkeit strom- und wasserstoffbasierter Techniken gegenüber den fossilen Technikoptionen weiter erhöht werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass im Falle niedrigerer Strompreise der Anreiz für Stromeinsparungen sinken könnte, wenn sich die Wirtschaftlichkeit von Stromeffizienzmaßnahmen vermindert. Ob es in der Gesamtbetrachtung in einigen Sektoren (Haushalte, GHD, Industrie) zu einer Erhöhung der Treibhausgasemissionen kommt, müssten weitergehende Analysen zeigen.

Im Folgenden wird ein solcher Ansatz durch ein Bündel von Reformvorschlägen für einzelne Preiskomponenten umgesetzt.

##### 5.1.1.1 Anpassung der Preise im BEHG

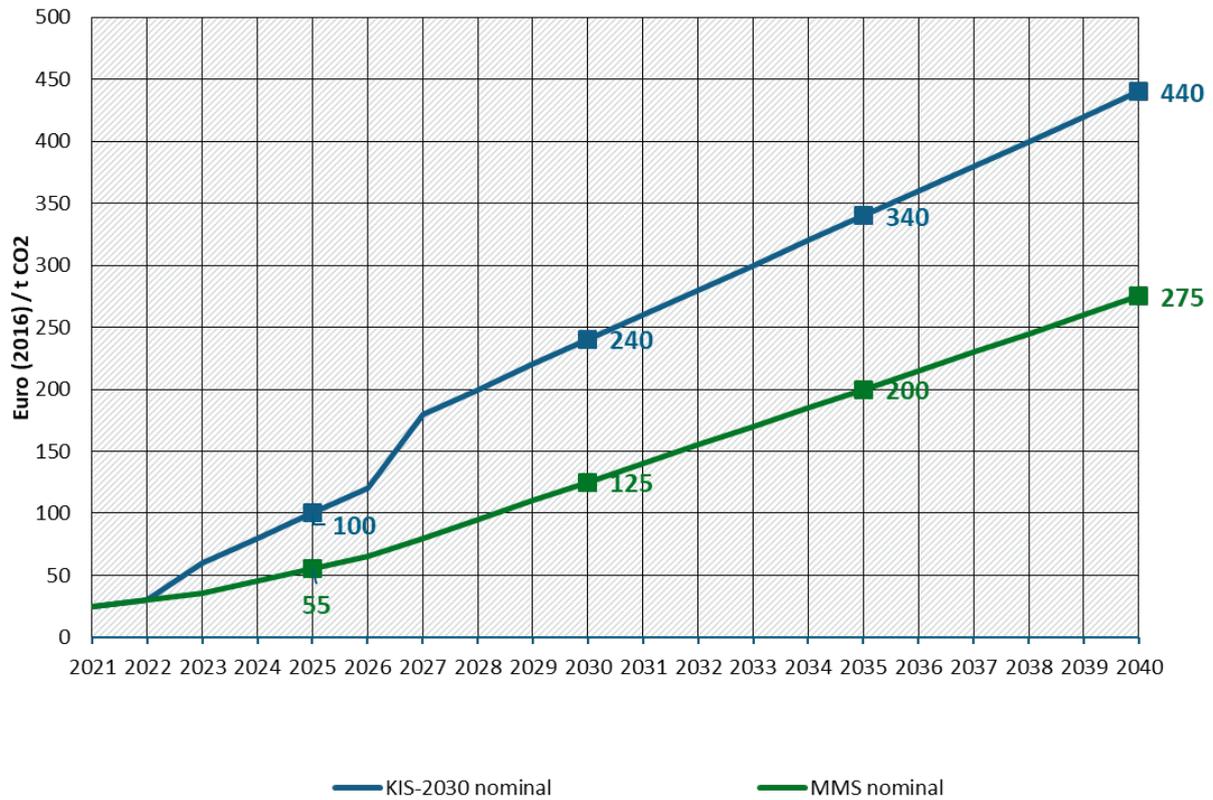
###### Reformvorschlag

Eine Komponente der weiteren Erhöhung der Preise für fossile Brennstoffe ist ein höherer CO<sub>2</sub>-Preis im BEHG.

###### Parametrisierung

Für die Modellierung des Hauptszenarios des KIS-2030, welches die Zielerreichung des KSG sicherstellen soll, wird ein höherer Preispfad für das BEHG angenommen als im MMS. Dieser ist in Abbildung 6 und Tabelle 10 dargestellt. Die Quantifizierung der Wirkung erfolgt in den einzelnen Sektoren, da die jeweiligen Treibhausgaseminderungs- (und ggf. auch Erhöhungs-) potenziäle unterschiedlich sind und auch vom Umfang der jeweiligen Ausnahmeregelungen abhängen. Zusätzlich wird noch eine Sensitivität mit dem BEHG-Preis aus dem MMS gerechnet.

**Abbildung 6: Preisfad für das BEHG im KIS-2030 und MMS, 2021-2040**



Quelle: Öko-Institut et al. (2021) für MMS, Modellierungsannahmen für KIS-2030

**Tabelle 10: Preisfad für das BEHG im KIS-2030 und MMS, 2021-2040**

Jahr	BEHG-CO <sub>2</sub> -Preis		
	KIS-2030		Zum Vergleich: MMS
	€/t (real) in € <sub>2016</sub>	€/t (nominal)	Euro/t (nominal)
2021	24	25	25
2022	28	30	30
2023	56	60	35
2024	74	80	45
2025	91	100	55
2026	109	120	65
2027	161	180	80
2028	177	200	95
2029	193	220	110
2030	208	240	125
2031	224	260	140
2032	238	280	155

Jahr	BEHG-CO <sub>2</sub> -Preis		
2033	253	300	170
2034	267	320	185
2035	281	340	200
2036	294	360	215
2037	308	380	230
2038	321	400	245
2039	333	420	260
2040	346	440	275

Quelle: Öko-Institut et al. (2021) für MMS, Modellierungsannahmen für KIS-2030

### 5.1.1.2 EEG-Umlage

#### Reformvorschlag

Generelles Ziel im KIS-2030 ist, die EEG-Umlage schrittweise abzuschmelzen und eine (gegenfinanzierte) Finanzierung aus dem allgemeinen Haushalt sicherzustellen. Dies umfasst dezidiert nur den Aspekt der Gegenfinanzierung der Förderkosten; an der Förderung für den EE-Ausbau wird hingegen festgehalten, sodass EE-Anlagen wie bisher vergütet werden. Aufgrund der erheblichen Rückwirkung auf den Ausbau der Erneuerbaren, die Akzeptanz der Energiewende und die Sektorenkopplung wird die EEG-Umlage stufenweise bis zum Jahr 2025 vollständig über den Haushalt finanziert. Im Jahr 2023 sinkt die EEG-Umlage damit auf 4 ct/kWh, im Jahr 2024 auf 2 ct/kWh sowie ab 2025 auf 0 ct/kWh (alle Angaben in nominalen Preisen). Es ist davon auszugehen, dass eine vollumfängliche Gegenfinanzierung bis 2028/2030 allein aus den Einnahmen des BEHG nicht möglich sein dürfte, weshalb zur Schließung der Lücke folgende, als klimaschädlich identifizierte Subventionen reduziert bzw. gestrichen werden:

- ▶ Niveauangleichung Dieselsteuer und Benzinsteuer
- ▶ Dienstwagensteuerprivileg

#### Parametrisierung

Die Modellierung der schrittweisen Senkung der EEG-Umlage erfolgt in den von dem Instrument tangierten Sektoren. Die Modellierung der Reduzierung bzw. Streichung der oben genannten Subventionen erfolgt im Verkehrssektor (siehe Kapitel 9).

### 5.1.1.3 Energiesteuer

#### Reformvorschlag

Die bisherige Befreiung des Elektrizitätssektors von der inputseitigen Besteuerung durch die Energiesteuer läuft aus. Das Niveau der Energiesteuersätze für im Elektrizitätssektor eingesetzte stoffliche Primärenergieträger orientiert sich dabei an der Besteuerung für Heizstoffe. Dadurch werden die Einnahmeausfälle durch die Absenkung der Stromsteuer (StromSt) auf EU-Mindestniveau (Abschnitt 5.1.1.6) kompensiert<sup>15</sup>. Sollte dies nicht ausreichen, werden auch die Steuersätze der übrigen Primärenergieträger angehoben. Zusätzlich erfolgt, bezogen auf den Energie-

<sup>15</sup> Hinweis: Eine Biomassebesteuerung kann im Modell nicht abgebildet werden.

gehalt und die Anwendungsbereiche, ein Angleichen der Energiesteuersätze fossiler Energieträger (insb. Kohle an Gas und Kraftstoffe auf Ottokraftstoff unverbleit). In der konkreten Ausgestaltung beinhaltet das Reformpaket die folgenden Komponenten:

1. Jegliche stoffliche Primärenergieträger werden in den Anwendungsbereich der Energiesteuer aufgenommen.
2. Die Niveaus der Steuersätze werden ab 2024 inflationsbereinigt und die Inflationsbereinigung verstetigt.
3. Für den Einsatz aller fossilen Energieträger in der Stromerzeugung wird stufenweise der auf den Energiegehalt bezogene Energiesteuersatz für den Heizstoff Erdgas in Ansatz gebracht. Die Einführung dieser Energiebesteuerung beginnt 2024, parallel zum Abbau der Stromsteuer. Bis 2027 wird sie auf den dann jeweils geltenden Energiesteuersatz für Erdgas als Heizstoff (inkl. Inflationsindizierung etc.) erhöht.

Damit werden Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz und über eine erhöhte Besteuerung stofflicher Energieträger ein Anreiz zur Elektrifizierung anderer Sektoren gesetzt. Da sich die Energiesteuer am Energiegehalt stofflicher Energieträger (und nicht deren CO<sub>2</sub>-Emissionen) bemisst, wird hiermit keine (zusätzliche) Form der CO<sub>2</sub>-Bepreisung eingeführt.

#### **Parametrisierung**

Die Modellierung der drei oben bereits beschriebenen Ausgestaltungskomponenten erfolgt wiederum in den von dem Instrumentenpaket tangierten Sektoren.

#### **5.1.1.4 Steigerung der Ambition im EU ETS und höherer Zertifikatspreis**

##### **Reformvorschlag**

Der im MMS angenommene Preispfad für Emissionszertifikate im EU ETS ist mit 30 €/EUA im Jahr 2030 zu niedrig, um CO<sub>2</sub>-neutrale Technologien in der Energiewirtschaft und der Industrie wirtschaftlich zu machen:

- ▶ Insbesondere benötigen Investitionen in der Industrie, die auf eine Umstellung von „billigen“ fossilen Energieträgern wie Kohle oder Erdgas hin zu teuren, aber CO<sub>2</sub>-ärmeren Sekundärenergieträgern wie Strom oder Wasserstoff abzielen, deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Preise, um mit den fossilen Verfahren konkurrenzfähig zu sein.
- ▶ Im Stromsektor sorgt ein niedriger CO<sub>2</sub>-Preis dafür, dass die Stromerzeugung aus Kohle mit niedrigeren Grenzkosten verbunden ist als die Stromerzeugung aus Erdgas. Ein Fuel Switch, der hier zu Emissionsminderungen führen würde, fand in der Vergangenheit kaum statt.

Aktuell ist eine dynamische Entwicklung im europäischen Emissionshandelssystem zu beobachten. Nachdem der Preis seit Ende 2020 stabil über 40 € pro Zertifikat notierte, ist er gegen Ende des Jahres 2021 auf über 80 € pro Zertifikat angestiegen. Hintergrund für diese Entwicklung ist unter anderem das ambitioniertere EU-weite Klimaziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 55 % bis 2030 ggü. 1990. Daraus ergibt sich ein höherer CO<sub>2</sub>-Preispfad, durch den strategisch wichtige Vermeidungstechnologien bis zum Jahr 2030 eine klare Perspektive zur Wirtschaftlichkeit haben (um die anspruchsvolleren Ziele zu erreichen).

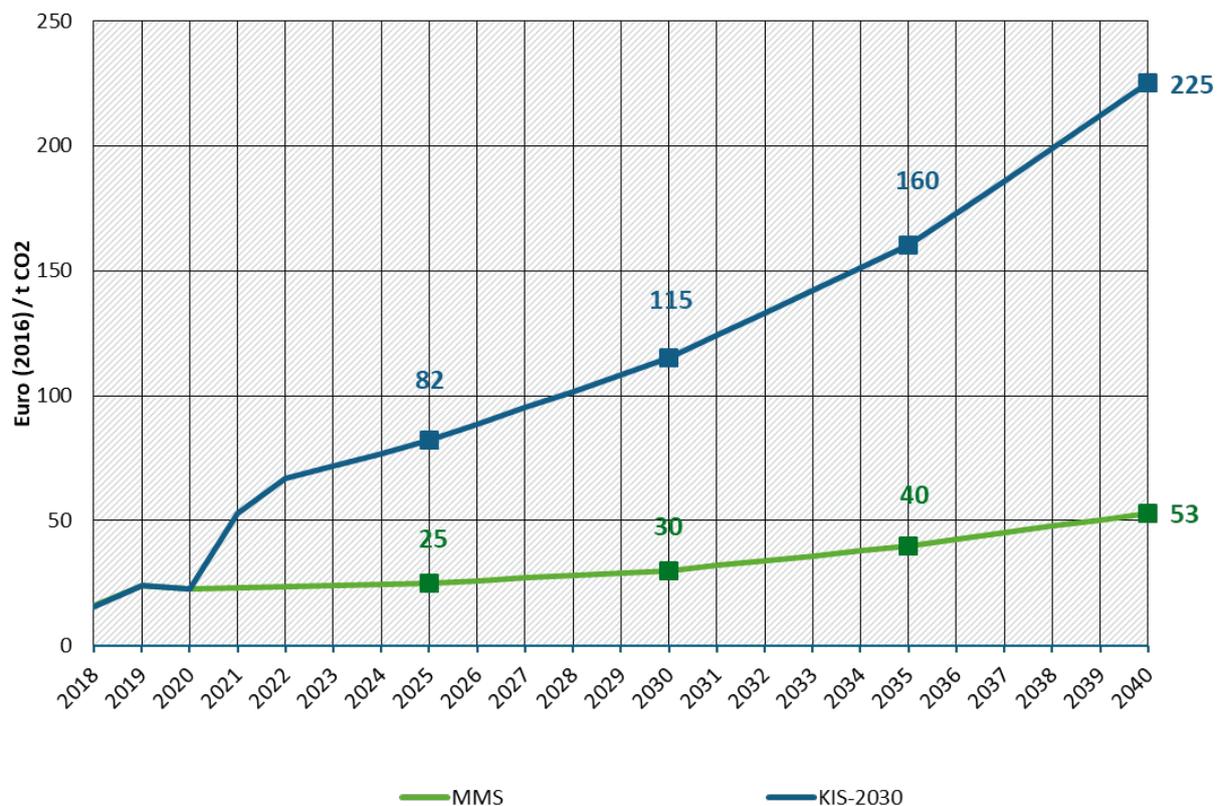
#### **Parametrisierung**

Es wird folgender Preispfad (in Euro 2016) hinterlegt:

- ▶ 2021: 53 €/t
- ▶ 2022: 67 €/t

- ▶ 2025: 82 €/t
- ▶ 2030: 115 €/t
- ▶ 2035: 160 €/t
- ▶ 2040: 225 €/t
- ▶ 2045: 320 €/t
- ▶ 2050: 450 €/t

**Abbildung 7: EU-ETS Preise im KIS-2030 und MMS, 2018-2040**



Quelle: (Öko-Institut et al. 2021), Festlegungen in Webinaren

In der Modellierung für die Energiewirtschaft wird die Ambitionssteigerung im EU ETS über einen exogenen höheren Preis für Zertifikate abgebildet. In der Stromerzeugung ist der Preispfad ausreichend hoch, um mittelfristig einen konsequenten Fuel Switch von der (verbleibenden) Kohle auf emissionsärmeres Erdgas zu gewährleisten und die entsprechenden Desinvestitionsentscheidungen für CO<sub>2</sub>-intensive Kraftwerke anzustoßen.

In der Industrie wird angenommen, dass der hinterlegte CO<sub>2</sub>-Preis als Mindestpreispfad wahrgenommen wird und dadurch die erwartete Preisentwicklung nach unten begrenzt. Dieser Mindestpreispfad ermöglicht investierenden Unternehmen, zukünftige steigende CO<sub>2</sub>-Preise bereits frühzeitig zu antizipieren, und senkt die Unsicherheiten besonders bei großen, strategisch wichtigen Investitionen deutlich.

Dieser Preispfad bietet in der Industrie die entsprechende Perspektive für den wirtschaftlichen Einsatz von Vermeidungsoptionen auf Basis von Sekundärenergieträgern mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie die Elektrifizierung der Prozesswärme. Gleichzeitig ist er noch deutlich niedriger als der für den nationalen Emissionshandel (BEHG) angenommene Preispfad.

Bei Vermeidungsoptionen mit vergleichsweise hohen Vermeidungskosten, wie dem Einsatz von grünem Wasserstoff, kann eine Stärkung bzw. Einführung von Klimaschutzverträgen (CCfDs) als weitere Maßnahme (Abschnitt 7.1.2.1.3.1) für eine Übergangszeit die Wirtschaftlichkeit ermöglichen.

Es wird weiterhin angenommen, dass flankierend ein funktionierender Grenzausgleichsmechanismus (oder ein anderes Instrument zur Wahrung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit) eingeführt wird. Mögliches (internationales) Carbon Leakage in der Industrie wird in der Modellierung nicht berücksichtigt.

#### 5.1.1.5 Konzessionsabgabe

##### Reformvorschlag

Der Vorschlag für eine Reform der Konzessionsabgabe beinhaltet folgende Ausgestaltung:

- ▶ Die derzeit auf den Stromverbrauch bezogene Konzessionsabgabe (KA) soll auf eine leistungsbezogene Abgabe umgestellt werden. Diese Umstellung sorgt dafür, dass das Preissignal aus dem Stromgroßhandel direkter bei den Stromverbrauchenden ankommt. Die KA soll nicht wie bisher am Verbrauch in ct/kWh gemessen, sondern als Pauschale bezogen auf die Netzanschlussleistung erhoben werden. Sondertatbestände können ggf. bei Bedarf in angepasster Form fortgeführt werden.
- ▶ Um den Kommunen ihre Einnahmen in bisheriger Höhe gemeindescharf zu erhalten, soll die neue Pauschale pro Anschluss ermittelt werden. Eine gemeindescharfe Ausprägung der KA kann lokale Unterschiede berücksichtigen, um somit zu einer effizienten regionalen Koordination des Stromverbrauchs beizutragen.
- ▶ Um die Akzeptanz für die Energiewende zu steigern, erhalten Kommunen je installierter Leistung eines Energiewandlers ab einer Größenordnung von 300 kW einen Zuschlag auf die Konzessionsabgabe. Damit ein regional höherer EE-Ausbau nicht gleichzeitig zu regional höheren Strompreisaufschlägen führt, wird die KA bundesweit einheitlich auf die Endverbraucher\*innen umgelegt.

Bei dieser Ausrichtung der KA könnten durch Verbrauchsschwankungen bzw. Verschiebungen (z. B. beim Smart Metering) und Eigenverbrauchslösungen verursachte Einnahmeverluste der Gemeinde vermieden werden. Gleichzeitig würden künftige Effizienz- und Energieeinsparmaßnahmen in einer Kommune nicht durch ein gemindertem Konzessionsabgabenaufkommen bestraft. Die Akzeptanz der Energiewende würde durch den „Leistungs-Anteil eines Energiewandlers“ bei der Abgabe gesteigert werden. Wesentlich wäre auch der Anreiz, zusätzliche Stromerzeuger im eigenen Gemeindegebiet anzusiedeln.

##### Parametrisierung

Die Modellierung der oben bereits beschriebenen Ausgestaltung erfolgt wiederum in den von der Maßnahme tangierten Sektoren.

#### 5.1.1.6 Stromsteuer

##### Reformvorschlag

Vor dem Hintergrund einer Neuausrichtung des Systems der Steuern, Abgaben und Umlagen im Energiebereich, um zu einer klimagerechteren Finanzierung der Energiewende beizutragen, werden die Stromsteuer (StromSt) im Zeitraum 2024 bis 2027 von derzeit 2,05 ct/kWh abgesenkt auf das nach dem Kommissionsvorschlag (EC 2021b) ab 2023 zulässige Mindestniveau

von 0,15 €/GJ bzw. 0,054 ct/kWh und im Gegenzug (Refinanzierung) die Energiesteuer auf stoffliche Primärenergieträger angehoben. Die zu besteuernde Bezugsgröße der Energiebesteuerung ist der Energieinhalt des stofflichen Energieträgers. Dies ist sinnvoll, um nicht in Konkurrenz mit der CO<sub>2</sub>-Bepreisung über den EU ETS zu treten und perspektivisch Effizianzanreize setzen zu können.

Die Fortführung der Stromsteuer auf Mindestniveau ist einerseits rechtlich geboten, andererseits sinnvoll, um auch langfristig über die Möglichkeit einer erneuten Anpassung/Anhebung ggf. erforderliche Anreize zur effizienten Verwendung von EE-Strom (beispielsweise im Rahmen der Sektorenkopplung) setzen zu können. Der Ansatz verfolgt das Ziel, über die Besteuerung des Energieinhaltes von Primärenergieträgern kurzfristig Anreize für die Nachfrage nach (erneuerbarem) Strom zu geben.

Die Stromsteuer wird ab 2024 inflationsbereinigt. Aufgrund der Absenkung der Steuer auf das erforderliche Mindestniveau entfallen sämtliche Befreiungstatbestände.

#### **Parametrisierung**

Die Modellierung der Senkung der Stromsteuer auf das europarechtlich gebotene Mindestniveau erfolgt in den vom Instrument tangierten Sektoren.

### **5.1.2 Einführung eines Weiße-Zertifikate-Systems für Energieeffizienz**

Ergänzend zu den bestehenden Politikinstrumenten könnte ein Weiße-Zertifikate-System für Energieeffizienz etabliert werden. Damit könnte sektorenübergreifend (Industrie, Haushalte, GHD, Verkehr) die Energieeinsparlücke geschlossen werden, die derzeit zur Erfüllung des Einsparzieles unter Artikel 7 der EU-Energieeffizienzrichtlinie (EED) für die Verpflichtungsperiode 2021-2030 besteht. Im Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS) des Projektionsberichts 2017 (Bundesregierung 2017), für den zuletzt ein MWMS berechnet wurde, war diese Maßnahme bereits enthalten. Derzeit nutzt über die Hälfte der Mitgliedstaaten der EU ein solches System zur vollständigen oder teilweisen Umsetzung von Artikel 7 EED. Ein zusätzliches Energieeffizienz-Instrument könnte auch die Erfüllung eines möglicherweise verschärften EU-Energieeffizienzziels bis 2030 im Rahmen des Fit-for-55 unterstützen sowie einen Beitrag zur Verringerung des Gasverbrauchs leisten.

#### **Parametrisierung**

Ein möglicher Ausgestaltungsvorschlag hinsichtlich der adressierten Sektoren, der Höhe des Einsparzieles und weiterer relevanter Parameter ist einem aktuellen Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes (Schlomann et al. 2021) zu entnehmen. Die dort vorgeschlagene Ausgestaltung des Instruments ist sektorenübergreifend und technologieneutral. Als Einsparziel wurde in der Studie von 999 PJ kumulierten Endenergieeinsparungen für die gesamte Verpflichtungsperiode (2021-2030) ausgegangen. Für eine quantitative Modellierung der Wirkung dieses übergreifenden Instruments im Rahmen des KIS-2030 wären jedoch umfassende zusätzliche Annahmen zur Höhe der sich daraus ergebenden jährlichen Endenergieeinsparungen sowie zu deren Aufteilung auf die von der Verpflichtung erfassten Sektoren (Gebäude, Industrie und Verkehr sowie der Stromverbrauch in den Sektoren Haushalte und GHD) erforderlich. Dies war jedoch im Rahmen dieses Gutachtens nicht leistbar, so dass die Wirkung dieser Maßnahme nicht quantifiziert werden kann. Sie wird daher als flankierende Maßnahme eingeordnet.

### 5.1.3 Ambitioniertere Ausgestaltung der Mindeststandards unter den EU-Verordnungen zur umweltgerechten Produktgestaltung und der Sustainable Products Initiative

Eine ambitioniertere Ausgestaltung der Mindeststandards unter der EG-Ökodesign-Richtlinie wurde zuletzt im Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario des Projektionsberichts 2017 (Bundesregierung 2017) berechnet. Ambitioniertere Energieeffizienz- und Ressourcenschutzanforderungen kommen für weitere Produkte bzw. Produktgruppen, im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie und für alle Produkte, die im Rahmen der Sustainable Products Initiative (SPI) geregelt werden sollen, in Betracht. Hatte die Ökodesign-Richtlinie zu Beginn noch einen starken Fokus auf den Bereich der Energieeffizienz während der Nutzungsphase, so spielen mit der aktuellen Umsetzung zudem Ressourcenaspekte, Langlebigkeit, Reparierbarkeit und weitere Aspekte der Kreislaufwirtschaft eine größere Rolle. Derzeit wird das Arbeitsprogramm bis zum Jahr 2024 erarbeitet, bei dem ein stärkerer Fokus auf gewerbliche und industrielle Produkte gelegt wird. Außerdem wird die Umsetzung von horizontalen Maßnahmen geprüft (Leichtbauweise, Recycling-Materialien, Software-Anforderungen etc.). Darüber hinaus führt die Kommission momentan ein Impact Assessment für die SPI durch und wird Ende des Jahres 2021 einen ersten Vorschlag vorlegen.

#### Parametrisierung

Die Modellierung einer ambitionierteren Ausgestaltung der Mindeststandards erfolgt in den vom Instrument tangierten Sektoren.

### 5.1.4 Einführung von Umweltmanagementsystemen nach EMAS / LUMAS<sup>Plus</sup> in der Bundesverwaltung

Bis 2025 führen alle obersten Bundesbehörden sowie weitere Bundesbehörden an zusätzlichen 300 Standorten ein Umweltmanagementsystem nach EMAS oder LUMAS<sup>Plus</sup> ein. Hieran beteiligen sich alle Ressorts. Dazu unterbreitet jedes Ressort konkrete Vorschläge für seinen Zuständigkeitsbereich (pro Ressort mindestens 10 Prozent seiner zivilen Standorte, bei Ressorts mit weniger als 10 Standorten Vorschlag mindestens eines Standortes).

#### Parametrisierung

Die Wirkung dieser Maßnahme betrifft die Sektoren Gebäude und Verkehr. Eine Quantifizierung der Emissionsminderung und ihre Aufteilung auf die beiden Sektoren war jedoch im Rahmen dieses Gutachtens nicht möglich. Die Maßnahme wird daher als flankierende Maßnahme eingeordnet.

### 5.1.5 Kommunalen Klimaschutz über die Nationale Klimaschutzinitiative (NKI) stärken

#### 5.1.5.1 Investive Kommunale Klimaschutz-Modellprojekte

Im Rahmen des Förderaufrufs für investive Kommunale Klimaschutz-Modellprojekte im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) werden investive Modellprojekte in Kommunen und im kommunalen Umfeld gefördert.

Für den Förderaufruf gelten noch bis Ende 2022 erhöhte Förderquoten von bis zu 80 Prozent (100 Prozent für finanzschwache Kommune) der Gesamtausgaben.

Das Instrument wirkt in den Sektoren flankierend.

### 5.1.5.2 Stärkung der Förderung des kommunalen Klimaschutzes im Rahmen der Kommunalrichtlinie

Im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative fördert das Bundesumweltministerium seit 2008 kommunale Klimaschutzprojekte über das Breitenförderprogramm Kommunalrichtlinie. Die Kommunalrichtlinie fördert sowohl im konzeptionell-strategischen Bereich des Klimaschutzes als auch investive Klimaschutzprojekte. Die Förderung über die strategischen Förderschwerpunkte soll Kommunen in die Lage versetzen, im Klimaschutz aktiv zu werden und die Voraussetzungen in der Kommunalverwaltung schaffen, Klimaschutz in der Kommune erfolgreich zu verankern. Insbesondere durch die Förderung von Klimaschutzmanagement (im Folgenden: „KSM“) als zentrale Klimaschutzstelle in der Verwaltung werden die Voraussetzungen für die Verankerung in und Verfolgung von Klimaschutz durch die kommunalen Verwaltungen geschaffen. Über die investiven Förderschwerpunkte (FSP), die die wesentlichen kommunalen Handlungsfelder abdecken, werden Kommunen bei der Umsetzung von Klimaschutzprojekten unterstützt.

Die Kommunalrichtlinie wurde novelliert und ist zum 1. Januar 2022 in Kraft getreten. Zentrales Ziel ist es, die strategischen Förderschwerpunkte stärker auf kleine Kommunen des ländlichen Raumes auszurichten. Beispielsweise wird angestrebt, Klimaschutzaktivitäten auf Landkreisebene zugunsten der kreisangehörigen Gemeinden zu stärken. Zudem soll das Angebot an Beratungsleistungen in den relevanten Handlungsfeldern des kommunalen Klimaschutzes ausgeweitet werden.

Ferner sollen mit der neuen Kommunalrichtlinie Ambitionssteigerungen im konzeptionell-strategischen Bereich gefördert werden. Kommunen erhalten die Chance, Klimaschutzkonzepte entlang verschärfter Klimaschutzziele, u. a. durch Vorziehen des Zieljahres für Treibhausgasneutralität, fortzuschreiben.

Die Kommunalrichtlinie ist nun noch umsetzungsorientierter gestaltet. Im Rahmen einer Klimaschutzmanagementförderung erhalten Kommunen etwa die Gelegenheit, über ein bestimmtes Investitionsbudget investive sowie strategische Maßnahmen mit starker Umsetzungsorientierung aus dem Klimaschutzkonzept umzusetzen. Darüber hinaus werden investive Förderschwerpunkte umgestaltet und ausgeweitet. Beispielsweise sollen im kommunalen Handlungsfeld der Abwasserbewirtschaftung weitere Förderschwerpunkte hinzukommen.

Schließlich werden mit dem Förderangebot weitere Zielgruppen aus dem kommunalen Umfeld erreicht. Die Antragsberechtigung ist auf Wohlfahrtsverbände und ihre Einrichtungen sowie gemeinnützige Vereine ausgeweitet worden.

#### Parametrisierung

Eine erste Abschätzung der Einsparwirkung dieser Maßnahme kann über die im Rahmen der NKI-Evaluierung ermittelten (durchschnittlichen) Fördereffizienzen sowie durch Annahmen über die zusätzlich verausgabte/zu verausgabende Fördersumme erfolgen.

Die Treibhausgaseinsparwirkungen sind dann den betroffenen Sektoren entsprechend ihrer Abgrenzung im Bundes-Klimaschutzgesetz (Gebäude, Abfallwirtschaft, Verkehr, Energiewirtschaft) zuzurechnen.

### 5.1.6 Steuerung der Bioenergienachfrage

Bioenergie wird durch folgende Sektoren bereitgestellt:

- ▶ Landwirtschaft (Anbaubiomasse, Reststoffe wie Stroh und Gülle)
- ▶ LULUCF (Energieholz aus dem Wald)

► Abfall (Rest- und Abfallstoffe)

Die Menge an verfügbarer inländischer Bioenergie ergibt sich aus den Maßnahmen, die in diesen drei Sektoren getroffen werden, u.a. um die Ziele des KSG zu erreichen. Dies stellt damit ein Potenzial an inländischer Bioenergie dar, aus dem die Nachfrage nach Bioenergie in anderen Sektoren gestillt werden kann. Überschreitet die Bioenergienachfrage das inländische Potenzial, so muss Bioenergie importiert werden.

Im Modellverbund wird die Menge an Bioenergie, die in den Sektoren (einschließlich internationalem Luft- und Seeverkehr) nachgefragt wird, für die Bioenergietypen feste Biomasse, Gas, konventionelle Kraftstoffe und fortschrittliche Kraftstoffe ermittelt und zu einer Gesamtnachfrage aggregiert. Wenn im Modellverbund die Nachfrage nach Bioenergie verringert oder erhöht werden soll, um z. B. die inländischen Potenzialgrenzen einzuhalten bzw. auszuschöpfen, ist dies über eine Steuerung der Bioenergienachfrage in den Sektoren möglich. Es sollen dabei einzelne Bioenergieträger und -nutzungen in den Sektoren gezielt adressiert werden. So können – wenn notwendig – Sektoren, die einfacher auf Alternativen ausweichen können als andere Sektoren, zuerst die Nutzung von Bioenergie verringern.

In Tabelle 11 sind Politikinstrumente zusammengestellt, mit denen in den Sektoren die Nachfrage nach Bioenergie beeinflusst werden kann. Wenn sich nach der Energiemodellierung herausstellt, dass in Sektoren für spezifische Biomassenutzung weitere Maßnahmen nötig werden, wird diese Liste ergänzt. Als Zeithorizont sollte ein Fokus bis zum Jahr 2030 liegen mit einem Ausblick auf die Entwicklung bis zum Jahr 2040.

**Tabelle 11: Mögliche nachfragesteuernde Politikinstrumente für Bioenergie**

Technologie	Sektoren
Förderungen reduzieren/ausbauen	Gebäude
CO <sub>2</sub> -Preis für biogene Brennstoffe <sup>16</sup>	Alle Sektoren
Kesselverbot für biogene Brennstoffe	Gebäude
Absenkung EEG-Vergütung	Energiewirtschaft
Mehrwertsteuer auf biogene Brennstoffe erhöhen	Alle Sektoren
Reduzierung der Bioenergie im Verkehr (unterschiedliche Geschwindigkeit der Abnahme für konventionelle Biokraftstoffe und fortschrittliche Biokraftstoffe)	Verkehr
Förderung der Nutzung langlebiger Produkte (Umsteuerung von energetischer zur stofflichen Nutzung, Konkurrenz energetische/stoffliche Nutzung)	Industrie
Anforderungen an Transportfähigkeit der Biomasse (zentrale Nutzung, u.a., um BECCS zu ermöglichen)	Industrie, Energiewirtschaft
Änderung baurechtlicher Anforderungen, die eine Holznutzung benachteiligen	Industrie

<sup>16</sup> Eine umfassende Treibhausgasbilanzierung, die Prozessemissionen, Änderung der Senkenleistung der Waldfläche, Änderung der Senkenleistung des Holzproduktspeichers sowie Substitutionseffekte der substituierten nicht biogenen Produkte umfasst, kann aufzeigen, ob eine spezifische Holznutzung wie Bioenergie zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen führt oder nicht. Ist eine Bioenergienutzung in der Treibhausgasbilanz besser oder schlechter als ein Grenzwert, so kann diese Differenz mit einem CO<sub>2</sub>-Preis belegt werden (Belohnung oder Bestrafung). Als Grenzwert könnten die Werte der RED II/III von 70 % Treibhausgasminderung gegenüber der fossilen Referenz herangezogen werden.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut

### 5.1.7 Beratung und Förderung für Ressourceneffizienz und -substitution

Das Instrument ist als Umsetzung der Maßnahme aus dem Klimaschutzprogramm 2030 (Kap. 3.4.4.3) definiert und wird zusätzlich zum Instrument Technologietransfer-Programm Leichtbau des BMWi aus dem MMS bewertet. Ziel einer erhöhten Ressourceneffizienz und -substitution ist es, das Prinzip der Kreislauf- bzw. Stromstoffwirtschaft in Produktionsprozessen zu verankern und so bislang nicht ausgeschöpfte Emissionsminderungspotenziale zu erschließen. Drei zentrale Bereiche sind:

- ▶ **Beratung und Information:** Unternehmen sollen zusätzlich zum Thema Energieeffizienz Informations- und Beratungsangebote zur Entwicklung und Erschließung von Innovationen mit dem Fokus Ressourceneffizienz und -substitution erhalten. Die Beratung sollte auf die bereits vorhandenen Angebote des Zentrums für Ressourceneffizienz (ZRE) aufbauen und soweit möglich mit einer Beratung im Bereich Energieeffizienz verknüpft werden. Der Schwerpunkt der unternehmensspezifischen Beratung sollte wie bei den übergreifenden Beratungsmaßnahmen des ZRE bei KMU liegen, da KMU oft weder zeitliche noch personelle Kapazitäten zur Überprüfung der Ressourceneffizienz im eigenen Unternehmen haben. Die Nutzung von Umweltmanagementsystemen soll verstärkt werden (ProgRess II). In Energieaudits werden bislang nur Energieverbräuche gemessen, hier könnte gemäß dem Vorschlag in ProgRess II ein explizites Ressourceneffizienzaudit integriert werden.
- ▶ **Förderung:** Finanzielle Mittel sind notwendig, damit Unternehmen vor allem umfassendere investive Maßnahmen umsetzen können, um Ressourceneffizienz innerhalb und entlang der Wertschöpfungsketten durch Digitalisierung und Industrie 4.0 erfolgreich zu integrieren und zu steigern. Denkbar sind ferner der verstärkte Einsatz CO<sub>2</sub>-neutraler Rohstoffe sowie der erhöhte Einsatz von Sekundärmaterial. Hierbei sind KMU besonders zu berücksichtigen, da Investitionskosten KMU im Vergleich zu größeren Unternehmen wirtschaftlich stärker belasten. Zum Nachweis von Material- und damit verbundenen Treibhausgaseinsparungen ist die Vorlage eines Ressourceneffizienzkonzepts, das die Einsparungen aufführt sowie mögliche Sekundäreffekte beschreibt, erforderlich.
- ▶ **Fortbildung und Berufsausbildung:** Um Innovationen anzureizen und Investitionen geeignet umzusetzen, bedarf es auch einer spezifischen Weiterbildung von Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen. Die Weiterbildung sollte auf bereits vorhandene Angebote des ZRE aufbauen. Für die Beratungen gemäß Punkt i kann auf den von ZRE in Zusammenarbeit mit den Ländern bereits etablierten bundesweiten Pool von qualifizierten Beraterinnen und Beratern (nach VDI-Richtlinie 4801) zurückgegriffen werden.

## 5.2 MMS

Im zuvor veröffentlichten MMS des Projektionsberichts 2021 wurden die folgenden Instrumente berücksichtigt:

- a) EU-Emissionshandelssystem
- b) EEG-Umlagesenkung
- c) Energie- und Stromsteuer
- d) CO<sub>2</sub>-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)
- e) Energie- und Klimafonds (EKF)
- f) Nationale Klimaschutzinitiative (NKI)
- g) Pilotprogramme Einsparzähler
- h) Nationale Wasserstoffstrategie
- i) Mindesteffizienzstandards – EG-Ökodesign-Richtlinie
- j) Energielabel – EU-Verordnung zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung
- k) NEC-Richtlinie (EU) 2016/2284 über nationale Emissionsminderungsverpflichtungen für bestimmte Luftschadstoffe
- l) Klimaneutrale Bundesverwaltung bis 2030
- m) Freiwillige Produktkennzeichnungen für energierelevante Produkte (Blauer Engel, Energy Star, EU-Umweltzeichen)
- n) Förderung von Contracting
- o) Stärkung der Forschung für mehr Energieeffizienz
- p) Verbesserung der Rahmenbedingungen für Energieeffizienzdienstleistungen
- q) Neue Finanzierungskonzepte
- r) Bündelung und Qualitätssicherung der Energieberatung
- s) Entwicklung von Kennzahlen und Benchmarks
- t) Energie- und Ressourceneffizienz in der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)
- u) Finanzpolitik / Sustainable Finance
- v) Forschung und Innovation
- w) Klimaschutz und Gesellschaft
- x) Informationskampagne für das neue Energielabel (Skala A bis G)
- y) Kampagne für nachhaltiges Verbraucherverhalten und nachhaltige Ressourcennutzung

Eine Beschreibung der Instrumente und Maßnahmen sowie deren Parametrisierung kann Öko-Institut et al. (2021) entnommen werden.

## 6 Energiewirtschaft

### 6.1 Stromerzeugung und gekoppelte Wärmeerzeugung

#### 6.1.1 Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick

**Tabelle 12: CO<sub>2</sub>-Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 auf die Strom- und gekoppelte Wärmeerzeugung einzelne Jahre, 2021-2030**

Maßnahme	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO <sub>2</sub>									
MMS	286	280	272	265	251	250	245	235	220	199
Anhebung und Beschleunigung des Dekarbonisierungspfad in der Stromerzeugung*	-77	-95	-88	-98	-105	-128	-142	-145	-142	-132
Ausbau der EE-Wärme**	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,5	-1,5	-2,4	-3,3	-4,2
Erhöhung der Stromnachfrage***	0	0	2	7	13	15	16	14	14	14
KIS-2030	209	185	186	174	159	136	118	101	88	77
KSG-Jahresemissionsmengen		257								108

Quelle: eigene Berechnungen, Öko-Institut

Anmerkungen: Werte auf ganze Zahlen gerundet, für das Instrument Ausbau der EE-Wärme auf eine Dezimalstelle. Instrumente bewertet gegenüber dem MMS des Projektionsberichts 2021. Positive Zahlen bedeuten Erhöhungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem MMS; negative Zahlen bedeuten Minderungen. Die Minderungen sind skaliert, sodass ihre Summe der Gesamtdifferenz zwischen den Emissionen entspricht. Gründe für eine Abweichung sind teilweise unterschiedliche Rahmenbedingungen und Interaktionseffekte. Für nähere Erläuterungen siehe Abschnitt 6.1.5.5. Dargestellt sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Strom- und gekoppelten Wärmeerzeugung. Diese ist nicht identisch mit den Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft. Die Tabelle enthält die Emissionen sämtlicher Kraftwerke. Dies umfasst auch Kraftwerke, die dem Bundesklimaschutzgesetz-Sektor Industrie zugeordnet sind. Hingegen sind keine Emissionen und Emissionsminderungen des Sektors Energiewirtschaft außerhalb der Strom- und gekoppelten Wärmeerzeugung (z. B. diffuse Emissionen, Pipelineverdichter etc.) aufgeführt. Auch sind nur CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt und keine weiteren Treibhausgase.

\* Instrument umfasst den beschleunigten Ausstieg aus der Kohleverstromung, den beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und den höheren CO<sub>2</sub>-Preis im EU ETS.

\*\* Instrument umfasst die Energieflächenverpflichtung öffentlicher Eigentümer und die Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW).

\*\*\* Instrument umfasst die Steigerung der Stromnachfrage durch Instrumente in anderen Sektoren. Die Erhöhung der Stromnachfrage ist mit dem Strommix des KIS-2030 bewertet.

#### 6.1.2 Methodik

Wie für den Projektionsbericht 2021 wird die Modellierung der Stromerzeugung und gekoppelten Wärmeerzeugung mit dem Strommarktmodell PowerFlex vorgenommen. Für eine ausführliche Darstellung des Modells siehe Anhang B.7 sowie Öko-Institut et al. (2021).

PowerFlex bestimmt den kostenoptimalen Einsatz von Technologien der Strom- und Fernwärmeerzeugung zur Deckung der stündlichen Nachfragen über ein Jahr. Maßgeblich für den Ein-

satz der Kraftwerke bzw. Kraftwerksblöcke sind dabei ihre Grenzkosten, die aus ihrem Wirkungsgrad, den Brennstoffkosten sowie den Kosten für Emissionszertifikate berechnet werden. Weitere zentrale Eingangsdaten des Modells umfassen die Energienachfragen, die größtenteils aus den Modellrechnungen der anderen Sektoren stammen, eine detaillierte Abbildung des deutschen Kraftwerksparks inklusive Speichern und die stündlichen Verfügbarkeiten erneuerbarer Energien sowie die europäischen Kraftwerkspärke und Kapazitäten für grenzüberschreitenden Stromaustausch. Zentrale Ergebnisse umfassen den Einsatz der Kraftwerke bzw. Kraftwerksblöcke für die Erzeugung von Strom und Wärme, jeweils stündlich und als Jahressumme, sowie die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

In PowerFlex werden somit Effekte der Instrumente des Sektors Energiewirtschaft auf die Treibhausgasemissionen der Kraftwerke berechnet. Dies umfasst sowohl die Kraftwerke der öffentlichen Versorgung, deren Emissionen im Sektor Energiewirtschaft bilanziert werden, als auch die Kraftwerke des Verarbeitenden Gewerbes, die im Sektor Industrie bilanziert werden.

### 6.1.3 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Grundsätzlich folgt das KIS-2030 den gleichen allgemeinen Annahmen wie der Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021). Unterschiede bestehen vor allem in der Ausgestaltung der Instrumente und deren Parametrisierung (Abschnitt 6.1.4.1).

Daneben ergeben sich aus der Ausgestaltung der Instrumente in anderen Sektoren auch Rückwirkungen auf die Eingangsdaten für die Strom- und Fernwärmeerzeugung, die nicht durch Instrumente im Sektor Energiewirtschaft explizit adressiert sind:

- ▶ Im Vergleich zum Projektionsbericht 2021 ergibt sich im KIS-2030 ein niedrigerer Pfad des Aktivitätsindex für Raffinerien. Hieraus folgen leicht geringere Kapazitäten von Kraftwerken, die mit schwerem Heizöl befeuert werden. So beläuft sich die Differenz im Jahr 2030 auf knapp 0,3 GW;
- ▶ die im KIS-2030 implementierten Instrumente in den Sektoren Industrie und Verkehr beeinflussen die Stromerzeugung aus Raffineriegas, Kokereigas und Gichtgas. Hier liegt die Erzeugung im KIS-2030 im Jahr 2030 im Vergleich zum Projektionsbericht 2021 um 2,6 TWh (Gichtgas), 1,1 TWh (Kokereigas) bzw. 0,2 TWh niedriger (Raffineriegas);
- ▶ die Elektrolyseure in Deutschland werden im KIS-2030 zügiger ausgebaut. Betrug ihre installierte Leistung im Projektionsbericht 2021 im Jahr 2030 noch 5 GW, so beträgt sie im KIS-2030 im Jahr 2030 10 GW;
- ▶ entsprechend dem ambitionierteren Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland im KIS-2030 im Vergleich zum Projektionsbericht 2021, dem zügigeren Kohleausstieg und dem höheren angenommenen Preispfad im EU-ETS (Abschnitt 6.1.4.1) ist im KIS-2030 auch eine ambitioniertere Entwicklung im europäischen Ausland angenommen. Die Parametrisierung erfolgt anhand des Szenarios *National Trends des Ten Year Network Development Plan 2020* (ENTSO-E und ENTSO-G 2020). Insgesamt liegt hier im Vergleich zum Projektionsbericht 2021 im Jahr 2030 eine um etwa 17 % höhere Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im europäischen Ausland vor sowie eine gut 40 % geringere Kapazitäten von Kohlekraftwerken.

## 6.1.4 Instrumente und deren Parametrisierung

### 6.1.4.1 KIS-2030

#### 6.1.4.1.1 Anhebung und Beschleunigung des Dekarbonisierungspfades in der Stromerzeugung

Diese Maßnahme kombiniert mehrere Aspekte, um die Dekarbonisierung in der Stromversorgung zu beschleunigen und auf ein höheres Niveau zu heben. Erstens wird von einem ambitionierteren Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung ausgegangen. Dieser wird maßgeblich durch höhere Ziele für die jährliche Energie aus erneuerbaren Quellen im EEG vorgegeben, und kann zudem durch eine Pflicht für die Installation von PV-Anlagen auf Dächern von Neubauten unterstützt werden.<sup>17</sup> In jedem Fall muss der steilere Ausbaupfad durch eine entsprechende Ausgestaltung der planungs- und genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen flankiert werden.

Zweitens ist durch die anstehende ETS-Reform zur Erreichung des neuen EU-Klimaziels für 2030 absehbar, dass sich im Markt höhere CO<sub>2</sub>-Preise einstellen (siehe sektorenübergreifende Maßnahmen in Kapitel 5). Beide Maßnahmen haben zur Folge, dass im Ergebnis die Reduzierung der emissionsintensiven Kohleverstromung beschleunigt wird.

Die bisherigen Regelungen des KWKG für vor allem erdgasbasierte Anlagen werden zunächst stärker um Fördertatbestände für die EE-Wärmeerzeugung ergänzt und nach einer Übergangszeit ersetzt. Dazu gehört etwa EE-Wärme aus Wärmepumpen, tiefer Geothermie, Abwärme, Solarthermie oder gegebenenfalls aus wasserstoffbasierten KWK-Anlagen.

#### Parametrisierung

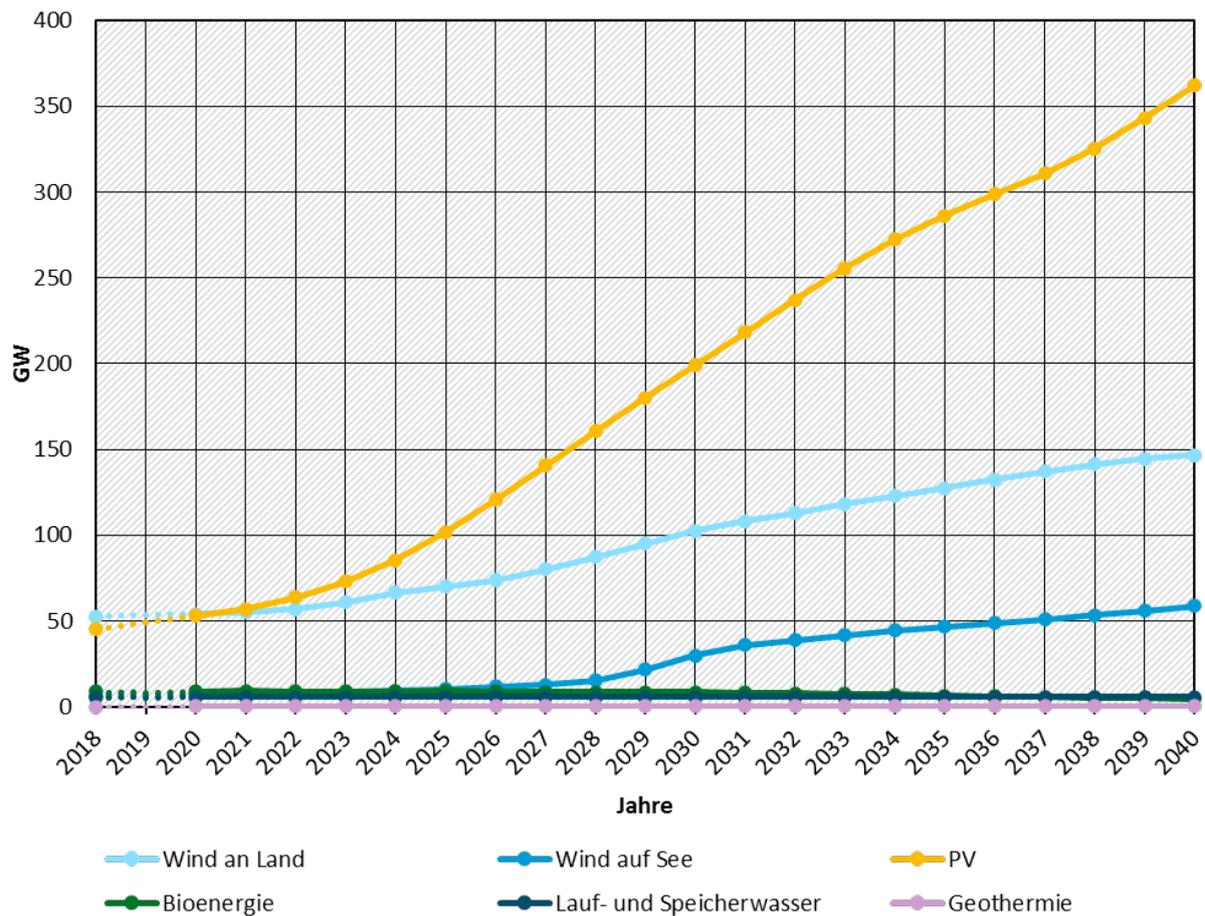
Die erneuerbaren Energien Windkraft und Photovoltaik werden entsprechend eines ambitionierten Pfades ausgebaut. Dieser lehnt sich für 2030 an die Ziele im Koalitionsvertrag von SPD, Grünen und FDP aus dem Jahr 2021 an (SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP 2021). Die Kapazitäten bzw. das Energiedargebot von Biomasse, Geothermie, Wasserkraft, Klär-/Deponiegas und des biogenen Anteils des Mülls werden unverändert aus dem MMS übernommen. Tabelle 13 fasst die Kapazitäten zusammen. Abbildung 8 visualisiert die Entwicklung.

**Tabelle 13: Installierte Leistungen der erneuerbaren Energien im KIS-2030, 2018-2040**

Technologie	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
Windkraft an Land	GW	52	70	103	127	147
Windkraft auf See	GW	6	10	30	47	59
Photovoltaik	GW	45	102	199	286	362
Biomasse (feste Biomasse, Biogas, Pflanzenöl, Deponie-/Klärgas)	GW	8,7	9,0	8,5	6,3	4,6
Geothermie	GW	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
Wasserkraft (Lauf- und Speicherwasser)	GW	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut

<sup>17</sup> Eine PV-Dachpflicht kann als flankierende Maßnahme unterstützend wirken, um die Ausbauziele zu erreichen, wurde jedoch in diesem Szenario nicht explizit modelliert.

**Abbildung 8: Installierte Leistungen der erneuerbaren Energien im KIS-2018-2040, 2018-2040**

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

Unter den gegebenen Annahmen für die Volllaststunden aller Technologien ergibt sich im Jahr 2030 eine Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Quellen von 569 TWh und im Jahr 2040 von 963 TWh.<sup>18</sup>

### Rahmenbedingungen

Für die Modellierung sind die Kapazitäten an stationären Batteriespeichern an die PV-Kapazitäten geknüpft. Im Vergleich zum MMS steigt die installierte Leistung der Batteriespeicher von 10 auf 24,5 GW Speicherkapazität im Jahr 2035.<sup>19</sup> Die Pfade für erneuerbare Energien und konventionelle Kraftwerke im europäischen Ausland werden entsprechend ebenfalls angepasst. Hierzu wird das Szenario *National Trends* Szenario des Ten Year Network Development Plan (TYNDP)

<sup>18</sup> Im MMS wird eine Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 376 TWh im Jahr 2030 und 565 TWh im Jahr 2040 angenommen. Die Volllaststunden der Windenergie (an Land und auf See), Bioenergie (feste und flüssige Biomasse) sowie der Wasserkraft entsprechen denen des MMS des Projektionsberichts 2021. Für PV wurde eine andere Herangehensweise gewählt, die zu höheren Volllaststunden führt. So betragen sie im MMS des Projektionsbericht 2021 etwa im Jahr 2030 903 Stunden und im KIS-2030 965 Stunden. Diese Zahl berechnet sich aus den für die jährlich zugebauten Kohorten angenommenen Volllaststunden. Diese steigen mit der Zeit an. Da im KIS-2030 mehr PV-Kapazitäten in den 2020er Jahren zugebaut werden als im MMS des Projektionsberichts, steigen entsprechend die durchschnittlichen Volllaststunden des gesamten Anlagenparks.

<sup>19</sup> Hierbei wird in Anlehnung an den Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans 2021 (Bundesnetzagentur (2020a)) für das Jahr 2035 davon ausgegangen, dass 60 % der PV-Kapazität auf Aufdachanlagen entfällt, wovon 20 % der Kapazität mit einem Speicher ausgerüstet ist. Bei einer angenommenen durchschnittlichen PV-Leistung pro Aufdachanlage von 7 kW, ebenfalls angelehnt an den Szenariorahmen, und ausgehend von einer Speichergröße von 5 kW/15 kWh ergeben sich im KIS-2030 für das Jahr 2035 bei 272 GW PV etwa 24,5 GW Speicherkapazität. Zwischen den historischen Daten bis einschließlich 2020 und dem Jahr 2035 wird linear interpoliert, um einen unplausiblen Bruch zu vermeiden. Nach 2035 werden die Kapazitäten entsprechend vorstehender Rechnung ermittelt. In den Modellrechnungen ist die stündlich verfügbare Batteriekapazität an das momentane PV-Dargebot geknüpft. So kann etwa nachts nicht eingespeichert werden.

2020 (ENTSO-E und ENTSO-G 2020) verwendet, in dem die Kapazitäten und Erzeugung von Wind und Photovoltaik im europäischen Ausland höher liegen als im MMS.

Die Studie Klimaneutrales Deutschland (Prognos et al. 2020) hat gezeigt, dass ein zusätzlicher EE-Ausbau und der durch die ambitionierteren EU-Ziele entstehende höhere CO<sub>2</sub>-Preis zur Folge haben, dass ein fast vollständiger Rückgang der Kohleverstromung bis zum Jahr 2030 erreicht wird. Aktuelle Berechnungen bezüglich der Deckungsbeiträge (für Braunkohlekraftwerke) (Öko-Institut 2021b) zeigen, dass bereits heute die aktuellen Deckungsbeiträge nicht ausreichend sind, um die Fixkosten zu decken. Die betreffenden Kraftwerke und Tagebaue werden also mittelfristig stillgelegt, wenn die Strompreise nicht substantiell steigen oder die CO<sub>2</sub>-Preise nicht substantiell sinken. Zentrale Unsicherheit ist hier, in welchem Zeithorizont diese Fixkosten abgebaut werden können. Denn erst wenn die Fixkosten auch abgebaut werden können, ergibt sich ein Stilllegungsanreiz.

Aus verschiedenen Gründen ist es jedoch nicht möglich die Stilllegung der Kohlekraftwerke im Strommarktmodell zu modellieren (z. B. Unklarheit, wann bei welchen Kraftwerken Kosten abgebaut werden können, deutlich aufwendigere Berechnung mit Stilllegungskalkül, die für dieses Projekt nicht kalkuliert wurde). Daher ist es notwendig, dem Strommarktmodell einen Stilllegungspfad vorzugeben. Somit geht das letzte Kohlekraftwerk im KIS-2030 Ende 2029 vom Netz. Hierzu werden die Ausstiegspfade des MMS auf das Enddatum 2029 gestaucht.

Die Entwicklung der Erdgaskraftwerke erfolgt methodisch analog zum MMS des Projektionsberichts 2021. Durch den zügigeren Kohleausstieg erfolgt im KIS-2030 jedoch insbesondere der Ersatz von Kohle- durch Erdgas-KWK-Anlagen deutlich früher als im MMS des Projektionsberichts 2021. Nach dem Jahr 2027 wird im Rahmen des Kohleersatzes kein neues Erdgas-Kraftwerk mehr in Betrieb genommen.

#### **6.1.4.1.2 Verpflichtende Kommunale Wärmeplanung**

Um die Effizienzpotenziale der Wärmebereitstellung und -nachfrage zu heben, wird die Wärmeplanung in Kommunen zur Pflichtaufgabe. Hierzu verpflichtet die Bundesregierung die Bundesländer sicherzustellen, nach einem bundesrechtlich vorgegeben Rahmen kommunale Wärmepläne zu erstellen. Die Länder wiederum können die Verpflichtung auf die Kommunen oder regionale Planungsverbände übertragen. Abbildung 9 zeigt eine Übersicht. Hierbei ist ggf. auch eine Pilotphase möglich, bei der einige Bundesländer freiwillig teilnehmen, die dies möchten. Die Erfahrungen aus der Pilotphase würden dann aufbereitet und für die verpflichtende, zweite Phase allen Bundesländern zur Verfügung gestellt.

Bei der kommunalen Wärmeplanung handelt es sich um einen Planungs- und Umsetzungsprozess, der Kommunen in den kommenden Dekaden dabei unterstützt, ihre Wärmeversorgung und die damit verbundenen Infrastrukturen strategisch, gebiets-scharf und langfristig weiterzuentwickeln. Wärmepläne dienen dazu, für Quartiere, Stadtteile und ganze Kommunen aus einer übergreifenden Perspektive her Klimaschutzmaßnahmen mit Maßnahmen der Wärmeversorgung zu verbinden. Wesentliche Elemente dabei sind eine Aufnahme der Wärmebedarfsstruktur, die Abschätzung der räumlich aufgelösten Einsparpotenziale, eine Aufnahme der bestehenden Wärmeinfrastruktur sowie eine Ermittlung der Potenziale bestehender Wärmequellen (z. B. Abwärme) und erneuerbarer Energien. In der konkreten Umsetzung lassen sich mit Hilfe der strategischen Wärmeplanung gebiets- bzw. quartiers-scharf Entwicklungsoptionen identifizieren und darauf aufbauend planerisch umsetzen.

Die kommunale Wärmeplanung besteht aus mehreren Schritten. Am Anfang steht die fachliche Vorbereitung in Form einer Bestandsanalyse und der Entwicklung eines Zielszenarios/Zielbilds sowie eines Maßnahmenplans. Der Maßnahmenplan wird durch die Stadt-/Gemeindeparlamente politisch beschlossen und in die kommunale Fachplanung als Leitlinie integriert. Die

Maßnahmen werden umgesetzt und sowohl Zielbild und auch Maßnahmenplan periodisch überprüft und ggf. angepasst.

**Abbildung 9: Einordnung der kommunalen Wärmeplanung**



Quelle: Adaptiert aus Ortner et al. (2021), S. 193.

### Parametrisierung

Die Wirkung der Maßnahme ist nicht quantifizierbar. Die Maßnahme ist Grundlage zielgerichteter kommunalpolitischer Entscheidungen und damit eine wichtige Grundvoraussetzung für das Gelingen der Wärmewende.

#### 6.1.4.1.3 Energieflächenverpflichtung öffentlicher Eigentümer

Die Verfügbarkeit von Flächen ist oft ein hinderlicher Faktor für EE-Wärmeprojekte, insbesondere in potenzieller Nähe zu Wärmenetzen. Die Maßnahme verpflichtet öffentliche Eigentümer (über jeweilige weitere Gesetze, wie etwa BImA-Gesetz, oder übergreifend), aufbauend auf einer Potenzialanalyse einen geringen noch festzulegenden Prozentsatz der geeigneten Flächen über eine Flächenbörse in kostenloser Erbpacht zur Verfügung zu stellen. Die Vergabe erfolgt über ein Punktesystem (Beitrag zur Energiewende, Treibhausgaseinsparung, alternative Nutzungsmöglichkeiten, Realisierungswahrscheinlichkeit).

### Parametrisierung

Es wird davon ausgegangen, dass maximal 3 % der restriktionsarmen Flächen, die durch die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) verwaltet werden, für EE-Wärme geeignet sind. Hieraus leitet sich unter der Annahme von zwei Quadratmetern Grundfläche pro Quadratmeter Kollektorfläche und einem Energieeintrag von  $0,4 \text{ MWh/m}^2\text{a}$  ein Dargebot von insgesamt 2,25 TWh solarthermischer Fernwärme pro Jahr ab (vergl. Ortner et al. (2021) Hiervon wird die Hälfte, also 1,125 TWh, direkt der Maßnahme Energieflächenverpflichtung zugeordnet, die andere Hälfte der BEW. Für das KIS-2030 wird davon ausgegangen, dass dieses Potenzial bis 2030 realisiert wird. Nach 2031 wird das Wachstum mit der Wachstumsrate von 2021-2030 fortgeschrieben. Prinzipiell weitere, hierfür infrage kommende Flächen des Bundes fallen unter die Verwaltung des Bundesamtes für Straßenwesen, der Bodenverwertungs- und Verwaltungs-GmbH, der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, der Bahn AG und der Autobahn GmbH. Für diese Flächen wird das mögliche weitere Potenzial konservativer angesetzt.

#### 6.1.4.1.4 Bundesförderung effiziente Wärmenetze mit flankierenden Maßnahmen (BEW)

Die Förderung für dekarbonisierte Wärmenetze wird weiterentwickelt zur Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW), die auch Einzelmaßnahmen fördert und insbesondere die Transformation von Bestandsnetzen in den Blick nimmt. Die Förderung Wärmenetzsysteme 4.0, die innovative Niedertemperatur-Wärmenetzsysteme mit überwiegendem Anteil erneuerbarer Energien und Abwärme adressiert, geht in ihr auf.

Für die effiziente Einkopplung von erneuerbaren Energien und unvermeidbarer Abwärme sind meist niedrige Temperaturen in den Wärmenetzen erforderlich. Fossile Wärmeerzeuger-Kapazitäten müssen in erheblichem Ausmaß ersetzt werden. Die heutige Förderlandschaft fördert zwar EE-Wärmeerzeuger, jedoch nur lückenhaft und unzureichend. Für Großwärmepumpen ist dies bedingt durch zu niedrige Förderobergrenzen sowie eine hohe Abgaben- und Umlagenlast auf Strom im Vergleich zu Fördersätzen. Für Geothermie, die bei der Einsatzreihenfolge am Markt stark in Konkurrenz steht, ist die Investitionsförderung insgesamt zu gering. Zudem stehen die EE in Konkurrenz zu, im Verhältnis großzügig geförderten, KWK-Anlagen. Mit der BEW soll die Förderung der EE-Wärme gezielt ausgebaut werden. Darunter fällt die Förderung der vorbereitenden Konzeptionierung der Wärmenetze, EE-Einzelmaßnahmen-Förderung und Systemische Förderung.

#### Parametrisierung

Für den Ausbau zusätzlicher EE-Wärmeerzeugung wird für das Jahr 2030 davon ausgegangen, dass die BEW 1,31 TWh Solarthermie, 8,4 TWh tiefe Geothermie, 7,9 TWh Fernwärme aus Großwärmepumpen und 2,3 TWh Abwärmenutzung ermöglicht. Die Parametrisierung beruht auf Ortner et al. (2021).

Für die Erstellung der Pfade im KIS-2030 wird für jede EE-Wärmetechnologie davon ausgegangen, dass der Ausbaupfad, der durch die BEW induziert wird, den Ausbaupfad durch die Maßnahme Wärmenetze 4.0 ersetzt, die die Grundlage für das MMS bildet. Der im MMS von der Maßnahme Wärmenetze 4.0 als unabhängig angenommene Ausbau findet auch im KIS-2030 statt. Zudem wird auch im KIS-2030 von den verringerten Wärmeverlusten des Netzes aus der Maßnahme Wärmenetze 4.0 des MMS ausgegangen.

Für die Jahre 2031 bis 2040 wird davon ausgegangen, dass sich der Ausbaupfad der Jahre 2021-2030 fortsetzt. Die Effizienzmaßnahmen für geringere Wärmeverluste im Netz werden aus dem MMS übernommen. Tabelle 14 zeigt die resultierende Einspeisung im KIS-2030 für ausgewählte Jahre.

**Tabelle 14: Einspeisung von EE-Fernwärme im KIS-2030**

Technologie		2018	2025	2030	2035	2040
Solarthermie	TWh	0,0	1,5	3,6	5,4	7,3
Abwärme	TWh	0,0	0,9	2,3	3,6	4,9
Geothermie	TWh	0,7	0,8	8,4	13,1	17,7
Wärmepumpen	TWh	0,0	3,9	11,5	15,8	20,2
Gesamt	TWh	0,7	7,1	25,8	37,9	50,0

Quelle: Ortner et al. (2021), Öko-Institut et al. (2021), Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

#### 6.1.4.2 MMS

Im zuvor veröffentlichten MMS des Projektionsberichts 2021 wurden die folgenden Instrumente berücksichtigt:

- a) EU-Emissionshandelssystem
- b) Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
- c) Förderung von KWK-Anlagen
- d) Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVBG)
- e) Modellvorhaben Wärmenetze 4.0

Eine Beschreibung der Instrumente und Maßnahmen sowie deren Parametrisierung kann Öko-Institut et al. (2021) entnommen werden.

#### 6.1.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst ausführlich die Ergebnisse des KIS-2030 präsentiert (Kapitel 6.1.5.1), anschließend die Befunde der BEHG-Sensitivität (Kapitel 6.1.5.2) sowie des MMS des Projektionsberichts 2021 (Kapitel 6.1.5.3). Darauf aufbauend werden die Szenarien verglichen (Kapitel 6.1.5.4) sowie der Einfluss der Instrumente auf die Befunde dargestellt (Kapitel 6.1.5.5).

##### 6.1.5.1 KIS-2030

###### 6.1.5.1.1 Stromverbrauch

Sowohl der Endenergieverbrauch an Strom als auch der Bruttostromverbrauch steigen im KIS-2030 deutlich an (Tabelle 15). Der Stromverbrauch in den einzelnen Endverbrauchssektoren der Energiebilanz entwickelt sich dadurch wie folgt: der Stromverbrauch der Industrie steigt von 226 TWh (2018) um 4 % auf knapp 235 TWh (2030). Der zusätzliche Stromverbrauch durch neue Stromanwendungen kann also nur teilweise durch Energieeffizienzgewinne kompensiert werden. Der Stromverbrauch von Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sinkt insbesondere aufgrund von starken Effizienzverbesserungen in der Beleuchtung sowie bei der Prozesswärme und -kälte um 4 % von 149 TWh (2018) auf 141 TWh (2030), obwohl ein zusätzlicher Stromverbrauch von knapp 5 TWh durch Wärmepumpen hinzukommt. Bei den Haushalten hingegen verursachen die Wärmepumpen einen zusätzlichen Stromverbrauch in Höhe von knapp 27 TWh. Daher liegt der Stromverbrauch der Haushalte im Jahr 2030 mit knapp 134 TWh um 6 % höher als 2018 (127 TWh). Im Verkehr wurde Strom historisch fast nur im Schienenverkehr verbraucht. Durch eine Ausweitung des elektrischen Schienenverkehrs steigt dieser Stromverbrauch von gut 11 TWh (2018) um 35 % auf gut 15 TWh (2030). Die Elektrifizierung des Straßenverkehrs führt zu einem starken Anstieg des Stromverbrauchs. Während dieser Stromverbrauch im Basisjahr noch marginal ist, beträgt er im Jahr 2030 bereits 85 TWh. In Summe dieser Entwicklungen steigt der Endenergieverbrauch an Strom von etwa 513 TWh im Basisjahr 2018 um knapp 17 % auf 612 TWh im Jahr 2030 an.

Neben dem Endenergieverbrauch an Strom ist der Stromverbrauch der Energiewirtschaft (in der Energiebilanz als Umwandlungssektor bezeichnet) zu berücksichtigen, um den Bruttostrombedarf darzustellen. Hier gibt es Änderungen in unterschiedliche Richtungen. Einerseits führen die Klimaschutzinstrumente im KIS-2030 zu sinkenden Stromverbräuchen bei Raffinerien (-36 % zwischen 2018 und 2030, ohne zusätzlichen Stromverbrauch für Wasserstoff) und in der übrigen Energiewirtschaft (-79 %). Der Rückgang der Stromerzeugung aus thermischen Kraftwerken – insbesondere durch den Atom- und Kohleausstieg – und der Ersatz durch Wind- und Solarstromerzeugung führt zu einem Rückgang des Kraftwerkseigenverbrauchs zwischen 2018

und 2030 um -58 %. Der größte zusätzliche Stromverbrauch in der Energiewirtschaft von 40 TWh im Jahr 2030 wird durch die Elektrolyseure zur Herstellung von Wasserstoff und strombasierten Flüssigkraftstoffen verursacht. Der Stromverbrauch zur Fernwärmebereitstellung mit Elektrodenkessel und Großwärmepumpen ist 2030 mit knapp 6 TWh ebenfalls ein nicht zu vernachlässigender zusätzlicher Stromverbrauch. Durch den hohen Anteil an fluktuierender Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie steigt der Speicherbedarf; daher liegt der Pumpstromverbrauch 2030 um 74 % höher als 2018. Der im KIS-2030 deutlich steigende Stromverbrauch führt dazu, dass auch die Leitungsverluste um 26 % ansteigen. Insgesamt liegt der Stromverbrauch der Energiewirtschaft im Jahr 2030 um 39 % höher als im Basisjahr 2018.

Der Bruttostromverbrauch liegt somit 2030 bei 728 TWh und damit um 22 % höher als im Basisjahr 2018. Gegenüber dem Stromverbrauch des im Energiekonzept der Bundesregierung verwendeten Referenzjahrs 2008 entspricht dies einem Anstieg um gut 17 %.

**Tabelle 15: Bruttostromverbrauch im KIS-2030, 2008-2040**

Sektor	2008	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Industrie	232,6	226,1	228,0	234,6	239,7	246,3
GHD	135,7	148,9	145,5	143,1	143,5	141,8
<i>davon Wärmepumpen</i>	<i>0,0</i>	<i>0,2</i>	<i>1,4</i>	<i>5,7</i>	<i>10,2</i>	<i>12,5</i>
Haushalte	139,5	126,6	120,2	133,8	149,4	152,9
<i>davon Wärmepumpen</i>	<i>0,0</i>	<i>2,4</i>	<i>6,9</i>	<i>26,7</i>	<i>44,2</i>	<i>48,2</i>
Schienenverkehr	16,5	11,5	13,7	15,5	16,0	16,0
Neue Verbraucher im Verkehr	0,0	0,2	31,7	85,4	135,4	168,1
<b>Stromverbrauch Endenergie</b>	<b>524,3</b>	<b>513,3</b>	<b>539,1</b>	<b>612,3</b>	<b>684,0</b>	<b>725,2</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-2,1 %</i>	<i>2,8 %</i>	<i>16,8 %</i>	<i>30,5 %</i>	<i>38,3 %</i>
Summe Endenergie klassische Verbraucher	524,3	510,5	499,1	494,5	494,2	496,4
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-2,6 %</i>	<i>-4,8 %</i>	<i>-5,7 %</i>	<i>-5,7 %</i>	<i>-5,3 %</i>
Summe Endenergie neue Verbraucher im Verkehr	0,0	2,8	40,0	117,8	189,8	228,8
<i>Anteil am Stromverbrauch Endenergie</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,5 %</i>	<i>7,4 %</i>	<i>19,2 %</i>	<i>27,7 %</i>	<i>31,6 %</i>
Raffinerien	6,4	6,1	5,3	3,9	2,6	1,8
H <sub>2</sub> /PtG/PtL für Endverbrauch	0,0	0,0	6,8	40,0	60,4	80,8
Übrige Energiewirtschaft	7,7	6,3	3,7	1,3	1,3	1,4
Leitungsverluste	30,1	26,7	28,2	33,7	38,4	41,6
Pumpstrom	7,9	8,3	2,3	14,5	21,6	22,4
Eigenstromverbrauch Kraftwerke	38,3	34,0	18,5	14,2	15,0	15,7
Elektrodenkessel und Großwärmepumpen	0,0	0,0	1,7	5,7	18,7	30,6
<b>Stromverbrauch Energiewirtschaft</b>	<b>90,5</b>	<b>81,4</b>	<b>66,5</b>	<b>113,4</b>	<b>158,1</b>	<b>194,3</b>

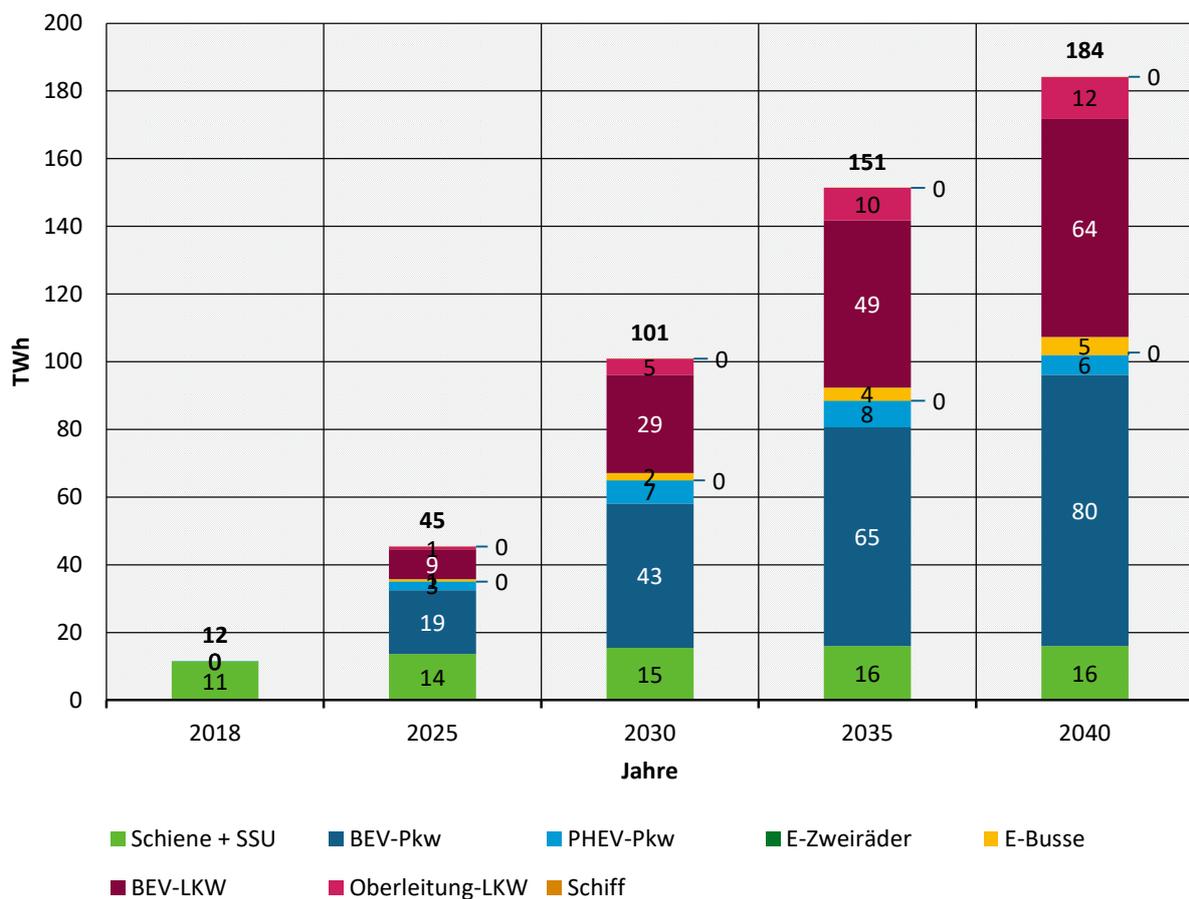
Sektor	2008	2018	2025	2030	2035	2040
Änderung ggü. 2008	0,0 %	-10,1 %	-26,5 %	25,3 %	74,7 %	114,7 %
Statistische Differenz*	-6,6	0,0	-0,3	-2,6	-4,5	-2,8
<b>Bruttostromverbrauch</b>	<b>621,4</b>	<b>594,7</b>	<b>605,8</b>	<b>728,4</b>	<b>846,6</b>	<b>922,2</b>
Änderung ggü. 2008	0,0 %	-4,3 %	-2,5 %	17,2 %	36,2 %	48,4 %

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

Anmerkung: Alle Werte auf eine Dezimalstelle gerundet. \* Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen ergeben sich kleine statistische Differenzen.

Da die Stromverbräuche im KIS-2030 im Verkehr und in der Energiewirtschaft gegenüber dem Basisjahr 2018 besonders stark ansteigen, bieten die folgenden beiden Diagramme hierzu einen detaillierten Überblick.

**Abbildung 10: Stromverbrauch des Verkehrs im KIS-2030, 2018–2040**



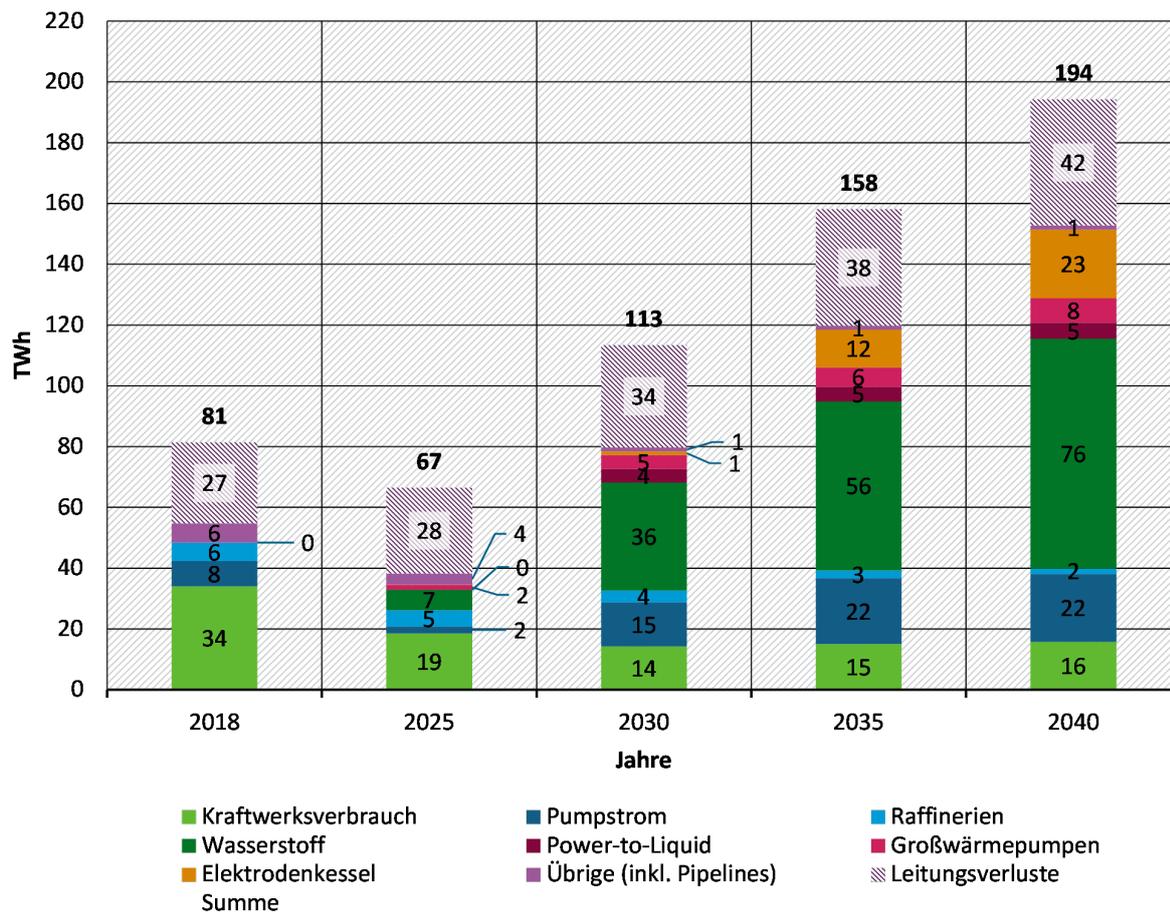
Anmerkung: SSU = S-Bahnen, Straßenbahnen und U-Bahnen

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

Im Basisjahr besteht der Stromverbrauch fast ausschließlich aus Schienenverkehr (einschließlich S-Bahnen, Straßenbahnen und U-Bahnen; SSU). Dieser Stromverbrauch wächst zwar weiter, aber bereits im Jahr 2025 ist der Stromverbrauch des Straßenverkehrs größer als der des Schienenverkehrs. Im Jahr 2030 macht der Stromverbrauch des Schienenverkehrs nur noch ein Siebtel des ganzen Stromverbrauchs des Verkehrs aus. Im Gegensatz dazu vervielfacht sich der Stromverbrauch des Straßenverkehrs. Der Stromverbrauch des Straßenverkehrs teilt sich dabei

auf unterschiedliche Antriebsarten auf, dominiert von den batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV-Pkw und BEV-Lkw). Ein sehr kleiner Stromverbrauch entfällt auf die Binnenschifffahrt.

**Abbildung 11: Stromverbrauch der Energiewirtschaft im KIS-2030, 2018–2040**



Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

Diverser ist die Entwicklung der Energiewirtschaft, siehe Abbildung 11. Zu den Details siehe Beschreibung zur Tabelle 15.

#### 6.1.5.1.2 Entwicklung von installierter Leistung und Stromerzeugung

Tabelle 16 schlüsselt die Entwicklung der installierten Leistungen im KIS-2030 detailliert auf. Ende des Jahres 2022 geht das letzte Kernkraftwerk vom Netz. Der Kohleausstieg wird deutlich beschleunigt (vergleiche Abschnitt 6.1.4.1). Im Jahr 2025 sind noch 8,8 GW Braunkohlekraftwerke und 8,5 GW Steinkohlekraftwerke am Netz. Ende des Jahres 2029 wird das letzte Kohlekraftwerk abgeschaltet. Die Kapazitäten der Gaskraftwerke steigen hingegen leicht an, von 28 GW im Basisjahr 2018 auf 36 GW im Jahr 2030. Dies liegt vor allem an der Wirkung des KWKG im Bereich der kleineren Gaskraftwerke bzw. Blockheizkraftwerke sowie in Verbindung mit dem Kohleausstieg dem Bau von Kohlersatzanlagen, die insbesondere auch die wegfallende Fernwärmeerzeugung aus Kohle ersetzen. Bis 2040 fallen die Kapazitäten der Gaskraftwerke wieder, auf etwas über 33 GW.

**Tabelle 16: Aufschlüsselung der installierten Nettonennleistung im KIS-2030 für ausgewählte Jahre**

Technologie	2018	2025	2030	2035	2040
	GW				
Kernenergie	9,5	0	0	0	0
Braunkohle	20,0	8,8	0	0	0
Steinkohle	21,8	8,5	0	0	0
Gas (Erdgas, Grubengas, Wasserstoff)	28,0	35,3	36,0	34,8	33,4
Öl	3,3	3,1	3,8	2,5	2,4
Sonstige	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
<i>Gichtgas</i>	<i>1,6</i>	<i>1,6</i>	<i>1,6</i>	<i>1,6</i>	<i>1,6</i>
<i>Kokereigas</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>
<i>Raffineriegas</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>
<i>Sonstige Gase</i>	<i>0,3</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>
<i>Abfall</i>	<i>2,1</i>	<i>2,1</i>	<i>2,1</i>	<i>2,1</i>	<i>2,1</i>
<b>Summe Kernbrennstoffe, Kohlen, Gas (Methan, Kuppelgase), Öl, Abfall</b>	<b>87,2</b>	<b>60,3</b>	<b>43,4</b>	<b>41,8</b>	<b>40,2</b>
Windenergie an Land	54,2	69,9	102,6	127,4	146,7
Windenergie auf See	6,4	10,3	29,9	46,6	58,6
Photovoltaik	45,2	101,7	199,1	286,4	362,2
Biomasse	8,6	9,0	8,5	7,0	5,6
<i>Biogas und Deponie-/Klärgas</i>	<i>6,7</i>	<i>7,2</i>	<i>6,8</i>	<i>5,3</i>	<i>3,9</i>
<i>Feste Biomasse</i>	<i>1,6</i>	<i>1,6</i>	<i>1,7</i>	<i>1,7</i>	<i>1,7</i>
<i>Pflanzenöl</i>	<i>0,2</i>	<i>0,1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Lauf- und Speicherwasser	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7
Geothermie	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
<b>Summe Erneuerbare</b>	<b>118,1</b>	<b>196,5</b>	<b>345,9</b>	<b>472,6</b>	<b>578,0</b>
Pumpspeicher (Turbinenleistung)	8,9	9,9	10,0	10,0	10,0
Batteriespeicher	0,2	7,0	17,1	24,6	31,0
<b>Summe gesamt</b>	<b>214,4</b>	<b>273,6</b>	<b>416,4</b>	<b>549,0</b>	<b>659,3</b>

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

Anmerkung: Werte auf eine Dezimalstelle gerundet.

Bei den erneuerbaren Energien steigt vor allem die Leistung von Windenergie und PV deutlich an. Im Jahr 2030 sind zur Jahresmitte 199 GW PV, 103 GW Windenergie an Land und 30 GW Windenergie auf See installiert. Der Installationspfad bis 2030 ist hierbei progressiv. Der jährliche Bruttozubaue erhöht sich über die Zeit, sodass ein relevanter Teil der bis 2030 installierten

Leistung in der zweiten Hälfte der 2020er Jahre addiert wird. Nach dem Jahr 2030 wird der Bruttozubaue der PV mit der jährlichen Rate vom Ende der 2020er-Jahre (20 GW) fortgeführt, der Bruttozubaue der Windenergie an Land mit jährlich 6.500 MW, was in etwa dem Durchschnitt der 2020er-Jahre entspricht, und der Bruttozubaue der Windenergie auf See mit 3 GW bzw. 3,5 GW jährlich, um mindestens 40 GW im Jahr 2035 und mindestens 70 GW im Jahr 2045 zu erreichen. Wasserkraft und Geothermie werden über den gesamten betrachteten Zeitraum nur in sehr geringem Maße ausgebaut. Die Kapazitäten der Bioenergien nehmen bis 2025 ebenfalls leicht zu, von 8,6 GW im Basisjahr 2018 auf 9,0 GW im Jahr 2025, um dann im weiteren betrachteten Zeitraum wieder abzusinken, auf 8,5 GW im Jahr 2030 und 4,6 GW im Jahr 2040.

Die Leistung der Pumpspeicher entwickelt sich im KIS-2030 leicht nach oben, von 8,9 GW Turbinenleistung im Jahr 2018 auf 10 GW ab dem Jahr 2030. Die Leistung der Batteriespeicher steigt hingegen mit dem starken Ausbau der PV deutlich an, von 0,2 GW im Jahr 2018 auf knapp über 17 GW im Jahr 2030 und 31 GW im Jahr 2040 (Abschnitt 6.1.4.1).

Das Energiedargebot der variablen erneuerbaren Energien ist neben der installierten Leistung durch die angenommenen Vollbenutzungsstunden bestimmt. Tabelle 17 zeigt die im KIS-2030 verwendeten Werte. Einspeisung und Stromnachfrage sind anhand historischer Daten des Basisjahres 2018 profiliert.

**Tabelle 17: Vollbenutzungsstunden der variablen erneuerbaren Energien im KIS-2030 für ausgewählte Jahre**

Technologie	2025	2030	2035	2040
Speicherwasserkraft	4.000	4.000	4.000	4.000
Laufwasserkraft	3.687	3.687	3.687	3.687
Windenergie an Land	1.888	1.936	2.033	2.098
Windenergie auf See	4.030	4.032	4.036	4.039
Photovoltaik	929	965	974	996

Quellen: Speicherwasser- und Laufwasserkraft: Annahmen Öko-Institut; Windenergie: Öko-Institut et al. (2021); Photovoltaik: BMWi (2021) und Annahmen Öko-Institut

Anmerkungen: Alle Angaben auf ganze Zahlen gerundet.

Die Nettostromerzeugung im KIS-2030 reflektiert die Entwicklung der installierten Leistung. Tabelle 18 schlüsselt die Nettostromerzeugung auf.

**Tabelle 18: Nettostromerzeugung im KIS-2030, 2018-2040**

Technologie	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh				
Kernenergie	71,6	0	0	0	0
Braunkohle	135,9	32,0	0	0	0
Steinkohle	71,8	19,7	0	0	0
Erdgas und Grubengas	79,6	153,3	104,0	52,0	0
Öl	4,0	3,3	1,5	0,9	0,5
Sonstige	18,5	16,1	12,2	9,9	9,0

Technologie	2018	2025	2030	2035	2040
Gichtgas	6,8	5,6	3,4	1,9	1,3
Kokereigas	2,8	2,3	1,4	0,8	0,5
Raffineriegas	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2
Sonstige Gase	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Fossiler Anteil des Abfalls	6,6	5,8	5,3	5,3	5,3
<b>Summe fossile und Kernbrennstoffe</b>	<b>381,4</b>	<b>224,4</b>	<b>117,7</b>	<b>62,8</b>	<b>9,4</b>
Windenergie an Land	88,7	131,9	198,2	257,1	302,9
Windenergie auf See	19,2	41,4	119,5	181,6	215,7
Photovoltaik	45,8	94,5	192,1	278,8	359,1
Biomasse	46,5	41,0	36,1	35,9	36,5
Biogas und Deponie-/Klärgas	31,5	25,5	20,4	20,1	20,8
Feste Biomasse, biogener Anteil des Abfalls	14,5	15,2	15,7	15,7	15,7
Pflanzenöl	0,4	0,3	0	0	0
Lauf- und Speicherwasser	19,0	20,8	20,8	20,9	21,0
Geothermie	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8
<b>Summe Erneuerbare</b>	<b>219,3</b>	<b>329,8</b>	<b>567,3</b>	<b>775,0</b>	<b>936,0</b>
Pumpspeicher	5,0	2,0	12,4	18,4	19,0
Wasserstoff	0	0	0	15,7	38,0
<b>Nettostromerzeugung</b>	<b>605,6</b>	<b>556,3</b>	<b>697,3</b>	<b>870,1</b>	<b>1002,5</b>
Stromhandelssaldo*	-48,7	31,0	16,8	-40,2	-95,9

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

Anmerkung: Werte auf eine Dezimalstelle gerundet. \* Ein positives Vorzeichen zeigt Netto-Importe, ein negatives Vorzeichen Netto-Exporte an.

Der Ausstieg aus der Kernenergie ist im Jahr 2022 abgeschlossen. Entsprechend dem Rückgang der Kapazitäten von Braun- und Steinkohlekraftwerken sinkt auch die Stromerzeugung aus Kohle gegenüber 2018 deutlich ab. Im Jahr 2025 werden insgesamt noch etwas über 50 TWh Kohlestrom eingespeist. Dieser Rückgang von über 155 TWh (etwa 75 %) gegenüber 2018 ist hierbei größer als der Rückgang der installierten Leistung an Kohlekraftwerken (60 % gegenüber 2018) und reflektiert somit auch den deutlich steigenden Preis für Emissionszertifikate im EU ETS (vergleiche Tabelle 9). Entsprechend sinkt auch die Auslastung der verbleibenden Anlagen. Ab dem Jahr 2030 wird keine Kohle mehr verstromt.

Die Stromerzeugung aus sonstigen fossilen Energieträgern (Gichtgas, Kokereigas, Raffineriegas, sonstige Gase, fossiler Anteil des Abfalls) sowie Öl sinkt ebenfalls über den betrachteten Zeitraum ab. Beträgt sie im Basisjahr 2018 noch 18,5 TWh (sonstige fossile Energieträger) bzw. 4 TWh (Öl), so werden im Jahr 2030 nur noch gut 12 TWh (sonstige fossile Energieträger) bzw. 1,5 TWh (Öl) Strom erzeugt und im Jahr 2040 noch 9 TWh (sonstige fossile Energieträger) bzw. 0,5 TWh (Öl). Dies reflektiert für den Fall der Kuppelgase die durch die im KIS-2030 wirkenden Instrumente sinkende Aktivität von Raffinerien und Kokereien sowie die Einführung von neuen

Verfahren in der Stahlerzeugung. Bei den Ölkraftwerken wirken vor allem der steigende CO<sub>2</sub>-Preis im EU ETS und der starke Ausbau der erneuerbaren Energien.

Der deutliche Rückgang des Kohlestroms sowie der Kernenergie und sonstigen fossilen Brennstoffe wird durch eine stark steigende Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken kompensiert. Sie erreicht im Jahr 2025 mit gut 153 TWh ihren Höhepunkt im betrachteten Modellierungszeitraum. Ausgehend von knapp 80 TWh im Jahr 2018 ist dies eine stetige Steigerung um insgesamt knapp 75 TWh (über 90 %). Nach 2025 sinkt die Verstromung von Erdgas wieder ab, auf 104 TWh im Jahr 2030. Dieser deutliche Anstieg und der anschließende Rückgang haben mehrere Gründe. Zum einen wird die deutliche abnehmende Kohlenutzung bei gleichzeitig leicht steigendem Stromverbrauch durch weniger emissionsintensives Erdgas ausgeglichen. Zum anderen erfolgt der Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2030 progressiv, das heißt, der jährliche Bruttozubaue steigt sich in Zeitverlauf. In der ersten Hälfte der 2020er Jahre stehen somit nicht ausreichend erneuerbare Energien zur Verfügung, um den wegfallenden Kohlestrom komplett zu ersetzen. Diese Lücke wird durch Erdgas und Importe gedeckt. Nach dem Jahr 2030 geht die Erdgasverstromung bis 2040 komplett zurück und wird graduell durch Wasserstoff ersetzt.

#### Alternative Entwicklungen zu einer verstärkten Erdgasnutzung

Insbesondere sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das Szenario vor Beginn des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine ausgestaltet worden ist. Dass Erdgas nur eingeschränkt bzw. zu deutlich höheren Preisen verfügbar ist, ist im KIS-2030 nicht reflektiert. Mehrere Alternativen zur verstärkten Erdgasnutzung in den 2020er Jahren sind jedoch denkbar. Diese werden im Folgenden kurz qualitativ skizziert, jedoch nicht mit Modellrechnungen hinterlegt oder bewertet.

- ▶ Erstens könnten höhere Brennstoffpreise, für Erdgas und andere Energieträger, und in der Folge höhere Strompreise deutlichere Anstrengungen bei der Effizienz und gegebenenfalls Suffizienz anreizen, potenziell auch flankiert durch ordnungsrechtliche Regelungen. *Ceteris paribus* könnte somit weniger Strom verbraucht werden und Erdgas eingespart werden.
- ▶ Zweitens könnte der Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland und in Europa weiter forciert werden. Im Sinne der vorliegenden Modellergebnisse würde so die Lücke zwischen dem steigenden Stromverbrauch und der zurückgehenden Kohleverstromung in den 2020er Jahren verringert. Ein ambitionierterer Ausbau der erneuerbaren Energien sowie erhöhte Anstrengungen bei Effizienz und Suffizienz würden sich auch senkend auf die Treibhausgasemissionen auswirken.
- ▶ Drittens könnte verstärkt Kohle genutzt werden. Je nach Brennstoffpreis für Erdgas kann sich eine solche Entwicklung marktlich ergeben, gegebenenfalls ordnungsrechtlich flankiert, indem sich auch bei den angenommenen hohen Zertifikatepreisen im EU ETS Kohle vor Erdgas in der Merit Order liegt. Jene ordnet die kurzfristigen Grenzkosten der Kraftwerke aufsteigend und gibt eine Einsatzreihenfolge am Markt entsprechend der ökonomisch günstigsten Alternative wieder. Bei sehr teurem oder knappen Erdgas wäre tendenziell nicht nur der Einsatz der Kohlekraftwerke umfänglicher, sondern gegebenenfalls auch die Anreize zu ihrer Stilllegung geringer. Weil die Nutzung von Kohle emissionsintensiver ist als die von Erdgas, würden in einem solchen Fall auch mehr Treibhausgase emittiert. Als grobe Faustregel entstehen bei der Verstromung von Kohle etwa doppelt so viele Treibhausgasemissionen pro MWh wie bei der Verstromung von Erdgas.
- ▶ Ein großer Teil der Erdgaskraftwerke entfällt auf die KWK. So sind im Jahr 2025 insgesamt gut 35 GW Erdgas-Leistung am Netz, wovon knapp 24 GW auf KWK-Aggregate entfallen, die Strom und Wärme zugleich erzeugen. Auch wird im Jahr 2025 mit über 116 TWh weit mehr als die

Hälfte der Fernwärme aus Erdgas erzeugt. Dieses umfasst nicht nur die Wärme für Gebäude, sondern auch Prozesswärme auf höheren Temperaturniveaus für die Industrie. Zumindest könnte das verfügbare Erdgas auf KWK-Anlagen konzentriert und bestehende fossile Optionen geprüft werden. In beiden Segmenten – Fernwärme für Gebäude und Industrierwärme in KWK – könnten ebenso Alternativen gefunden werden, etwa eine geringere Nachfrage durch insgesamt höhere Anstrengungen bei der Effizienz, ein nochmals ambitionierterer Ausbau der EE-Fernwärme im Gebäudebereich und eine verstärkte bzw. frühere Nutzung von Strom und Wasserstoff in der Industrie.

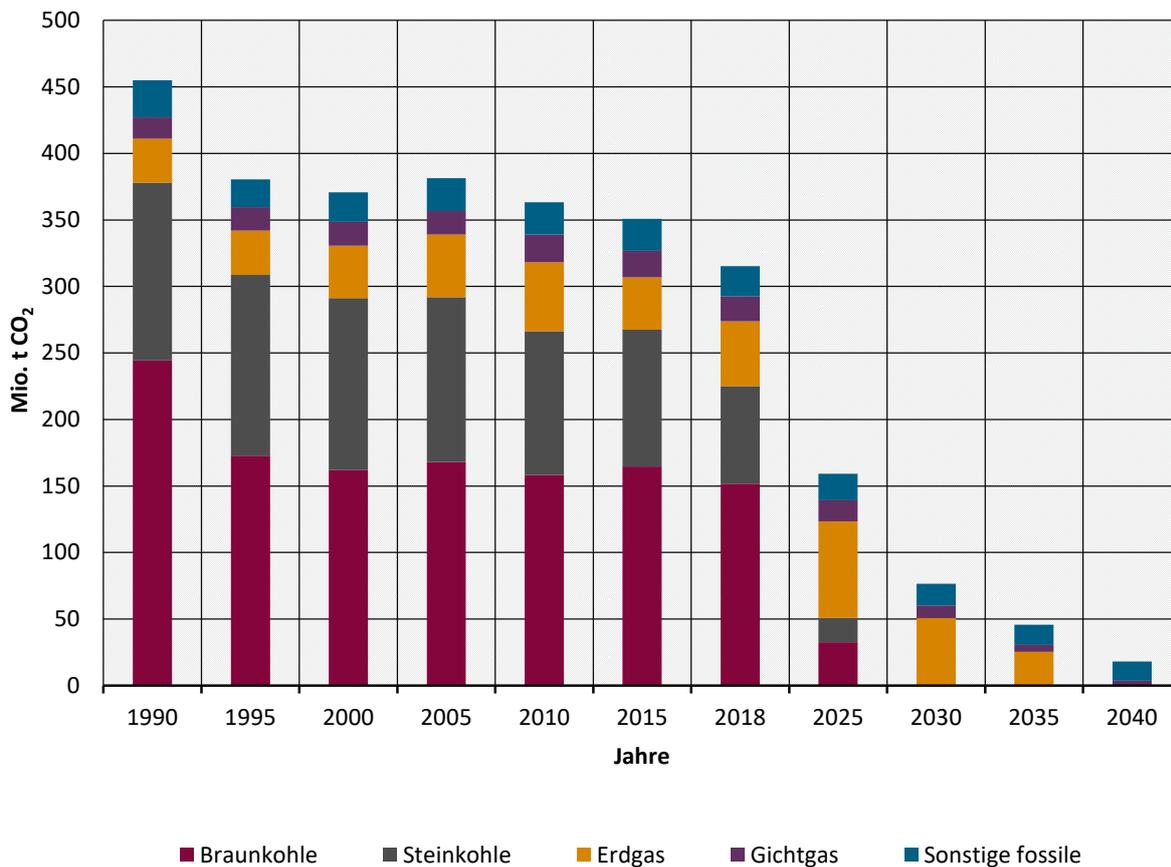
Die Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energien steigt von 219 TWh im Jahr 2018 bis zum Jahr 2025 um 111 TWh (50 %) auf 330 TWh an und bis zum Jahr 2030 um insgesamt 348 TWh (159 %) auf 567 TWh. Dies reflektiert den in den 2020er Jahre progressiven Ausbaupfad von PV und Windenergie. Die Stromerzeugung aus Biomassen sinkt hingegen bis in die 2030er Jahre gegenüber 2018 leicht, aber stetig ab. Dies liegt vor allem an einem Rückgang des für die Energiewirtschaft verfügbaren Biogases. Die Stromerzeugung aus Wasserkraft und Geothermie steigt an, wenn auch wenig merklich. Im Jahr 2030 decken erneuerbare Energien 79 % des Bruttostromverbrauchs und 81 % der Bruttostromerzeugung ab (siehe Tabelle A 5 in Anhang A). Die Abregelung variabler erneuerbarer Energien ist keine entscheidende Stellgröße. Im Jahr 2030 werden 1,5 TWh nicht genutzt, entsprechend 0,3 % des Dargebots an Windenergie und PV.

Mit dem Anteil dargebotsabhängiger Stromerzeugung aus Windenergie und PV steigt auch die Stromerzeugung der Pumpspeicher im KIS-2030 an. Diese hilft, die variabel anfallende Einspeisung der erneuerbaren Energien besser mit der Stromnachfrage in Einklang zu bringen. Beträgt die Nettostromerzeugung der Pumpspeicher im Basisjahr 2018 noch 5 TWh, so sind es im Jahr 2030 über 12 TWh und 19 TWh im Jahr 2040.

Der Stromhandelsaldo folgt im KIS-2030 über den betrachteten Zeitraum einem umgekehrt U-förmigen Verlauf. In Tabelle 18 zeigen negative Werte Netto-*Exporte* und positive Werte Netto-*Importe* an. Exportiert Deutschland im Basisjahr 2018 netto noch knapp 49 TWh Strom in seine Nachbarländer, so liegen im Jahr 2025 Netto-Importe von 31 TWh vor. Diese ersetzen – zusammen mit der höheren Stromerzeugung aus Erdgas – den wegfallenden Kohlestrom, solange die erneuerbaren Energien noch nicht weit genug ausgebaut sind, um den steigenden Stromverbrauch zu decken. Bis zum Jahr 2030 fallen die Netto-Importe wieder auf knapp 17 TWh. Dies ist vor allem dadurch bedingt, dass durch den beschleunigten Ausbau in der zweiten Hälfte der 2020er Jahre wesentlich mehr erneuerbare Energie zur Verfügung steht, um auch den steigenden Stromverbrauch ohne deutliche Importe zu decken. Nach dem Jahr 2030 setzt sich dieser Trend fort und Deutschland wird zum Netto-Exporteur von Strom.

#### 6.1.5.1.3 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke

Die Entwicklung des Strommixes im KIS-2030 beeinflusst die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke. Abbildung 12 stellt die Entwicklung zusammengefasst dar. Tabelle 19 gibt eine detaillierte Übersicht.

**Abbildung 12: CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke nach Energieträgern im KIS-2030, 1990–2040**

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

Die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Kraftwerke, einschließlich der Strom- und Wärmeerzeugung in KWK, sinken von 316 Mio. t CO<sub>2</sub> im Basisjahr 2018 auf gut 159 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 2025, knapp 77 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 2030, knapp 46 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 2035 und 18 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 2040. Gegenüber 1990 entspricht dies einer Minderung von 31 % im Jahr 2018, von 65 % im Jahr 2025, von 83 % im Jahr 2030, von 90 % im Jahr 2035 und von 96 % im Jahr 2040.

Die hier diskutierten Zahlen umfassen sowohl Emissionen von Kraftwerken der öffentlichen Versorgung, die dem KSG-Sektor Energiewirtschaft zugeordnet sind, als auch von Industriekraftwerken, die dem KSG-Sektor Industrie zugeordnet sind. Siehe Abschnitt 7.3 für die dezidierten Befunde zu den Industriekraftwerken.

Im Jahr 2018 stammte mit über 150 Mio. t CO<sub>2</sub> fast die Hälfte der CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Kraftwerke aus der Verfeuerung von Braunkohle sowie mit mehr als 73 Mio. t CO<sub>2</sub> knapp ein weiteres Viertel aus der Verfeuerung von Steinkohle. Mit knapp 49 Mio. t CO<sub>2</sub> bzw. knapp 19 Mio. t CO<sub>2</sub> waren Erdgas und Gichtgas die für die CO<sub>2</sub>-Emissionen nächstrelevanten Brennstoffe.

Aufgrund des zügigen Kohleausstiegs sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Braun- und Steinkohlekraftwerken bis 2025 deutlich ab. Es fallen noch knapp 33 Mio. t CO<sub>2</sub> bzw. etwas über 18 Mio. t CO<sub>2</sub> an, größtenteils bei Kraftwerken der öffentlichen Versorgung. Dies stellt eine Reduktion gegenüber 2018 um fast 79 % bzw. 75 % dar. Die Emissionen aus der Verfeuerung von Erdgas steigen entsprechend der gestiegenen Bedeutung in der Strom- und Wärmeerzeugung bis 2025 hingegen auf fast 73 Mio. t CO<sub>2</sub> an, davon etwas über drei Viertel bei Kraftwerken des Sektors Energiewirtschaft. Diese Steigerung um fast die Hälfte gegenüber 2018 sorgt dafür, dass

Erdgas für 46 % der Gesamtemissionen der Kraftwerke von knapp gut 159 Mio. t CO<sub>2</sub> verantwortlich ist.

Im Jahr 2030 wird keine Kohle mehr genutzt; entsprechend fallen keine CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr an. Die Gesamtemissionen von knapp 77 Mio. t CO<sub>2</sub> entfallen zum größten Teil auf Erdgas. Hier liegt mit knapp 51 Mio. t CO<sub>2</sub>, davon knapp drei Viertel bei Kraftwerken der Energiewirtschaft, gegenüber 2025 aber ebenfalls ein Rückgang vor. In den 2030er Jahren setzt sich dieser Trend fort. Die im Jahr 2040 verbleibenden CO<sub>2</sub>-Emissionen von 18 Mio. t CO<sub>2</sub> stammen vor allem aus den sonstigen fossilen Kraftwerken wie der Müllverbrennung. Erdgas wird nicht mehr eingesetzt.

**Tabelle 19: CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke nach Subsektoren im KIS-2030, 1990–2040**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub>						
<b>Kraftwerke der Energiewirtschaft</b>	<b>386,4</b>	<b>341,1</b>	<b>258,8</b>	<b>117,3</b>	<b>49,1</b>	<b>28,2</b>	<b>11,0</b>
Braunkohle	227,7	165,8	149,0	31,6	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	119,1	120,5	68,6	16,4	0,0	0,0	0,0
Erdgas	17,5	30,3	27,6	55,3	37,3	17,0	0,0
Gichtgas	3,2	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sonstige fossile	18,9	17,7	13,7	14,1	11,9	11,2	11,0
<b>Industriekraftwerke</b>	<b>68,5</b>	<b>40,3</b>	<b>56,4</b>	<b>41,9</b>	<b>27,4</b>	<b>17,5</b>	<b>7,0</b>
Braunkohle	16,7	2,2	2,7	1,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	14,5	3,3	4,8	1,9	0,0	0,0	0,0
Erdgas	15,4	16,8	21,1	17,4	13,5	8,3	0,0
Gichtgas	12,9	11,0	18,8	15,7	9,4	5,2	3,6
Sonstige fossile	8,9	7,0	8,9	6,0	4,6	3,9	3,3
<b>Summe: Kraftwerke der Energie- wirtschaft und Industrie</b>	<b>454,9</b>	<b>381,4</b>	<b>315,2</b>	<b>159,2</b>	<b>76,6</b>	<b>45,7</b>	<b>18,0</b>
Braunkohle	244,4	168,0	151,7	32,6	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	133,7	123,8	73,4	18,3	0,0	0,0	0,0
Erdgas	32,9	47,2	48,7	72,6	50,7	25,4	0,0
Gichtgas	16,1	17,7	18,8	15,7	9,4	5,2	3,6
Sonstige fossile	27,8	24,7	22,6	20,1	16,5	15,1	14,3
Rauchgasentschwefelung (REA)	0,6	1,1	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0
<b>Kraftwerke der Energiewirtschaft und Industrie inkl. REA</b>	<b>455,5</b>	<b>382,6</b>	<b>316,1</b>	<b>159,4</b>	<b>76,6</b>	<b>45,7</b>	<b>18,0</b>

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

Anmerkungen: Werte auf eine Dezimalstelle gerundet. Kleine Abweichungen in der Summe der Kraftwerke im Vergleich zu den Einzelsektoren entstehen durch Rundung der Dezimalstellen.

**6.1.5.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Für das KIS-2030 wurde eine Sensitivitätsrechnung mit einem niedrigeren BEHG-Preis, entsprechend dem Preispfad des MMS des Projektionsberichts 2021, gerechnet (Abschnitt 5.1.1.1). Im Sektor Energiewirtschaft wirkt sich dies in mehrfacher Hinsicht aus, wenn auch jeweils moderat. Zum einen ändern sich die Nachfragen nach Strom, Wärme und Wasserstoff. Insbesondere sinkt der Stromverbrauch, weil mit niedrigerem BEHG-Preis die Nutzung von fossilen Brennstoffen in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr gegenüber der Nutzung von Strom ökonomisch attraktiver wird. So liegt der Bruttostromverbrauch im Jahr 2025 in der BEHG-Sensitivität knapp 1 TWh unter dem des KIS-2030 und im Jahr 2030 etwa 8 TWh niedriger. Aus demselben Grund ist auch die Fernwärmenachfrage in der BEHG-Sensitivität niedriger. Die Nachfrage nach Strom für inländische Elektrolyse ist gegenüber dem KIS-2030 nur wenig verändert. Zum anderen steigt die Stromerzeugung aus Raffineriegas leicht an, weil bei niedrigerem BEHG-Preis die Raffinerien eine höhere Aktivität aufweisen.

**Tabelle 20: Bruttostromverbrauch im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2008-2040**

Sektor	2008	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Industrie	232,6	226,1	229,0	234,3	238,6	244,9
GHD	135,7	148,9	145,5	142,6	142,8	141,3
<i>davon Wärmepumpen</i>	<i>0,0</i>	<i>0,2</i>	<i>1,4</i>	<i>5,3</i>	<i>9,7</i>	<i>12,1</i>
Haushalte	139,5	126,6	119,8	131,6	147,8	151,6
<i>davon Wärmepumpen</i>	<i>0,0</i>	<i>2,4</i>	<i>6,2</i>	<i>24,8</i>	<i>43,0</i>	<i>47,1</i>
Schienenverkehr	16,5	11,5	13,1	14,6	15,6	15,9
Neue Verbraucher im Verkehr	0,0	0,2	30,9	82,1	129,8	161,5
<b>Stromverbrauch Endenergie</b>	<b>524,3</b>	<b>513,3</b>	<b>538,2</b>	<b>605,2</b>	<b>674,7</b>	<b>715,1</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-2,1 %</i>	<i>2,7 %</i>	<i>15,4 %</i>	<i>28,7 %</i>	<i>36,4 %</i>
Summe Endenergie klassische Verbraucher	524,3	510,5	499,8	493,0	492,2	494,5
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-2,6 %</i>	<i>-4,7 %</i>	<i>-6,0 %</i>	<i>-6,1 %</i>	<i>-5,7 %</i>
Summe Endenergie neue Verbraucher im Verkehr	0,0	2,8	38,4	112,2	182,5	220,7
<i>Anteil am Stromverbrauch Endenergie</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,5 %</i>	<i>7,1 %</i>	<i>18,5 %</i>	<i>27,0 %</i>	<i>30,9 %</i>
Raffinerien	6,4	6,1	5,4	4,1	2,8	1,9
H <sub>2</sub> /PtG/PtL für Endverbrauch	0,0	0,0	6,8	40,0	60,4	80,7
Übrige Energiewirtschaft	7,7	6,3	3,7	1,3	1,3	1,4
Leitungsverluste	30,1	26,7	28,2	33,2	37,8	40,9
Pumpstrom	7,9	8,3	2,3	15,0	21,7	22,2
Eigenstromverbrauch Kraftwerke	38,3	34,0	18,5	14,1	14,8	15,6
Elektrodenkessel und Großwärmepumpen	0,0	0,0	1,7	6,2	19,4	30,3

Sektor	2008	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Stromverbrauch Energiewirtschaft</b>	<b>90,5</b>	<b>81,4</b>	<b>66,5</b>	<b>113,9</b>	<b>158,2</b>	<b>193,0</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-10,1 %</i>	<i>-26,5 %</i>	<i>25,8 %</i>	<i>74,8 %</i>	<i>113,3 %</i>
Statistische Differenz*	-6,6	0,0	-0,3	-1,0	-3,3	-1,9
<b>Bruttostromverbrauch</b>	<b>621,4</b>	<b>594,7</b>	<b>605,0</b>	<b>720,1</b>	<b>836,2</b>	<b>910,0</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-4,3 %</i>	<i>-2,6 %</i>	<i>15,9 %</i>	<i>34,6 %</i>	<i>46,4 %</i>

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

Anmerkung: Alle Werte auf eine Dezimalstelle gerundet. \* Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen ergeben sich kleine statistische Differenzen.

Entsprechend dem veränderten, geringeren Strom- und Fernwärmeverbrauch ist die Nettostromerzeugung in der BEHG-Sensitivität geringer als im KIS-2030. Im Jahr 2025 werden 0,7 TWh weniger Strom erzeugt, im Jahr 2030 knapp 3,5 TWh weniger. In allen Jahren wirkt sich dies zum größten Teil in einer geringeren Stromerzeugung aus Erdgas aus. Ebenso liegen die Netto-Importe von Strom unterhalb derer des KIS-2030, im Jahr 2025 mit 0,1 TWh nur wenig, im Jahr 2030 mit über 5 TWh deutlicher.

Die veränderte Stromerzeugung schlägt sich in den CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke nieder. Im Jahr 2025 liegen sie in der BEHG-Sensitivität um etwa 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub> niedriger als im KIS-2030, im Jahr 2030 sind sie um etwa 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub> geringer. Diese Differenz ist vor allem auf die leicht geringere Auslastung der Erdgaskraftwerke zurückzuführen. Tabelle 21 zeigt eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse der BEHG-Sensitivität.

**Tabelle 21: CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke nach Subsektoren im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 1990–2040**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub>						
<b>Kraftwerke der Energiewirtschaft</b>	<b>386,4</b>	<b>341,1</b>	<b>258,8</b>	<b>116,8</b>	<b>47,6</b>	<b>27,3</b>	<b>11,0</b>
Braunkohle	227,7	165,8	149,0	31,5	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	119,1	120,5	68,6	16,3	0,0	0,0	0,0
Erdgas	17,5	30,3	27,6	55,0	35,8	16,1	0,0
Gichtgas	3,2	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sonstige fossile	18,9	17,7	13,7	14,1	11,8	11,1	11,0
<b>Industriekraftwerke</b>	<b>68,5</b>	<b>40,3</b>	<b>56,4</b>	<b>41,9</b>	<b>27,4</b>	<b>17,7</b>	<b>6,9</b>
Braunkohle	16,7	2,2	2,7	1,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	14,5	3,3	4,8	1,9	0,0	0,0	0,0
Erdgas	15,4	16,8	21,1	17,4	13,4	8,5	0,0
Gichtgas	12,9	11,0	18,8	15,7	9,4	5,2	3,6
Sonstige fossile	8,9	7,0	8,9	6,0	4,6	4,0	3,3
<b>Summe: Kraftwerke der Energie-</b>	<b>454,9</b>	<b>381,4</b>	<b>315,2</b>	<b>158,8</b>	<b>75,1</b>	<b>44,9</b>	<b>17,9</b>

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<b>wirtschaft und Industrie</b>							
Braunkohle	244,4	168,0	151,7	32,5	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	133,7	123,8	73,4	18,2	0,0	0,0	0,0
Erdgas	32,9	47,2	48,7	72,3	49,3	24,6	0,0
Gichtgas	16,1	17,7	18,8	15,7	9,4	5,2	3,6
Sonstige fossile	27,8	24,7	22,6	20,1	16,4	15,1	14,3
Rauchgasentschwefelung (REA)	0,6	1,1	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0
<b>Kraftwerke der Energiewirtschaft und Industrie inkl. REA</b>	<b>455,5</b>	<b>382,6</b>	<b>316,1</b>	<b>159,0</b>	<b>75,1</b>	<b>44,9</b>	<b>17,9</b>

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

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

### 6.1.5.3 MMS

Zum Vergleich mit dem KIS-2030 sowie der BEHG-Sensitivität werden an dieser Stelle zentrale Ergebnisse des MMS des Projektionsberichts 2021 angeführt (Öko-Institut et al. 2021). Tabelle 22 zeigt den Bruttostromverbrauch.

**Tabelle 22: Bruttostromverbrauch im MMS, 2008-2040**

Sektor	2008	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Industrie	232,6	226,1	218,4	210,7	207,2	207,9
GHD	135,7	148,9	144,2	138,4	135,0	132,1
<i>davon Wärmepumpen</i>	<i>0,0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,6</i>	<i>1,2</i>	<i>2,6</i>	<i>4,3</i>
Haushalte	139,5	126,6	118,9	115,0	115,4	118,0
<i>davon Wärmepumpen</i>	<i>0,0</i>	<i>2,4</i>	<i>3,3</i>	<i>5,7</i>	<i>10,3</i>	<i>15,2</i>
Schienenverkehr	16,5	11,5	12,7	13,6	13,5	13,3
Neue Verbraucher im Verkehr	0,0	0,2	18,4	47,0	87,8	129,4
<b>Stromverbrauch Endenergie</b>	<b>524,3</b>	<b>513,3</b>	<b>508,7</b>	<b>517,9</b>	<b>546,0</b>	<b>581,1</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-2,1 %</i>	<i>-3,0 %</i>	<i>-1,2 %</i>	<i>4,1 %</i>	<i>10,8 %</i>
Summe Endenergie klassische Verbraucher	524,3	510,5	490,3	470,8	458,2	451,7
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-2,6 %</i>	<i>-6,5 %</i>	<i>-10,2 %</i>	<i>-12,6 %</i>	<i>-13,8 %</i>
Summe Endenergie neue Verbraucher im Verkehr	0,0	2,8	18,4	47,0	87,8	129,4
<i>Anteil am Stromverbrauch Endenergie</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,5 %</i>	<i>3,6 %</i>	<i>9,1 %</i>	<i>16,1 %</i>	<i>22,3 %</i>
Raffinerien	6,4	6,1	5,8	5,2	4,3	3,6

Sektor	2008	2018	2025	2030	2035	2040
H <sub>2</sub> /PtG/PtL für Endverbrauch	0,0	0,0	3,1	15,9	23,7	31,5
Übrige Energiewirtschaft	7,7	6,3	4,7	3,5	2,2	1,1
Leitungsverluste	30,1	26,7	26,5	27,6	29,4	31,5
Pumpstrom	7,9	8,3	4,1	3,0	4,2	3,8
Eigenstromverbrauch Kraftwerke	38,3	34,0	24,9	22,6	18,4	15,4
Elektrodenkessel und Großwärmepumpen	0,0	0,0	1,1	2,1	3,1	5,1
<b>Stromverbrauch Energiewirtschaft</b>	<b>90,5</b>	<b>81,4</b>	<b>70,4</b>	<b>79,8</b>	<b>85,7</b>	<b>92,1</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-10,1 %</i>	<i>-22,2 %</i>	<i>-11,8 %</i>	<i>-5,3 %</i>	<i>1,7 %</i>
Statistische Differenz*	-6,6	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	0,3
<b>Bruttostromverbrauch</b>	<b>621,4</b>	<b>594,7</b>	<b>579,2</b>	<b>597,8</b>	<b>632,0</b>	<b>673,4</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-4,3 %</i>	<i>-6,8 %</i>	<i>-3,8 %</i>	<i>1,7 %</i>	<i>8,4 %</i>

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

Anmerkung: Alle Werte auf eine Dezimalstelle gerundet. \* Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen ergeben sich kleine statistische Differenzen.

Insgesamt ist beim MMS des Projektionsberichts 2021 ein U-förmiger Trend zu erkennen. Der Bruttostromverbrauch sinkt von knapp 595 TWh im Basisjahr 2018 auf gut 579 TWh im Jahr 2025, um dann wieder auf knapp 598 TWh im Jahr 2030 und über 673 TWh im Jahr 2040 anzusteigen. Hier überlagern sich zwei Effekte. Bis Mitte der 2020er Jahre führen vor allem Effizienzgewinne zu einer insgesamt niedrigeren Stromnachfrage. Dieser Effekt wird durch eine weitergehende Elektrifizierung in den Sektoren Gebäude (Wärmepumpen) und Verkehr (batterieelektrische Fahrzeuge) sowie durch zunehmende Stromnachfrage von Elektrolyseuren ab der zweiten Hälfte der 2020er Jahre überlagert.

Tabelle 23 zeigt die Entwicklung der installierten Leistungen zur Stromerzeugung im MMS des Projektionsberichts 2021.

**Tabelle 23: Aufschlüsselung der installierten Nettonennleistung im MMS, 2018-2040**

Technologie	2018	2025	2030	2035	2040
	GW				
Kernenergie	9,5	0	0	0	0
Braunkohle	20,0	14,6	8,8	7,8	0
Steinkohle	21,8	9,7	8,0	0	0
Erdgas	28,0	33,0	35,5	34,3	32,9
Öl	3,3	3,3	3,1	2,9	2,8
Sonstige	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
<i>Gichtgas</i>	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
<i>Kokereigas</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Raffineriegas</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Sonstige Gase</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Abfall</i>	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
<b>Summe fossile und Kernbrennstoffe, Abfall</b>	<b>87,2</b>	<b>65,2</b>	<b>60,0</b>	<b>49,6</b>	<b>40,2</b>
Windenergie an Land	52,4	62,8	71,0	92,0	107,2
Windenergie auf See	6,4	10,5	20,0	32,2	39,8
Photovoltaik	45,2	75,5	100,0	118,2	122,4
Biomasse	8,6	8,9	8,4	6,2	4,6
<i>Biogas und Deponie-/Klärgas</i>	6,7	7,1	6,7	5,2	3,8
<i>Feste Biomasse</i>	1,6	1,6	1,7	1,0	0,8
<i>Pflanzenöl</i>	0,2	0,2	0	0	0
Lauf- und Speicherwasser	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7
Geothermie	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
<b>Summe Erneuerbare</b>	<b>118,1</b>	<b>163,4</b>	<b>205,1</b>	<b>254,5</b>	<b>279,9</b>
Pumpspeicher (Turbinenleistung)	8,9	9,9	10,0	10,0	10,0
Batteriespeicher	0,2	3,8	7,0	10,1	10,5
<b>Summe gesamt</b>	<b>214,4</b>	<b>242,3</b>	<b>282,1</b>	<b>324,2</b>	<b>340,7</b>

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

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

Im MMS des Projektionsberichts 2021 folgt der Kohleausstieg den Vorgaben des Kohlverstromungsbeendigungsgesetzes (KVBG). Bis Ende des Jahres 2038 geht das letzte Kohlekraftwerk vom Netz geht. Im Jahr 2030 sind noch knapp 9 GW Braunkohle und 8 GW Steinkohle installiert. Gaskraftwerke werden im Gegenzug moderat ausgebaut, von 28 GW im Basisjahr 2018 auf über

35 GW im Jahr 2030, bevor die Kapazitäten bis 2040 wieder auf knapp 33 GW sinken. Die erneuerbaren Energien werden entsprechend der Ziele des EEG (Stand September 2020) ausgebaut. Dies führt im Jahr 2030 zu installierten 71 GW Wind onshore, 20 GW Wind offshore, 100 GW PV sowie 8,4 GW Biomassekraftwerken.

Tabelle 24 detailliert die Nettostromerzeugung im MMS des Projektionsberichts 2021.

**Tabelle 24: Aufschlüsselung der Nettostromerzeugung im MMS, 2018-2040**

Technologie	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh				
Kernenergie	71,6	0	0	0	0
Braunkohle	135,9	103,6	63,2	55,0	0
Steinkohle	71,8	57,2	53,6	0	0
Erdgas und Grubengas	79,6	96,1	107,9	102,5	103,0
Öl	4,0	3,6	2,5	1,7	1,6
Sonstige	18,5	17,1	15,9	15,4	15,0
<i>Gichtgas</i>	6,8	6,3	5,9	5,6	5,4
<i>Kokereigas</i>	2,8	2,6	2,4	2,3	2,2
<i>Raffineriegas</i>	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5
<i>Sonstige Gase</i>	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
<i>Fossiler Anteil des Abfalls</i>	6,6	5,8	5,3	5,3	5,3
<b>Summe fossile und Kernbrennstoffe</b>	<b>381,4</b>	<b>277,3</b>	<b>242,6</b>	<b>173,9</b>	<b>118,8</b>
Windenergie an Land	88,7	118,5	137,4	187,1	224,8
Windenergie auf See	19,2	42,1	80,7	130,0	160,5
Photovoltaik	45,8	66,1	90,3	108,5	115,4
Biomasse	46,5	42,4	39,3	34,9	33,1
<i>Biogas und Deponie-/Klärgas</i>	31,5	26,9	23,6	23,7	23,9
<i>Feste Biomasse, biogener Anteil des Abfalls</i>	14,5	15,2	15,7	11,2	9,2
<i>Pflanzenöl</i>	0,4	0,3	0	0	0
Lauf- und Speicherwasser	19,0	20,8	20,8	20,9	21,0
Geothermie	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8
<b>Summe Erneuerbare</b>	<b>219,3</b>	<b>290,2</b>	<b>369,1</b>	<b>482,2</b>	<b>555,7</b>
Pumpspeicher	5,0	3,5	2,6	3,5	3,2
<b>Nettostromerzeugung</b>	<b>605,6</b>	<b>571,3</b>	<b>614,8</b>	<b>660,3</b>	<b>678,5</b>
Stromhandelssaldo*	-48,7	-17,0	-39,6	-46,7	-20,5

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

Anmerkung: Werte auf eine Dezimalstelle gerundet. \* Ein positives Vorzeichen zeigt Netto-Importe, ein negatives Vorzeichen Netto-Exporte an.

Der Ausstieg aus der Kernenergie ist Ende des Jahres 2022 abgeschlossen. Entsprechend dem Rückgang der installierten Leistung reduziert sich auch die Kohleverstromung von insgesamt knapp 208 TWh netto im Basisjahr 2018 auf insgesamt knapp 117 TWh netto im Jahr 2030. Hierbei reduziert sich die Braunkohleverstromung um mehr als die Hälfte und die Steinkohleverstromung um rund ein Viertel. Im Jahr 2035 ist keine Steinkohle mehr in der Versorgung, auch die Stromerzeugung aus Braunkohle reduziert sich weiter, wenn auch gegenüber 2030 moderat. Ende des Jahres 2038 ist der Kohleausstieg abgeschlossen; entsprechend wird 2040 kein Strom aus Kohle mehr erzeugt. Ein Teil des wegfallenden Kohlestroms wird durch Strom aus Erdgas ersetzt. Von knapp 80 TWh netto im Basisjahr 2018 steigt die Erzeugung auf knapp 108 TWh netto im Jahr 2030 an. Bis 2040 fällt sie in der Folge wieder moderat auf 103 TWh netto ab. Die Nettostromerzeugung aus Ölkraftwerken und sonstigen fossilen Brennstoffen nimmt über den betrachteten Zeitraum ebenfalls – moderat – ab, von insgesamt über 22 TWh im Basisjahr 2018 auf knapp 17 TWh im Jahr 2040.

Die Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energien nimmt im Gegenzug deutlich zu. Werden im Basisjahr 2018 noch insgesamt etwas über 219 TWh netto eingespeist, steigert sich dieser Wert auf gut 369 TWh im Jahr 2030 und fast 556 TWh im Jahr 2040. Für das Jahr 2030 ergibt sich insgesamt ein Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch von 63 %.<sup>20</sup> Dies wird maßgeblich durch den Ausbau von Windenergie und PV bewirkt. Hier steigt die Netto-Einspeisung von knapp 89 TWh (Wind onshore), gut 19 TWh (Wind offshore) bzw. knapp 46 TWh (PV) im Basisjahr 2018 auf gut 137 TWh (Wind onshore), knapp 81 TWh (Wind offshore) bzw. gut 90 TWh (PV) im Jahr 2030. In den folgenden Jahren bis 2040 setzt sich dieser Trend fort. Moderate Änderungen über den betrachteten Zeitraum gibt es bei der Stromerzeugung aus anderen erneuerbaren Energien. Während sie für Biomasse leicht zurückgeht, liegt für Wasserkraft und Geothermie jeweils eine kleine Steigerung vor.

Tabelle 25 führt die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke im MMS des Projektionsbereichs 2021 auf.

**Tabelle 25: CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke nach Subsektoren im MMS, 1990–2040**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub>						
<b>Kraftwerke der Energiewirtschaft</b>	<b>386,4</b>	<b>341,1</b>	<b>258,8</b>	<b>201,4</b>	<b>155,8</b>	<b>101,8</b>	<b>45,1</b>
Braunkohle	227,7	165,8	149,0	110,3	63,4	54,5	0,0
Steinkohle	119,1	120,5	68,6	48,4	44,8	0,0	0,0
Erdgas	17,5	30,3	27,6	29,4	35,5	35,1	33,1
Gichtgas	3,2	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sonstige fossile	18,9	17,7	13,7	13,3	12,1	12,2	12,0
<b>Industriekraftwerke</b>	<b>68,5</b>	<b>40,3</b>	<b>56,4</b>	<b>48,8</b>	<b>42,6</b>	<b>38,5</b>	<b>39,7</b>
Braunkohle	16,7	2,2	2,7	1,8	1,0	0,7	0,0
Steinkohle	14,5	3,3	4,8	3,2	2,2	0,0	0,0

<sup>20</sup> Die Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energien im MMS beträgt im Jahr 2030 369,1 TWh. Dies entspricht einer Bruttostromerzeugung von 375,9 TWh, siehe Öko-Institut et al. (2021), Tabelle A.3. Bei einem Bruttostromverbrauch von 597,8 TWh (Tabelle 22) entspricht dies einem Anteil der erneuerbaren Energien von 62,9 %.

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Erdgas	15,4	16,8	21,1	18,9	16,9	16,9	19,5
Gichtgas	12,9	11,0	18,8	17,5	16,5	15,7	15,1
Sonstige fossile	8,9	7,0	8,9	7,4	6,1	5,3	5,2
<b>Summe: Kraftwerke der Energie- wirtschaft und Industrie</b>	<b>454,9</b>	<b>381,4</b>	<b>315,2</b>	<b>250,2</b>	<b>198,4</b>	<b>140,4</b>	<b>84,8</b>
Braunkohle	244,4	168,0	151,7	112,1	64,4	55,2	0,0
Steinkohle	133,7	123,8	73,4	51,6	46,9	0,0	0,0
Erdgas	32,9	47,2	48,7	48,3	52,4	52,0	52,6
Gichtgas	16,1	17,7	18,8	17,5	16,5	15,7	15,1
Sonstige fossile	27,8	24,7	22,6	20,7	18,2	17,5	17,2
Rauchgasentschwefelung (REA)	0,6	1,1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,0
<b>Kraftwerke der Energiewirtschaft und Industrie inkl. REA</b>	<b>455,5</b>	<b>382,6</b>	<b>316,1</b>	<b>250,9</b>	<b>198,8</b>	<b>140,6</b>	<b>84,8</b>

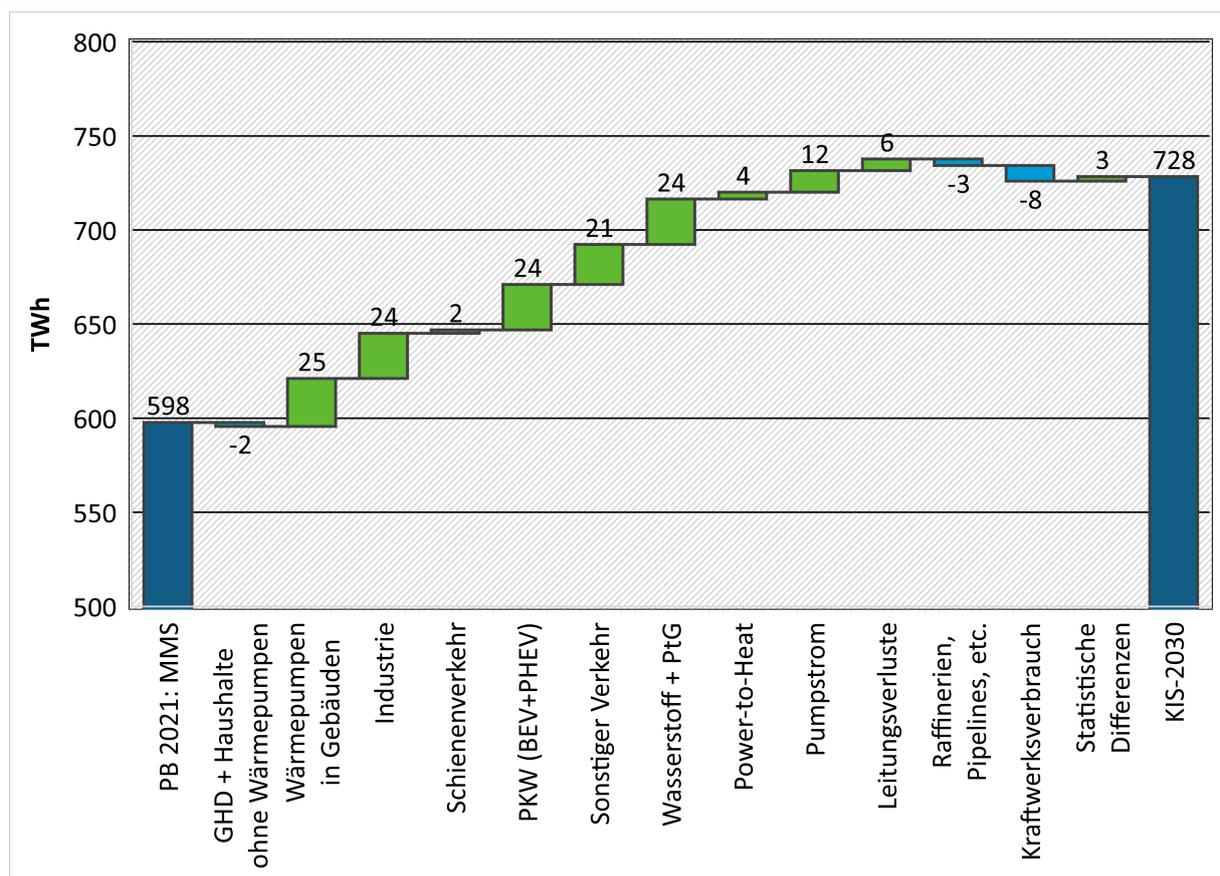
Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

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

Gegenüber dem Basisjahr 2018 fallen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke im MMS des Projektionsberichts 2021 von etwas über 316 Mio. t auf knapp 251 Mio. t im Jahr 2025, knapp 199 Mio. t im Jahr 2030, knapp 141 Mio. t im Jahr 2035 und knapp 85 Mio. t im Jahr 2040. Diese Reduktion geht maßgeblich auf geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Kohlekraftwerken zurück. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Erdgaskraftwerke bleiben über den gesamten betrachteten Zeitraum relativ stabil bei 50 Mio. t, entsprechend ihrer Stromerzeugung um 100 TWh (Tabelle 24).

#### 6.1.5.4 Vergleich der Szenarien

Die Instrumente des KIS-2030 bewirken in Summe gegenüber dem MMS einen deutlichen Anstieg der Stromverbräuche (Abbildung 13). Im Jahr 2030 ist der Bruttostromverbrauch um 130 TWh bzw. 22 % höher als im MMS (728 TWh gegenüber 598 TWh). Es gibt eine Vielzahl zusätzlicher Stromverbräuche; Stromeinsparungen gibt es nur an wenigen Stellen. Während die zusätzlichen Stromverbräuche meistens direkte Effekte von Instrumenten sind, sind die Stromeinsparungen hauptsächlich indirekte Effekte sowie die Wirkung von Effizienzmaßnahmen. Letztere werden aber in den meisten Sektoren durch zusätzliche Elektrifizierung überkompensiert.

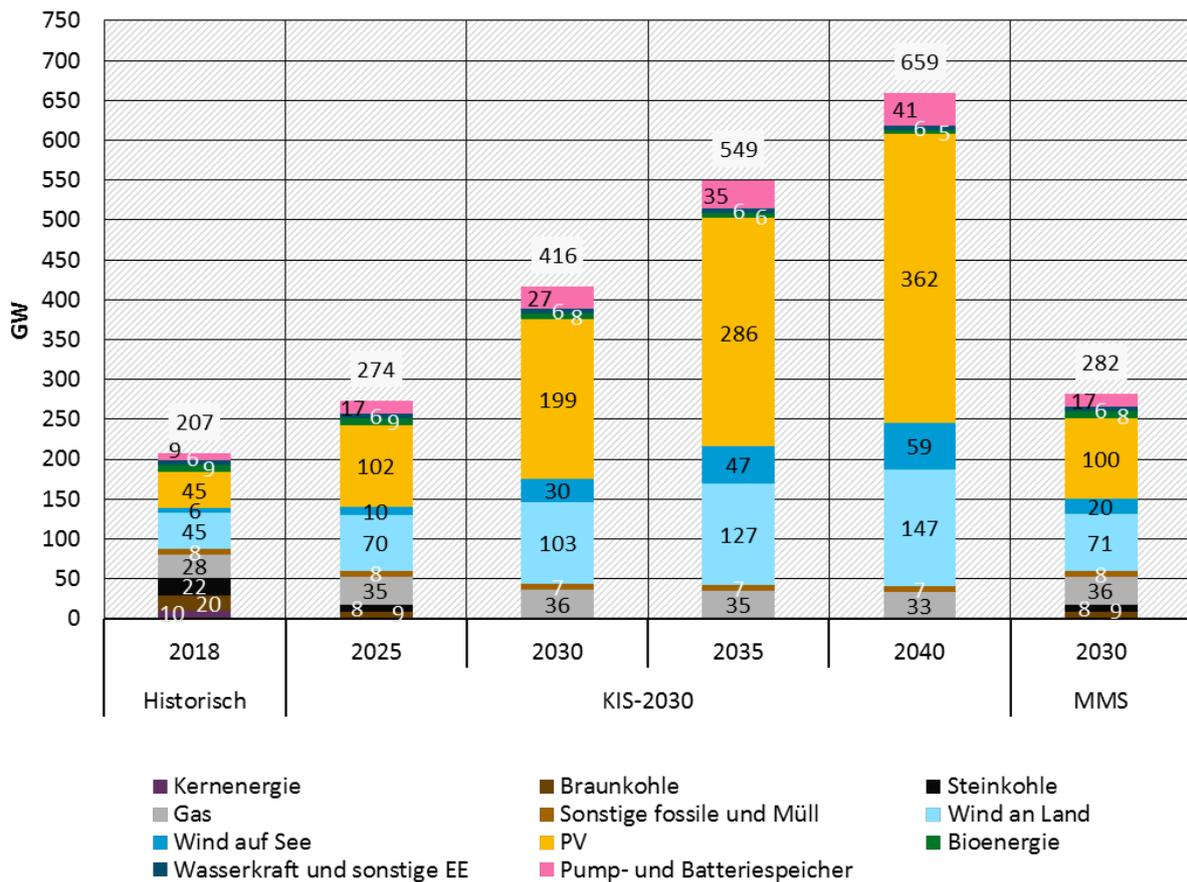
**Abbildung 13: Veränderung des Bruttostromverbrauchs im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2030**

Anmerkungen: Auf ganze Zahlen gerundet. Die Hochachse ist abgeschnitten dargestellt, damit die Effekte besser erkennbar sind.

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

Auch bei der installierten Leistung zur Stromerzeugung unterscheidet sich das KIS-2030 vom MMS des Projektionsberichts 2021. Abbildung 14 zeigt die Entwicklung im KIS-2030 für ausgewählte Jahre und stellt sie für das Jahr 2030 den Ergebnissen des MMS gegenüber.

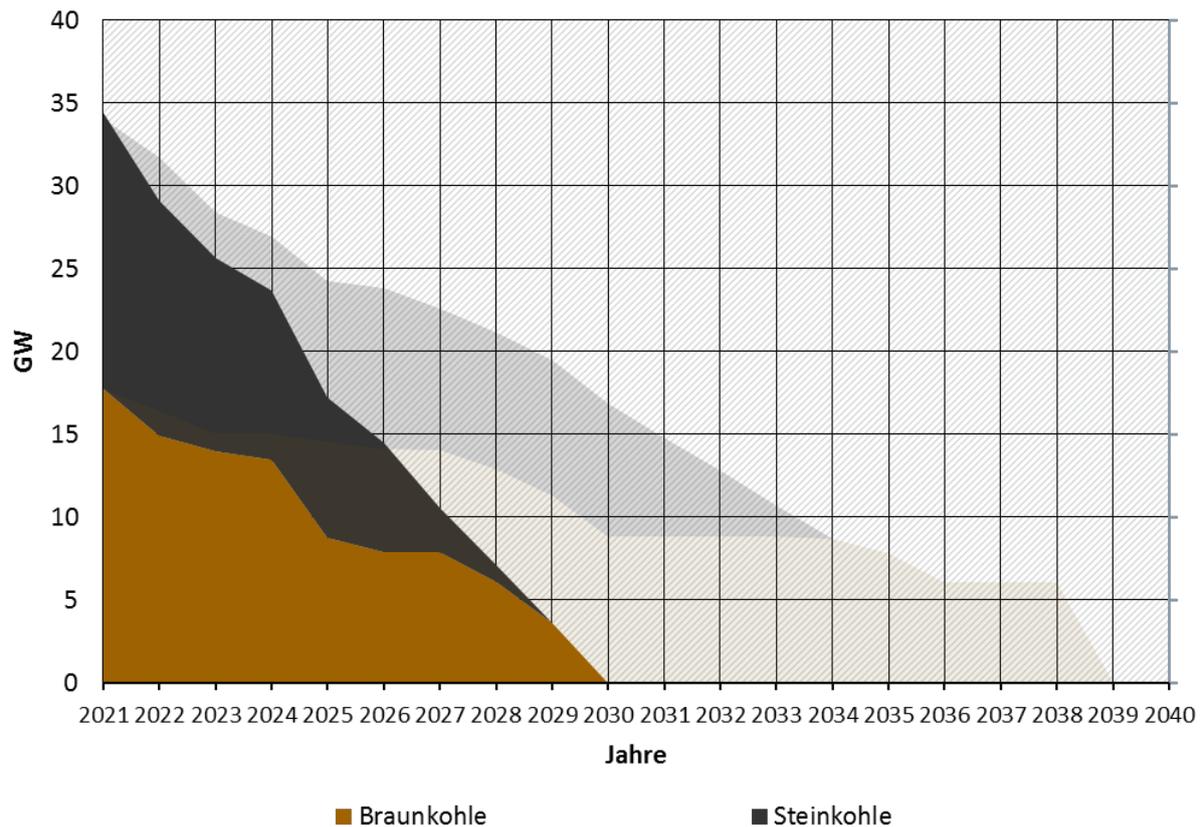
**Abbildung 14: Entwicklung der installierten Leistung im KIS-2030 und Vergleich zum MMS des Projectionsberichts 2021**



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut, Daten für 2018 basierend auf Bundesnetzagentur (2020b), BMWi (2021), Daten für das MMS des Projectionsberichts 2021 basierend auf Öko-Institut et al. (2021).

Die installierten Leistungen unterscheiden sich im KIS-2030 gegenüber dem MMS des Projectionsberichts 2021 vor allem durch den schnelleren Kohleausstieg sowie den zügigeren Ausbau von Windenergie und PV. Sind im MMS im Jahr 2030 noch knapp 9 GW Braunkohle und 8 GW Steinkohle am Netz, ist der Kohleausstieg im KIS-2030 deutlich beschleunigt und Ende des Jahres 2029 abgeschlossen (vergleiche Abschnitt 6.1.4.1). Entsprechend ist auch der Reduktionspfad steiler.

Abbildung 15 stellt die im KIS-2030 jährlich noch vorhandene Leistung der Kohlekraftwerke (Vordergrund) dem Ausstiegspfad des MMS des Projectionsberichts 2021 (schattierte Darstellung im Hintergrund) gegenüber.

**Abbildung 15: Pfad des Kohleausstiegs im KIS-2030 im Vergleich zum MMS des Projektionsberichts 2021 (schattiert im Hintergrund)**

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

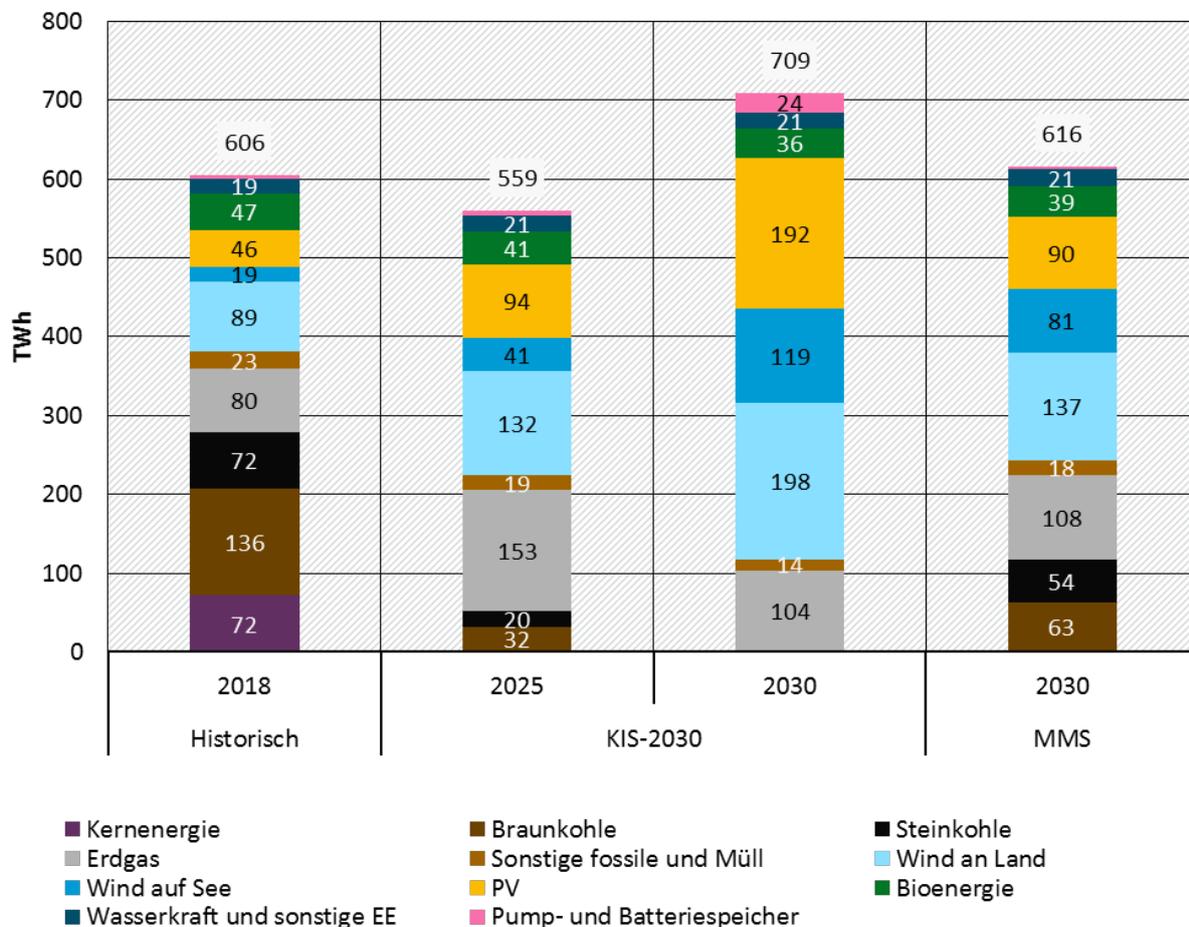
Infolge des zügigeren Kohleausstiegs unterscheiden sich auch die installierten Leistungen der Gaskraftwerke in den 2020er Jahren leicht, da die entsprechenden Kohleersatzanlagen etwas früher errichtet werden. Im Jahr 2030 werden, wie im Projektionsbericht 2021, insgesamt knapp 36 GW erreicht. Im KIS-2030 sind gegenüber dem MMS leicht geringere Kapazitäten von Ölkraftwerken angenommen. Dies liegt an der zurückgehenden Aktivität der Raffinerien infolge des zügigeren Ausbaus der elektrischen Mobilität und der damit einhergehenden niedrigeren Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen. Bei sonstigen fossilen Kraftwerken besteht kein Unterschied in der installierten Leistung zwischen den Szenarien.

Bei den erneuerbaren Energien liegt im KIS-2030 die Leistung von Windenergie und PV (vergleiche Abschnitt 6.1.4.1) deutlich über der des MMS im Projektionsbericht 2021 (vergleiche Abschnitt 6.2.5.3). Im KIS-2030 sind im Jahr 2030 199 GW PV, 103 GW Windenergie an Land und 30 GW Windenergie auf See installiert, gegenüber 100 GW PV, 71 GW Wind onshore und 20 GW Wind offshore im MMS. Aufgrund der progressiven Steigerung des jährlichen Bruttozubaues fällt der Unterschied bis Mitte der 2020er Jahre entsprechend geringer aus. Die Annahmen für Wasserkraft, Bioenergie sowie Geothermie sind gegenüber dem Projektionsbericht 2021 unverändert. Auch die Leistung der Pumpspeicher entwickelt sich im KIS-2030 analog zum Projektionsbericht 2021. Die Leistung der Batteriespeicher liegt im KIS-2030 hingegen deutlich höher, weil ihr Ausbau mit dem der PV verknüpft ist (vergleiche Abschnitt 6.1.4.1). Im Jahr 2030 beträgt der Unterschied etwa 10 GW (17 GW im KIS-2030 gegenüber 7 GW im MMS).

Bei der BEHG-Sensitivität bestehen gegenüber dem KIS-2030 keine Unterschiede in der installierten Leistung.

Entsprechend den Unterschieden bei der Nachfrage, installierten Leistung und auch den Brennstoff- bzw. Zertifikatspreisen (vergleiche Kapitel 4) unterscheidet sich die Zusammensetzung der Stromerzeugung im KIS-2030 deutlich von der im MMS des Projektionsberichts 2021. Abbildung 16 zeigt die Entwicklung im KIS-2030 für einige Jahre sowie einen Vergleich zum MMS für das Jahr 2030.

**Abbildung 16: Vergleich der Nettostromerzeugung im KIS-2030 und im MMS des Projektionsberichts 2021**



Im KIS-2030 wird im Jahr 2030 kein Strom mehr aus Kohle erzeugt, im Gegensatz zu etwa 63 TWh aus Braunkohle und 54 TWh aus Steinkohle im MMS des Projektionsberichts 2021. Die Stromerzeugung aus Gas und sonstigen fossilen Brennstoffen ist im KIS-2030 ebenfalls niedriger, wenn auch nur in geringem Maße.

Die im Vergleich zum MMS fehlende Stromerzeugung bei gleichzeitig höherem Stromverbrauch wird zu einem großen Teil aus Windenergie und PV ersetzt. Hier werden im KIS-2030 bei Wind onshore 61 TWh mehr erzeugt (198 TWh gegenüber 137 TWh), bei Wind offshore 39 TWh mehr (119 TWh gegenüber 81 TWh) und bei PV 102 TWh mehr (192 TWh gegenüber 90 TWh). Die Energie aus Biomasse und sonstigen Erneuerbaren unterscheidet sich hingegen zwischen den Szenarien kaum.

Zudem liegt ein deutlicher Unterschied bei der Speichernutzung und den Netto-Importen vor. Im KIS-2030 werden im Jahr 2030 etwa 20 TWh mehr Strom aus Speichern erzeugt – und entsprechend mehr Strom von Speichern verbraucht. Dies liegt am höheren Anteil von Windenergie und PV, bei denen Speicher helfen, das zeitlich variable Dargebot mit den Zeitpunkten der Nachfrage

in Einklang zu bringen. Die Netto-Importe unterscheiden sich zwischen den Szenarien im Jahr 2030 um 56 TWh. Werden im MMS des Projektionsberichts 2021 noch 40 TWh Strom aus Deutschland exportiert (vergleiche Tabelle 24), werden im KIS-2030 17 TWh Strom importiert (vergleiche Tabelle 18). Die relativ hohen Exporte im MMS liegen vor allem an den noch vorhandenen Kohlekapazitäten in Verbindung mit einem niedrigen CO<sub>2</sub>-Preis im EU ETS von 30 €/EUA und dem niedrigeren Stromverbrauch. Dies reizt eine hohe Auslastung der deutschen Kohlekraftwerke an, auch für den Export. Im KIS-2030 sind im Jahr 2030 keine Kohlekraftwerke mehr am Netz; zudem liegt der Stromverbrauch in Deutschland deutlich höher.

Entsprechend dem unterschiedlichen Strommix unterscheiden sich auch die Treibhausgasemissionen der Kraftwerke zwischen dem KIS-2030 und dem MMS des Projektionsberichts 2021 deutlich. Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse der beiden Szenarien und der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 für CO<sub>2</sub> und weitere Treibhausgase sowie jeweils die Entwicklung gegenüber den Jahren 1990 und 2005.

Im Vergleich zum MMS des Projektionsberichts 2021 sind die Treibhausgasemissionen im KIS-2030 deutlich geringer: im Jahr 2025 um fast 92 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (gut 255 Mio. t im MMS gegenüber knapp 164 Mio. t im KIS-2030), im Jahr 2030 um mehr als 123 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (knapp 203 Mio. t im MMS gegenüber knapp 80 Mio. t im KIS-2030) und im Jahr 2040 um etwas über 68 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (knapp 88 Mio. t im MMS gegenüber knapp 20 Mio. t im KIS-2030). Relativ beträgt im KIS-2030 die Minderung der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 im Jahr 2030 fast 83 %, im MMS des Projektionsberichts nur knapp 56 %. Die deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Szenarien sind vor allem auf die wesentlich geringere Kohleverstromung in allen Jahren des KIS-2030 zurückzuführen.

Die Unterschiede in den Treibhausgasemissionen der Kraftwerke zwischen dem KIS-2030 und der BEHG-Sensitivität sind geringer. So liegen die Emissionen in der BEHG-Sensitivität in jedem Jahr leicht unterhalb derer des KIS-2030: um 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2025, um 1,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 und um 0,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2040. Dieser Unterschied entsteht aus der etwas geringeren Stromnachfrage in der BEHG-Sensitivität und der entsprechend geringeren Stromerzeugung aus Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen. Liegt der Preis für Emissionszertifikate im BEHG niedriger, so ist es in den betreffenden Sektoren relativ gesehen attraktiver, fossile Brennstoffe, etwa für Raumwärme oder im Verkehr, direkt zu nutzen, anstatt auf Strom zurückzugreifen. Die Emissionen fallen dann in den anderen Sektoren an.

**Tabelle 26: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Kraftwerke nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	455,5	382,6	316,1				
MMS				250,9	198,8	140,6	84,8
KIS-2030				159,4	76,6	45,7	18,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				159,0	75,1	44,9	17,9
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,3	0,9	2,7				
MMS				2,2	2,1	2,1	2,2
KIS-2030				2,8	2,0	1,5	1,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				2,8	2,0	1,5	1,1
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	3,5	2,8	2,7				
MMS				2,1	1,6	1,3	0,7
KIS-2030				1,4	0,8	0,6	0,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				1,4	0,8	0,6	0,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	459,3	386,3	321,5				
MMS				255,2	202,6	144,0	87,7
KIS-2030				163,6	79,4	47,8	19,5
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				163,1	77,8	47,0	19,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 1990 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018		-15,9	-30,0				
MMS				-44,4	-55,9	-68,6	-80,9
KIS-2030				-64,4	-82,7	-89,6	-95,8
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-64,5	-83,1	-89,8	-95,8
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 2005 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018			-16,8				
MMS				-33,9	-47,5	-62,7	-77,3
KIS-2030				-57,6	-79,5	-87,6	-95,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-57,8	-79,9	-87,8	-95,0

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030

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

### 6.1.5.5 Bewertung der Instrumente

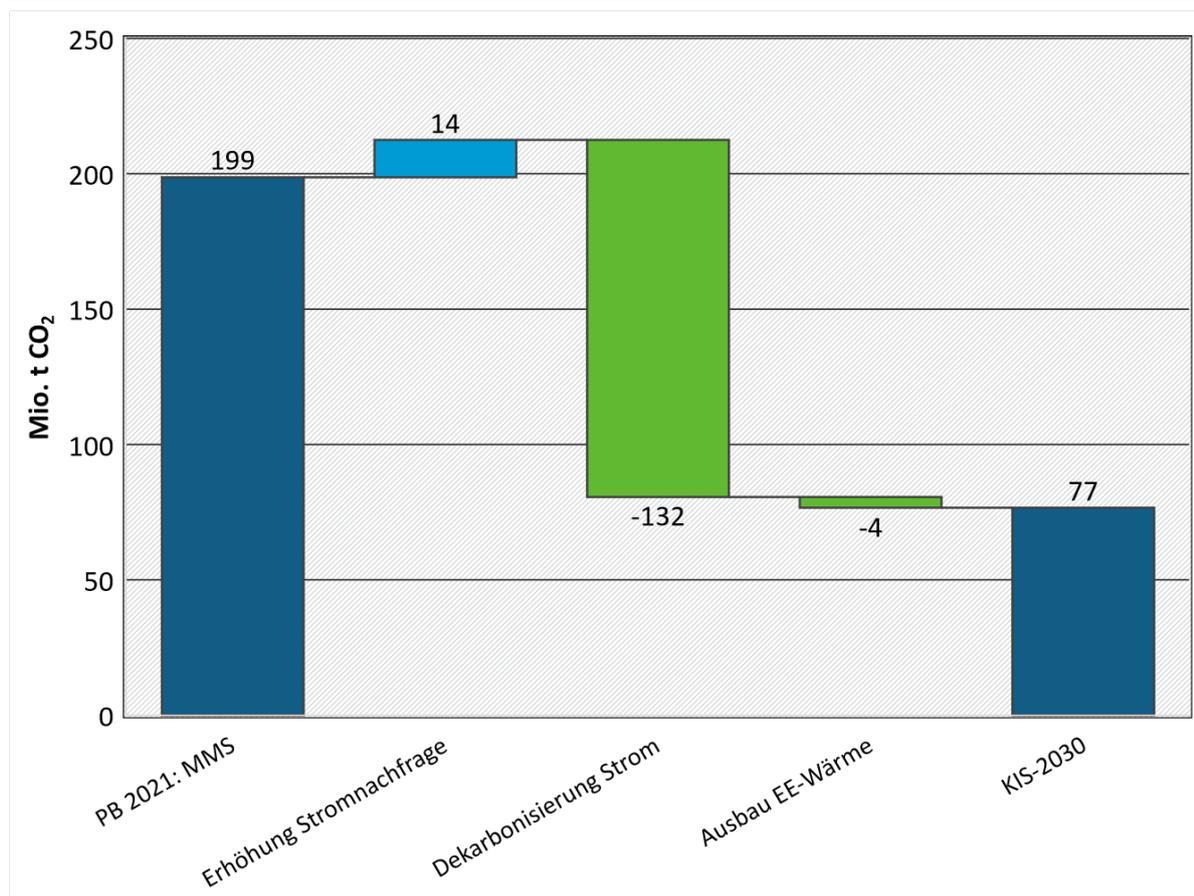
Im Folgenden wird die Bewertung der einzelnen Instrumente dargestellt. Die Instrumente des KIS-2030 werden jeweils gegenüber der *Baseline* des MMS des Projektionsberichts 2021 bewertet. Das heißt, dass etwa die Differenz in den Emissionen berechnet werden, die sich entsprechend den verschiedenen Ausbaupfaden der erneuerbaren Energien im KIS-2030 und im MMS ergeben. Des Weiteren ist eine Reihe von Vorbemerkungen relevant.

- ▶ Die Instrumente und Maßnahmen, die im KIS-2030 die Strom- und Fernwärmeerzeugung beeinflussen (vergleiche Abschnitt 6.1.4.1), sind in hohem Maße komplementär. Dies betrifft vor allem den ambitionierteren Ausbau der erneuerbaren Energien, den Kohleausstieg bis 2030 und den übergreifenden, höheren Preispfad für Zertifikate im EU ETS. Im Design der Instrumente sind daher bereits der Ausbau der erneuerbaren Energien und der Kohleausstieg zusammengefasst als *Anhebung und Beschleunigung des Dekarbonisierungspfades in der Stromerzeugung*. Die Komplementarität besteht vor allem darin, dass der wegfallende Strom aus Kohle maßgeblich durch erneuerbare Energien ersetzt wird. Zudem ist der beschleunigte Kohleausstieg ohne explizite ordnungsrechtliche Instrumente nur mit höheren Zertifikatspreisen im EU ETS plausibel. Eine separate Bewertung dieser Instrumente würde Artefakte schaffen, die nur einen geringen Informationswert enthalten. Für die Bewertung wird daher die *Anhebung und Beschleunigung des Dekarbonisierungspfades in der Stromerzeugung* mit dem höheren ETS-Preispfad zusammengefasst.
- ▶ Die beiden Instrumente, die quantitativ auf den Ausbau der erneuerbaren Fernwärme wirken – die Energieflächenverpflichtung öffentlicher Eigentümer sowie die BEW (vergleiche Abschnitt 6.1.4.1) –, sind ebenfalls als *Ausbau der EE-Wärme* zusammengefasst bewertet. Wie bereits in der Definition der Instrumente ist eine Trennung hier nicht zielführend.
- ▶ Ein Teil der Kraftwerke ist dem Sektor Industrie zugeordnet, wird aber zusammen mit den Kraftwerken des Sektors Energiewirtschaft in PowerFlex modelliert. Bei der Bewertung dargestellt, sind die Emissionen aller Kraftwerke; ein Teil der Minderung durch Instrumente in der Energiewirtschaft fällt also im Sektor Industrie an. Dieser Teil ist nicht separat ausgewiesen.
- ▶ Das Rechenmodell zur Bewertung der einzelnen Maßnahmen umfasst als Treibhausgas nur CO<sub>2</sub>. Entsprechend sind im Folgenden nur CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt. Diese machen aber im Vergleich zu den anderen Gasen den bei Weitem größten Anteil der Treibhausgase aus.
- ▶ Ein wichtiger Treiber für die Emissionen im Sektor Energiewirtschaft ist die Stromnachfrage. Diese wird durch Instrumente in anderen Sektoren beeinflusst, die somit mittelbar in der Energiewirtschaft wirken. Die Änderung der Nachfrage ist im Folgenden als separates „Instrument“ bewertet. Hierbei wird auf den Strom-Erzeugungsmix des KIS-2030 zurückgegriffen, womit der Emissionseffekt der im KIS-2030 höheren Nachfrage relativ gering ist. Ohne den schnelleren Kohleausstieg, ambitionierteren Ausbau der erneuerbaren Energien und höheren Preispfad im EU ETS würden die Emissionen durch höhere Nachfrage deutlich stärker steigen.

- Insgesamt summiert sich die Netto-Emissionsminderung der drei Instrumente (*Anhebung und Beschleunigung des Dekarbonisierungspfades in der Stromerzeugung*, Ausbau der erneuerbaren Wärme, Erhöhung der Stromnachfrage) nicht auf die absolute Differenz der Emissionen zwischen dem MMS des Projektionsberichts 2021 und dem KIS-2030. Gründe hierfür sind veränderte Rahmenbedingungen, wie etwa eine angenommene, etwas ambitioniertere Dekarbonisierung im europäischen Ausland oder Interaktionseffekte zwischen den Instrumenten. Deswegen werden die berechneten Einzelwirkungen der Instrumente so skaliert, dass ihre Summe genau dem in Tabelle 26 dargelegten Delta der CO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht.

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Instrumentenbewertung für das Jahr 2030. Aufgrund der diskutierten Anmerkungen unterliegen den berichteten Ergebnissen einige Freiheitsgrade. Sie sind daher mit der gebotenen Vorsicht zu interpretieren.

**Abbildung 17: Wirkung der einzelnen Instrumente auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke im Jahr 2030**



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

Das wichtigste Instrument ist die *Anhebung und Beschleunigung des Dekarbonisierungspfades in der Stromerzeugung*, also die Kombination aus beschleunigtem Kohleausstieg, beschleunigtem Ausbau der erneuerbaren Energien und einem höheren Preis im EU ETS. Skaliert auf den gesamten Unterschied in den CO<sub>2</sub>-Emissionen entfällt auf dieses Instrument eine Emissionsminderung von etwa 132 Mio. t CO<sub>2</sub>. Der Ausbau der EE-Wärme trägt mit skaliert 4 Mio. t CO<sub>2</sub> zur Emissionsreduktion bei. Die gegenüber dem MMS des Projektionsberichts 2021 im KIS-2030 höhere Nachfrage – der Nettostromverbrauch (ohne Pumpstrom) inklusive der Netzverluste liegt im KIS-

2030 im Jahr 2025 bei rund 700 TWh, im MMS bei rund 572 TWh – verursacht eine kontrafaktische Steigerung der Emissionen der Kraftwerke um 14 Mio. t CO<sub>2</sub>. Dieser Zuwachs ist relativ gering, weil für die Bewertung mit dem CO<sub>2</sub>-ärmeren Strommix des KIS-2030 modelliert wurde.

## 6.2 Übrige Energiewirtschaft

### 6.2.1 Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick

**Tabelle 27: CO<sub>2</sub>-Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 ggü. MMS in der übrigen Energiewirtschaft, 2021-2030**

Maßnahme	Einheit	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
MMS	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	34,8	35,8	35,5	35,3	34,9	34,1	33,4	32,7	31,9	31,1
Wasserstoff in Raffinerien	Mio. t CO <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,5	-0,7	-1,0	-1,3	-1,6	-2,1
Elektrische Verdichter	Mio. t CO <sub>2</sub>	0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Nachfrageänderungen nach Energieprodukten aus anderen Sektoren	Mio. t CO <sub>2</sub>	-0,4	-0,5	-1,2	-2,0	-3,2	-4,1	-5,1	-5,9	-6,9	-7,8
KIS-2030	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	34,4	35,3	34,3	33,1	31,2	29,3	27,3	25,4	23,3	20,9

Quelle: eigene Berechnungen, Öko-Institut

Anmerkungen: Instrumente bewertet gegenüber dem MMS des Projektionsberichts 2021. Wegen der starken Interaktion mit den Kraftwerken, lassen sich Fernwärmemaßnahmen nicht sinnvoll isoliert für die Heizwerke bewerten und daher ohne Heizwerke dargestellt.

### 6.2.2 Methodik

Die Berechnung der Energieverbräuche der übrigen Energiewirtschaft erfolgt für alle drei Szenarien im Wesentlichen der gleichen Methodik, wie sie bereits im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) beschrieben wurde.

Um die zusätzlichen/neuen Maßnahmen bei den Raffinerien und den Erdgasverdichterstationen (siehe Abschnitt 6.2.4.1) abbilden zu können, wurden für die beiden Szenarien KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) folgende methodischen Änderungen vorgenommen:

- ▶ Bei den Raffinerien waren die dortigen Dampfpreformierungsanlagen zur Wasserstoffproduktion aus Erdgas und Öl bisher nicht als einzelner Prozess abgebildet, sondern nur Teil der Raffineriewärmeerzeuger insgesamt. Um die Substitutionswirkung des Elektrolysewasserstoffs auf den Erdgas- und Ölverbrauch der Raffinerien abzubilden, ist die Dampfpreformierung nun explizit abgebildet.
- ▶ Bisher war bei den Verdichtern im Erdgasnetz nur der Verbrauch an Erdgas berücksichtigt. Es gibt aber auch heute schon elektrisch betriebene Verdichter, allerdings lässt sich deren

Verbrauch nicht der Energiebilanz entnehmen.<sup>21</sup> Daher wird für Erdgasverdichter nur der durch die Elektrifizierungsmaßnahme *zusätzliche* Stromverbrauch bilanziert. Der Stromverbrauch der bestehenden Verdichter ist hingegen implizit bei den übrigen Anlagen des Umwandlungssektors enthalten.

- Da im KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) die Wasserstoffnachfrage deutlich höher ist als im MMS, wird nun auch der zusätzliche Aufwand für den Wasserstofftransport berücksichtigt.

### 6.2.3 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Für das KIS-2030 und die BEHG-Sensitivität wurden alle exogene Annahmen des MMS übernommen, wie sie im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) dokumentiert sind. Vom MMS abweichende Annahmen sind im Folgenden beschrieben: Für das KIS-2030 und deren BEHG-Sensitivität wurde die Zeitreihe der installierten Solarthermieranlagen in den Fernwärmenetzen<sup>22</sup> angepasst, um die KIS-Instrumente abzubilden (siehe Tabelle 28).

**Tabelle 28: Installierte Leistung an Solarthermie im KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2025-2040**

Wärmeerzeuger (GW <sub>th</sub> )	2025	2030	2035	2040
Solarthermie	1,1	2,7	4,1	5,5

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Ebenfalls angepasst wurden die mögliche Wärmebereitstellung durch erneuerbare Wärmeerzeuger, um die KIS-2030-Instrumente abzubilden (Tabelle 29).

**Tabelle 29: Wärmebereitstellung durch neue EE-Wärmeerzeuger im KIS-2030, 2025-2040**

Wärmeerzeuger (PJ)	2025	2030	2035	2040
Solarthermie	5	13	19	26
Geothermie	3	30	47	64
Großwärmepumpen	14	41	57	73
Abwärme	3	8	13	18
<b>Summe</b>	<b>26</b>	<b>93</b>	<b>136</b>	<b>180</b>

Quelle: Annahmen und Modellierung Öko-Institut

### 6.2.4 Instrumente und deren Parametrisierung

#### 6.2.4.1 KIS-2030

##### 6.2.4.1.1 Umsetzung der Wasserstoffstrategie in Raffinerien

Das Instrument zielt darauf ab, bisher durch Dampfreformierung hergestellten Wasserstoff durch Wasserstoff aus Elektrolyse (Sektorkopplungstechnologie) zu ersetzen und so direkte Emissionen in den Raffinerien zu reduzieren.

<sup>21</sup> Es gibt keine separate Energiebilanzzeile für die Erdgasverdichterstationen.

<sup>22</sup> Fernwärme wird sowohl über Kraft-Wärme-Kopplungsprozesse in Kraftwerken als auch ungekoppelt in öffentlichen Heizwerken erzeugt, siehe Methodik in Abschnitt 5.1.1.2 des Projektionsberichts (Öko-Institut et al. (2021)).

### Potenzialabschätzung

Im Jahr 2015 Verwendung von 5,2 Mrd. Nm<sup>3</sup> Wasserstoff in Raffinerien für Hydrocracking, Entschwefelung und Hydrierung (ENCON.Europe GmbH 2018). Dies entspricht 15,6 TWh bzw. 56 PJ bei einem Heizwert von 3 kWh/Nm<sup>3</sup>. Allerdings ist die Nachfrage nach Mineralölprodukten stark rückläufig, sodass der Wasserstoffbedarf ebenfalls zurückgehen wird.

### Parametrisierung

Im Bereich der Raffinerien werden im Rahmen der Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie Elektrolyseanlagen für die Deckung der Wasserstoffnachfrage installiert. Der Installationspfad ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

**Tabelle 30: Zusätzliche Elektrolyseure für die Deckung der Wasserstoffnachfrage in den Raffinerien**

Jahr	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030 - 2040
Kapazität in GW	0	0	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,33	1,67	2
Potenzielle Wasserstoffbereitstellung bei 4000 VLh in TWh	0,0	0,0	0,0	0,7	1,4	2,1	2,8	3,7	4,7	5,6

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut

Der Ausbaupfad berücksichtigt, dass die Mineralölnachfrage im Verlauf des Szenarios deutlich rückläufig ist. Daher erfolgt zunächst ein rascher Aufbau bis zum Jahr 2030, danach aber kein weiterer Ausbau. Eventuelle Wasserstoffüberschüsse zum Ende des Modellierungszeitraums stehen der chemischen Industrie zur Verfügung.

#### 6.2.4.1.2 Elektrifizierung der Verdichter im Erdgasnetz

CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch verstärkte Elektrifizierung der Erdgasverdichter im Erdgasnetz als Sektorkopplungstechnologie. Bei neuen Infrastrukturen bzw. dem Aufbau von Wasserstoffnetzen: Verbot von gasverbrauchenden Verdichtern. Potenzialabschätzung: Laut CRF-Tabellen für das Jahr 2018 verbrauchten die Erdgasverdichter der Inventarkategorie 1.A.3.e etwa 23,7 PJ an Erdgas und emittierten 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Die damit verbundene mechanische Antriebsarbeit lässt sich mit einem angenommenen Wirkungsgrad von 35 % für eine Gasturbine mit 8,3 PJ abschätzen. Würden diese Gasturbinen komplett durch Elektromotoren ersetzt werden, würde dies eine zusätzliche Stromnachfrage von 2,3 TWh bzw. 8,3 PJ bedeuten.

### Parametrisierung

„Auf Transportnetzebene stehen in ca. 70 Verdichterstationen um die 233 Verdichter-Einheiten mit einer Nennleistung von ca. 2,4 GW bereit, um Druckverluste im Transportnetz zu kompensieren (FNB Gas 2015)“ (Fraunhofer ISI und DVGW-Forschungsstelle 2019). Für das KIS-2030 wird die Maßnahme so parametrisiert, dass unter Berücksichtigung der Entwicklung des Gasverbrauchs von den bestehenden mit Gasturbinen angetriebenen Verdichtern 10 % bis zum Jahr 2030 und 25 % bis zum Jahr 2040 auf elektrisch angetriebene Verdichter umgerüstet werden. Dies berücksichtigt, dass möglicherweise an einzelnen Standorten das lokale Stromnetz keinen Anschluss so starker und intermittierend arbeitender Verbraucher zulässt. Es sei explizit angemerkt, dass hier ausschließlich eine technische Abschätzung und keine ökonomische Bewertung erfolgen kann. Auch erfolgt die Modellierung ohne explizite Betrachtung einzelner Verdichterstandorte. Für die konkrete Parametrisierung wird sich an die Ergebnisse des zitierten UBA-Forschungsvorhabens zu diesem Thema angelehnt.

Eine Wasserstofftransportinfrastruktur wurde im Rahmen der angewandten Modelle des Projekts Politikszenerarien X nicht modelliert und kann daher auch nicht parametrisiert werden.

#### **6.2.4.2 MMS**

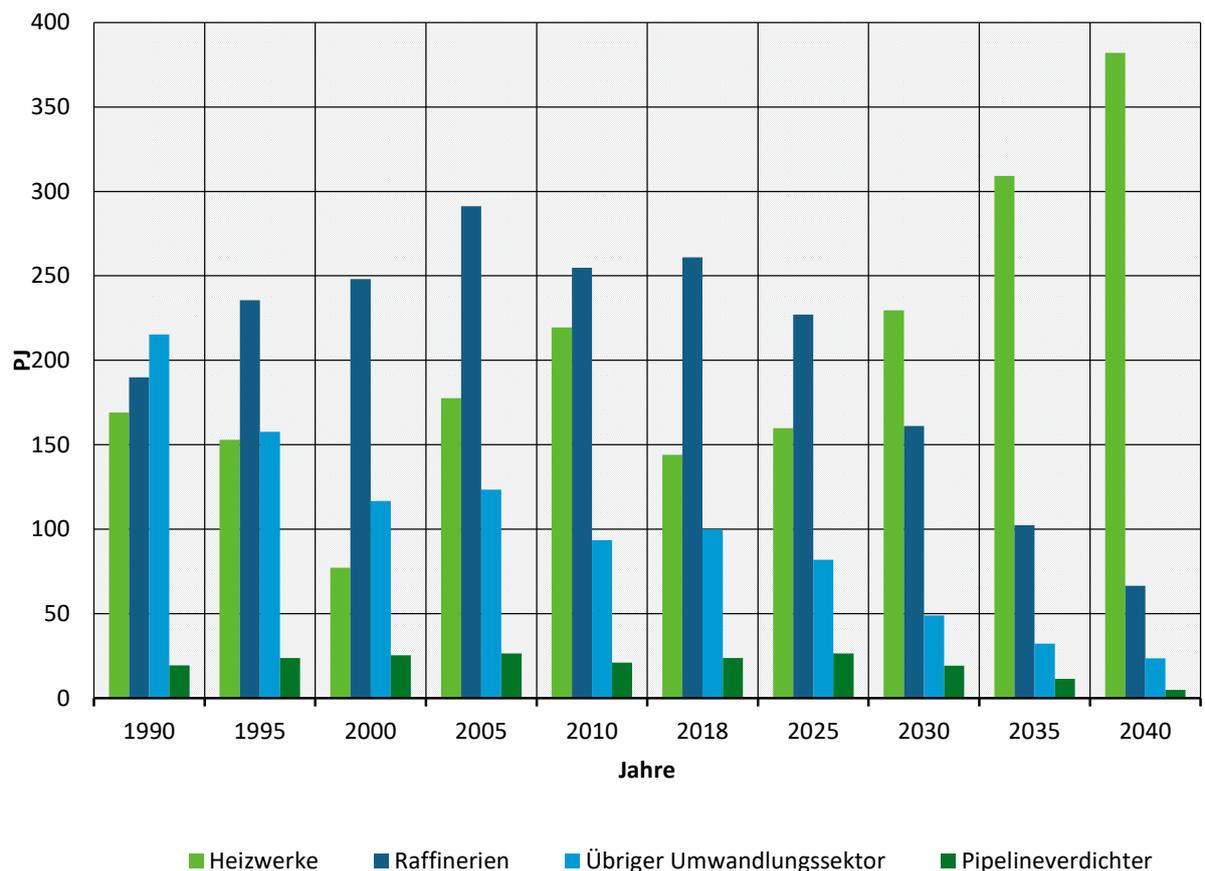
Der Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) enthält keine spezifischen Instrumente für die übrige Energiewirtschaft.

### **6.2.5 Ergebnisse**

#### **6.2.5.1 KIS-2030**

Abbildung 18 zeigt die Entwicklung der Energieeinsätze im KIS-2030 in der übrigen Energiewirtschaft, d.h. allen Umwandlungsanlagen mit Ausnahme der Kraftwerke. Deutlich erkennbar ist, dass sich unterschiedliche Bereiche der übrigen Energiewirtschaft deutlich unterschiedlich entwickeln. Bei den Heizwerken, die sämtliche Formen der ungekoppelten Fernwärmeerzeugung umfassen, verzweieinhalbfacht sich der Energieeinsatz. Der Energieeinsatz überholt zwischen 2025 und 2030 den der Raffinerien, der bislang größte Verbraucher in der übrigen Energiewirtschaft. Dies ist einerseits auf eine veränderte Nachfrage nach netzgebundener Wärme zurückzuführen. Andererseits wird die Wärmeerzeugung in fossilen KWK-Anlagen zunehmend durch ungekoppelte, erneuerbare Wärmequellen ersetzt. Bei Raffinerien, Pipelineverdichtern und sonstigen Anlagen im Umwandlungssektor ist der Energieverbrauch deutlich rückläufig, was mit einem Rückgang des Verbrauchs der entsprechenden Energieträger korreliert (insbesondere Verbrauchsrückgänge von Mineralölprodukten, Erdgas und Koks).

**Abbildung 18: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im KIS-2030, 1990-2040**



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020c; 2020e), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellrechnungen Öko-Institut

Insgesamt geht der Energieeinsatz der übrigen Energiewirtschaft im KIS-2030 zwischen 2018 und 2030 um knapp 15 % zurück. Tabelle 31 listet die Energieeinsätze der einzelnen Subsektoren detailliert auf.

**Tabelle 31: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im KIS-2030, 2018-2040**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
<b>Heizwerke</b>					
Braunkohlen	1	0	0	0	0
Steinkohlen	6	1	0	0	0
Öl	4	4	4	4	4
Erdgas	84	78	64	53	42
Abfall	19	19	19	19	19

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Biogas	1	1	1	1	1
(Feste) Biomasse	25	25	25	25	25
Abwärme	0	3	9	11	13
Umweltwärme über Wärmepumpen	0	14	41	57	73
Geothermie	3	3	30	47	64
Solarthermie	0	5	14	19	24
Strom	0	6	21	67	110
<b>Heizwerke gesamt</b>	<b>144</b>	<b>160</b>	<b>229</b>	<b>303</b>	<b>376</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>11,1 %</i>	<i>58,7 %</i>	<i>110,6 %</i>	<i>160,9 %</i>
<b>Raffinerien</b>					
Öl	63	55	37	10	1
Raffineriegas	124	108	79	53	37
Erdgas	47	33	0	0	0
Kokerei-/Stadtgas	1	1	1	0	0
Wasserstoff	0	5	20	20	17
Fern- und Nahwärme	4	3	3	2	1
Strom	22	19	14	9	7
<b>Raffinerien gesamt</b>	<b>261</b>	<b>224</b>	<b>153</b>	<b>95</b>	<b>62</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-14,1 %</i>	<i>-41,2 %</i>	<i>-63,7 %</i>	<i>-76,1 %</i>
<b>Übriger Umwandlungssektor</b>					
Braunkohlen	7	3	1	0	0
Erdgas	6	5	4	2	0
Gichtgas	19	15	9	5	4
Kokerei-/Stadtgas	8	7	4	2	2
Biogas	20	27	21	13	9
(Feste) Biomasse	6	6	6	6	6
Fern- und Nahwärme	11	6	1	0	0

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Strom	23	13	4	3	3
<b>Übriger Umwandlungssektor gesamt</b>	<b>100</b>	<b>82</b>	<b>49</b>	<b>32</b>	<b>23</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-18,0 %</i>	<i>-50,6 %</i>	<i>-67,8 %</i>	<i>-76,5 %</i>
<b>Pipelineverdichter</b>					
Erdgas	24	26	18	10	3
Strom	0	0	1	1	2
<b>Pipelineverdichter gesamt</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>19</b>	<b>12</b>	<b>5</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>11,2 %</i>	<i>-18,7 %</i>	<i>-51,5 %</i>	<i>-80,1 %</i>
<b>Übrige Energiewirtschaft gesamt</b>	<b>529</b>	<b>492</b>	<b>451</b>	<b>442</b>	<b>466</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-6,8 %</i>	<i>-14,8 %</i>	<i>-16,4 %</i>	<i>-11,8 %</i>

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

Der Energieeinsatz der Heizwerke steigt zwischen 2018 und 2030 um 59 %. Der Einsatz von Kohlen in Heizwerken geht bis 2030 auf null zurück. Der Verbrauch von Erdgas, dem bisher dominierenden Energieträger der Heizwerke geht zwischen 2018 und 2030 um 23 % zurück. Als neue Energieträger kommen Solarthermie, Geothermie, über Wärmepumpen nutzbar gemacht Umweltwärme sowie Strom für Wärmepumpen und Elektrodenkessel hinzu. Diese neuen Energieträger machen im Jahr 2030 zusammen etwa die Hälfte des Energieeinsatzes der Heizwerke aus.

Der Energieeinsatz der Raffinerien geht zwischen 2018 und 2030 um gut 41 % zurück. Die wesentliche Ursache ist hier der Rückgang der Nachfrage nach Mineralölprodukten, insbesondere im Verkehrs- und Gebäudesektor. Dementsprechend ist der Energieeinsatz aller fossiler Energieträger sowie von Strom rückläufig. Der Verbrauch von Erdgas wird bis 2030 sogar auf null reduziert, da die Dampfreformierung zur Herstellung von Wasserstoff in Raffinerien auf per Elektrolyse hergestelltem Wasserstoff umgestellt wird, siehe folgende Tabelle 32. Ab 2038 werden die Elektrolyseure der Raffinerien nicht mehr voll benutzt und stehen somit für eine teilweise Wasserstoffbereitstellung für die chemische Industrie zur Verfügung.<sup>23</sup>

**Tabelle 32: Wasserstoffbedarf in Raffinerien im KIS-2030, in PJ**

Größe	2018	2025	2030	2035	2040
Wasserstoff aus Dampfreformierung	57	45	17	4	0
Elektrolysewasserstoff	0	5	20	20	17
<b>Wasserstoffbedarf insgesamt</b>	<b>57</b>	<b>50</b>	<b>37</b>	<b>24</b>	<b>17</b>

Quelle: Modellrechnungen des Öko-Institut

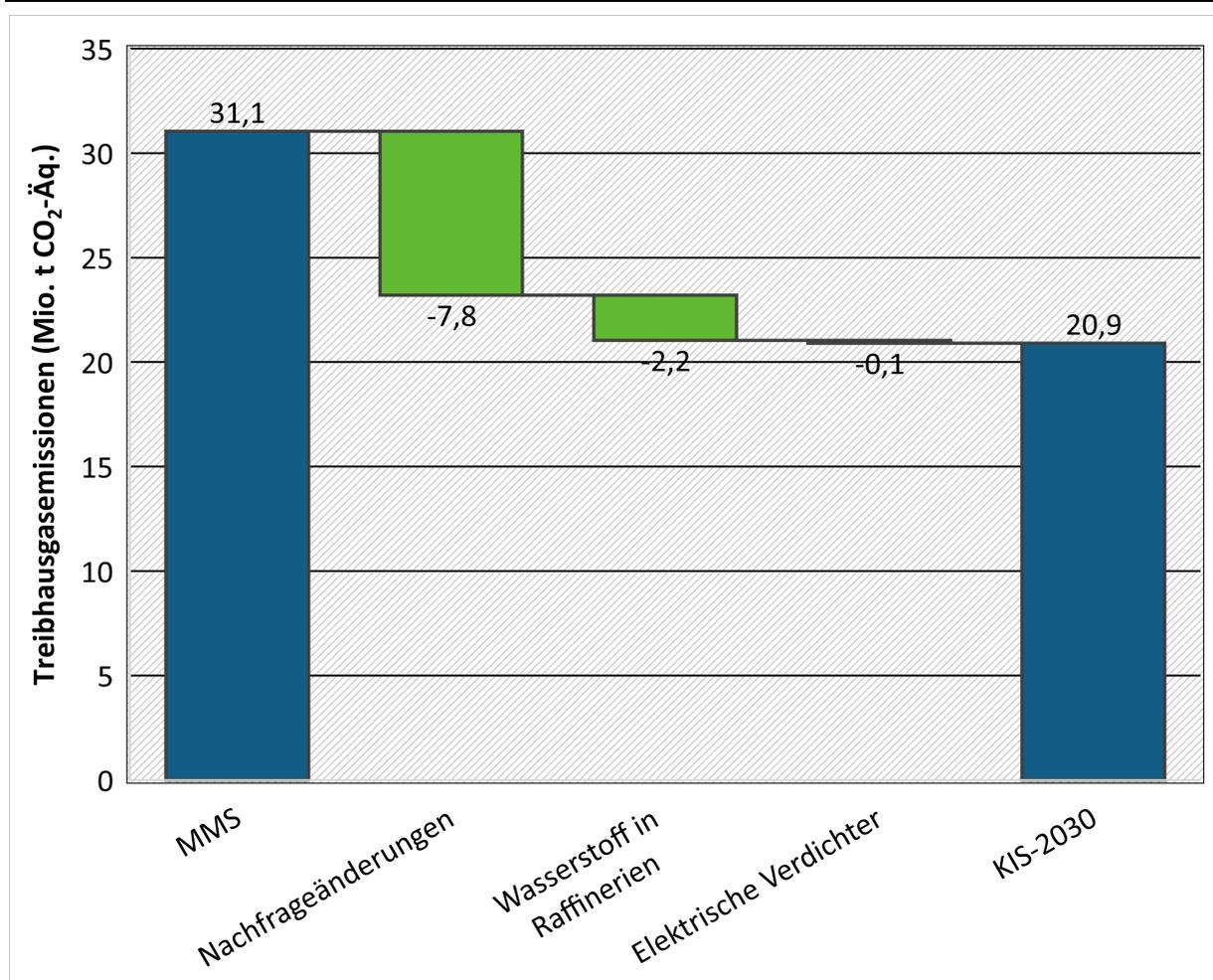
<sup>23</sup> Raffinerien und Chemieindustrieanlagen befinden sich häufig in direkter Nachbarschaft.

Im Subsektor „übriger Umwandlungssektor“ sind unterschiedliche Umwandlungen zusammengefasst. Im Wesentlichen sind dies Kokereien und Brikettfabriken sowie der Eigenverbrauch von Biogasanlagen. Da die Nachfrage nach Koks und anderen Kohleprodukten sowie Biogas rückläufig ist, gehen die Verbräuche sämtlicher Energieträger in diesem Subsektor zurück, zwischen 2018 und 2030 um gut die Hälfte.

Der Energieeinsatz der Pipelineverdichter im Erdgasnetz steigt im KIS-2030 zwar zunächst bis etwa 2025 noch an, sinkt dann aber und liegt dann im Jahr 2030 um 19 % unter dem Ausgangsniveau des Jahres 2018. Zum einen ist der Verbrauch an Erdgas rückläufig. Zum anderen ist der zunehmende Einsatz von elektromotorisch statt über Gasturbinen angetriebenen Verdichtern effizienter.

Die Wirkung der Nachfrageänderungen nach fossilen Energieprodukten (insbesondere nach Mineralölprodukten, Erdgas und Kohleprodukten) sowie der beiden Instrumente Wasserstoff in Raffinerien und Elektrifizierung auf die Treibhausgasemission ist in Abbildung 18 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Nachfrageänderungen nach fossilen Energieprodukten aus anderen Sektoren eine deutlich größere Wirkung haben als die expliziten diesen Subsektor adressierenden Instrumente.

**Abbildung 19: Instrumentenwirkung im Jahr 2030 in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraft- und Heizwerke)**



Quelle: Modellrechnungen des Öko-Institut

Dargestellt sind die Emissionen von Raffinerien, Erdgasverdichtern und übriger Energiewirtschaft, ohne Kraft- und Heizwerke.

**6.2.5.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Veränderte BEHG-Preise haben keine direkten Auswirkungen auf die übrige Energiewirtschaft. Aber durch veränderte Energieverbräuche in anderen Sektoren gibt es indirekte Effekte auf die übrige Energiewirtschaft, die zu leichten Verschiebungen bei einzelnen Energieträgern führen (Nachfrageänderung). Tabelle 33 stellt die Energieeinsätze der übrigen Energiewirtschaft in der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 detailliert dar.

**Tabelle 33: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040**

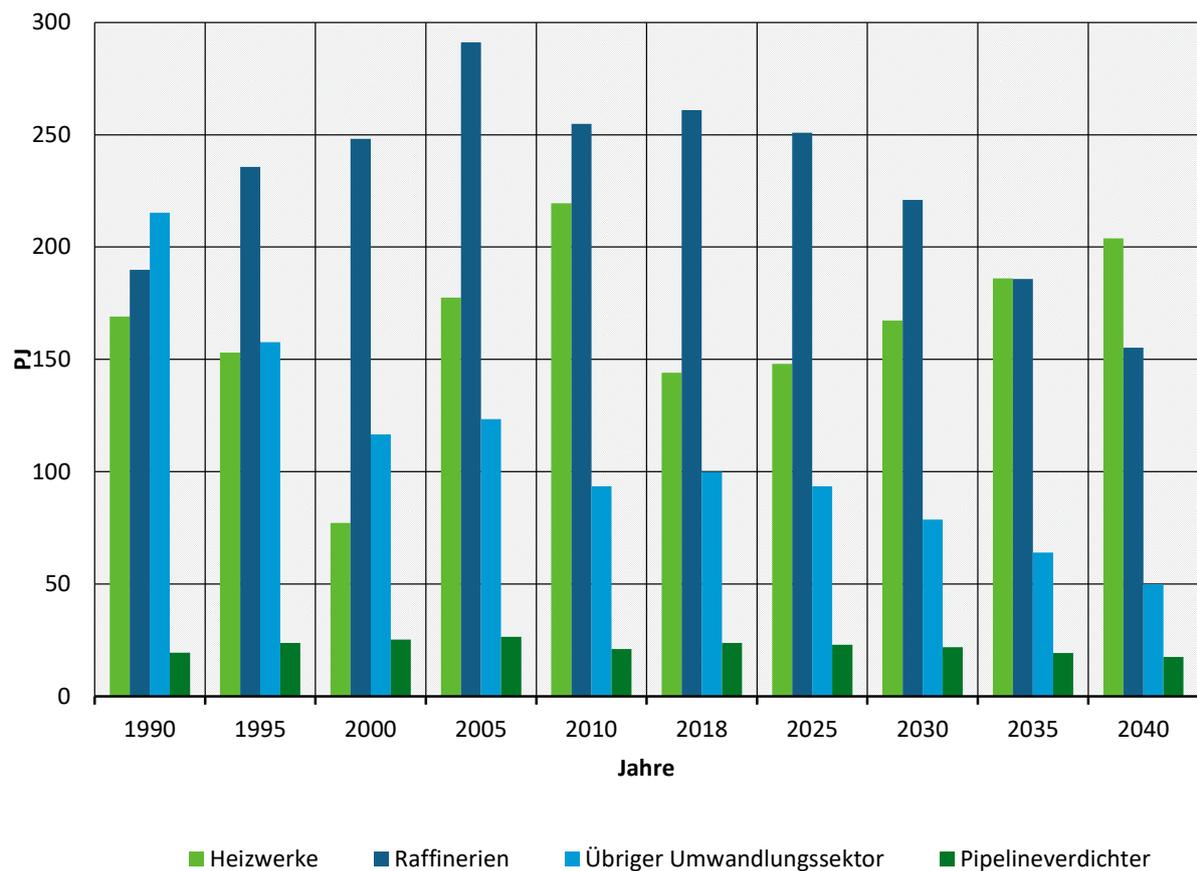
Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
<b>Heizwerke</b>					
Braunkohlen	1	0	0	0	0
Steinkohlen	6	1	0	0	0
Öl	4	4	4	4	4
Erdgas	84	78	64	53	42
Abfall	19	19	19	19	19
Biogas	1	1	1	1	1
(Feste) Biomasse	25	25	25	25	25
Abwärme	0	3	9	13	18
Umweltwärme über Wärmepumpen	0	14	41	57	73
Geothermie	3	3	30	47	64
Solarthermie	0	5	13	20	27
Strom	0	6	22	70	109
<b>Heizwerke gesamt</b>	<b>144</b>	<b>160</b>	<b>230</b>	<b>309</b>	<b>382</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>11,0 %</i>	<i>59,4 %</i>	<i>114,7 %</i>	<i>165,2 %</i>
<b>Raffinerien</b>					
Öl	63	56	40	14	1
Raffineriegas	124	109	83	56	39
Erdgas	47	33	0	0	0
Kokerei-/Stadtgas	1	1	1	1	0
Wasserstoff	0	5	20	20	18
Fern- und Nahwärme	4	4	3	2	1

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Strom	22	19	15	10	7
<b>Raffinerien gesamt</b>	<b>261</b>	<b>227</b>	<b>161</b>	<b>102</b>	<b>66</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-13,0%</i>	<i>-38,3 %</i>	<i>-60,8 %</i>	<i>-74,5 %</i>
<b>Übriger Umwandlungssektor</b>					
Braunkohlen	7	3	1	0	0
Erdgas	6	5	4	2	0
Gichtgas	19	15	9	5	4
Kokerei-/Stadtgas	8	7	4	2	2
Biogas	20	27	21	13	9
(Feste) Biomasse	6	6	6	6	6
Fern- und Nahwärme	11	6	1	0	0
Strom	23	13	4	3	3
<b>Übriger Umwandlungssektor gesamt</b>	<b>100</b>	<b>82</b>	<b>49</b>	<b>32</b>	<b>24</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-18,0 %</i>	<i>-50,9 %</i>	<i>-67,7 %</i>	<i>-76,4 %</i>
<b>Pipelineverdichter</b>					
Erdgas	24	26	18	10	3
Strom	0	0	1	1	2
<b>Pipelineverdichter gesamt</b>	<b>22</b>	<b>27</b>	<b>19</b>	<b>11</b>	<b>5</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>11,7 %</i>	<i>-19,0 %</i>	<i>-52,2 %</i>	<i>-79,7 %</i>
<b>Übrige Energiewirtschaft gesamt</b>	<b>529</b>	<b>496</b>	<b>459</b>	<b>455</b>	<b>477</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-6,3 %</i>	<i>-13,2 %</i>	<i>-13,9 %</i>	<i>-9,8 %</i>

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

### 6.2.5.3 MMS

Abbildung 20 „zeigt die historische und zukünftige Entwicklung des Energieeinsatzes in den unterschiedlichen Bereichen der Energiewirtschaft (mit Ausnahme der Kraftwerke) im MMS. Zwischen 2018 und 2040 nimmt der Energieeinsatz bei den Raffinerien und im übrigen Umwandlungssektor ab“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Abbildung 20: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im MMS, 1990-2040**

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

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

Bedingt durch einen Rückgang der Nachfrage nach flüssigen Kraft- und Brennstoffen über alle Sektoren hinweg (siehe dazu insbesondere die Entwicklung des Primärenergieverbrauch von Mineralöl in [Tabelle 134]) sinkt die Aktivität der Raffinerien. Somit zeigt sich ein Rückgang aller in Raffinerieunterfeuerungen eingesetzten fossilen Brennstoffe wie auch des Strombedarfs der Raffinerien und die Aktivität der (in Kapitel 6.1 enthaltenen) Raffineriekraftwerke. Insgesamt sinkt der Energieverbrauch der Raffinerien (ohne Raffineriekraftwerke) bis 2030 um 15 % und bis 2040 um 40 % gegenüber 2018.

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

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

Insgesamt sinkt der Energieverbrauch der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im MMS bis 2030 um gut 8 % und bis 2040 um knapp 19 % gegenüber dem Jahr 2018“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Tabelle 34: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040**

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

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Erdgas	47	45	40	34	28
Kokerei-/Stadtgas	1	1	1	1	1
Fern- und Nahwärme	4	4	3	3	2
Strom	22	21	18	16	13
<b>Raffinerien gesamt</b>	<b>261</b>	<b>251</b>	<b>221</b>	<b>186</b>	<b>155</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,7 %</i>	<i>-15,3 %</i>	<i>-28,8 %</i>	<i>-40,5 %</i>
<b>Übriger Umwandlungssektor</b>					
Braunkohlen	7	5	3	1	0
Erdgas	6	5	4	2	0
Gichtgas	19	17	16	15	15
Kokerei-/Stadtgas	8	7	7	7	6
Biogas	20	27	25	22	17
(Feste) Biomasse	6	6	6	6	6
Fern- und Nahwärme	11	8	5	3	1
Strom	23	17	12	8	4
<b>Übriger Umwandlungssektor gesamt</b>	<b>100</b>	<b>93</b>	<b>79</b>	<b>64</b>	<b>50</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-6,5 %</i>	<i>-21,2 %</i>	<i>-35,9 %</i>	<i>-50,0 %</i>
<b>Pipelineverdichter</b>					
Erdgas	24	23	22	19	18
<b>Pipelineverdichter gesamt</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>22</b>	<b>19</b>	<b>18</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,5 %</i>	<i>-8,1 %</i>	<i>-18,8 %</i>	<i>-26,2 %</i>
<b>Übrige Energiewirtschaft gesamt</b>	<b>529</b>	<b>515</b>	<b>489</b>	<b>455</b>	<b>427</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-2,5 %</i>	<i>-7,6 %</i>	<i>-13,9 %</i>	<i>-19,3 %</i>

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

#### 6.2.5.4 Vergleich der Szenarien

Einen Vergleich der wesentlichen Treiber der übrigen Energiewirtschaft bietet Tabelle 35. Die Nachfrage nach ungekoppelter Fernwärme als wesentliche Determinante für die öffentlichen Heizwerke ist im KIS-2030 deutlich höher als im MMS und in der BEHG-Sensitivität ab 2030 noch einmal geringfügig höher. Sowohl der Primärenergieverbrauch (PEV) von Mineralölprodukten als auch von fossilen Gasen (worin Erdgas das dominierende ist), liegt im KIS-2030 in

den meisten Szenariojahren unterhalb der entsprechenden Nachfrage für das MMS mit entsprechenden Auswirkungen auf die Raffinerien und die Erdgasverdichterstationen. Bei Gas ist lediglich bis 2025 ein kurzfristiger Anstieg Verbrauch zu verzeichnen, der vor allem durch den Atom- und Kohleausstieg bei den öffentlichen Kraftwerken zu verursacht wird. In der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 sind diese fossilen Nachfragen tendenziell geringfügig höher als im KIS-2030. Die Oygenstahlproduktion ist im KIS-2030 und in der BEHG-Sensitivität durch das Förderprogramm für innovative Produktionsverfahren deutlich niedriger als im MMS<sup>24</sup>; dementsprechend ist auch die Koksnachfrage deutlich niedriger als im MMS.

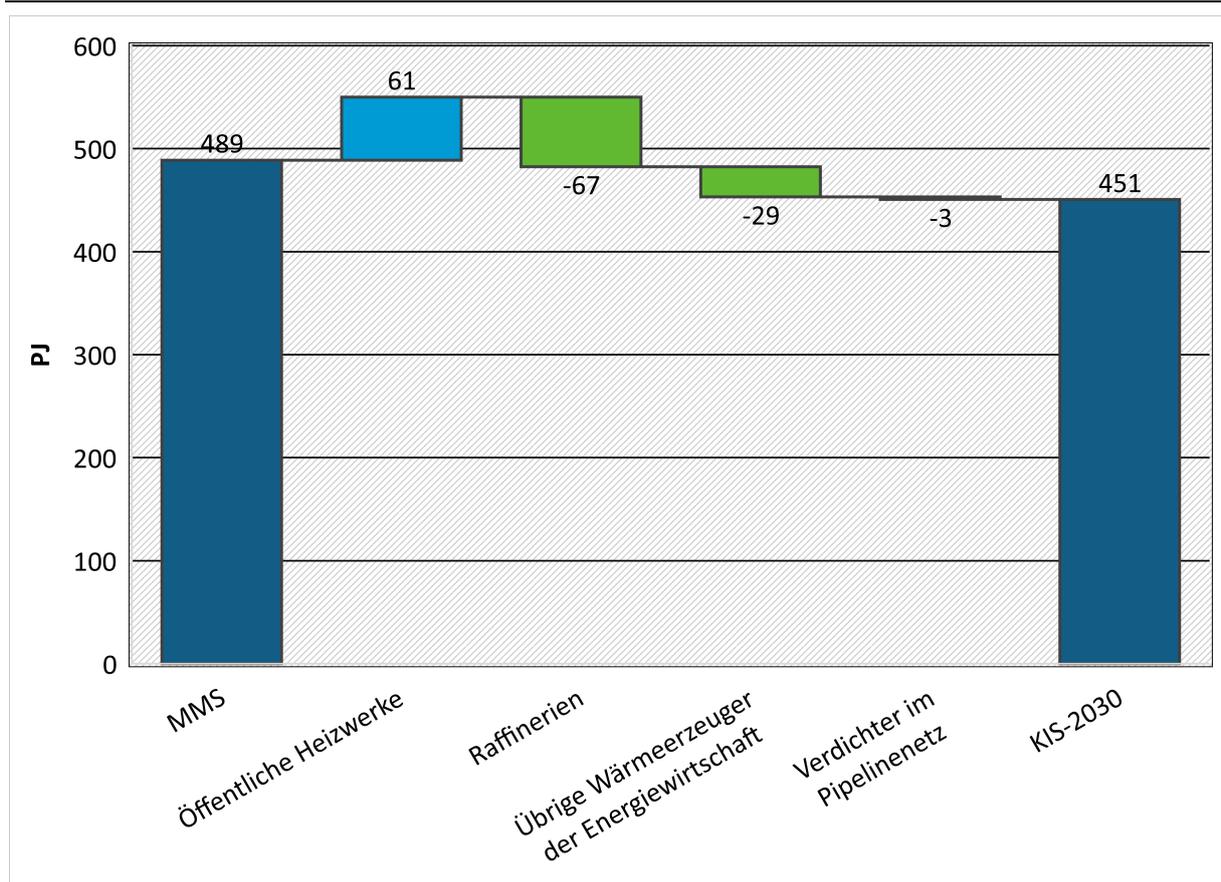
**Tabelle 35: Wesentliche Treiber der übrigen Energiewirtschaft, 2018-2040**

Größe	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Ungekoppelte Fernwärme</b>						
MMS	PJ	116	118	135	151	165
KIS-2030	PJ	116	128	189	260	328
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	PJ	116	128	190	266	334
<b>PEV Mineralölprodukte</b>						
MMS	PJ	4.341	4.151	3.690	3.201	2.785
KIS-2030	PJ	4.341	3.822	2.939	2.143	1.674
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	PJ	4.341	3.863	3.038	2.241	1.740
<b>PEV Fossile Gase</b>						
MMS	PJ	3.114	2.907	2.731	2.434	2.230
KIS-2030	PJ	3.114	3.354	2.417	1.494	764
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	PJ	3.114	3.366	2.416	1.486	766
<b>Oygenstahlproduktion</b>						
MMS	Mio. t	29,7	27,6	26,0	24,8	23,8
KIS-2030	Mio. t	29,7	24,8	14,8	8,2	5,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	Mio. t	29,7	24,8	14,8	8,2	5,7

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021), Modellrechnungen Öko-Institut

Im KIS-2030 wird in der der Übrigen Energiewirtschaft im Jahr 2030 in Summe weniger Energie eingesetzt als im MMS (Abbildung 21). Ein schnellerer Rückgang der Stromerzeugung in thermischen Kraftwerken führt zu einem Rückgang der KWK-Wärmeerzeugung. Dies wird durch mehr ungekoppelte Fernwärmeezeugung kompensiert, wodurch der Energieeinsatz der öffentlichen Kraftwerke im KIS-2030 deutlich höher ist als im MMS. Dieser Anstieg wird aber durch niedrigere Verbräuche in Raffinerien, anderen Wärmeerzeugern der Energiewirtschaft und Verdichtern des Gasnetzes überkompensiert. Diese niedrigeren Verbräuche sind einerseits durch niedrigere Verbräuche nach Energieprodukten verursacht, andererseits wirken hier auch die Maßnahmen zur Elektrifizierung.

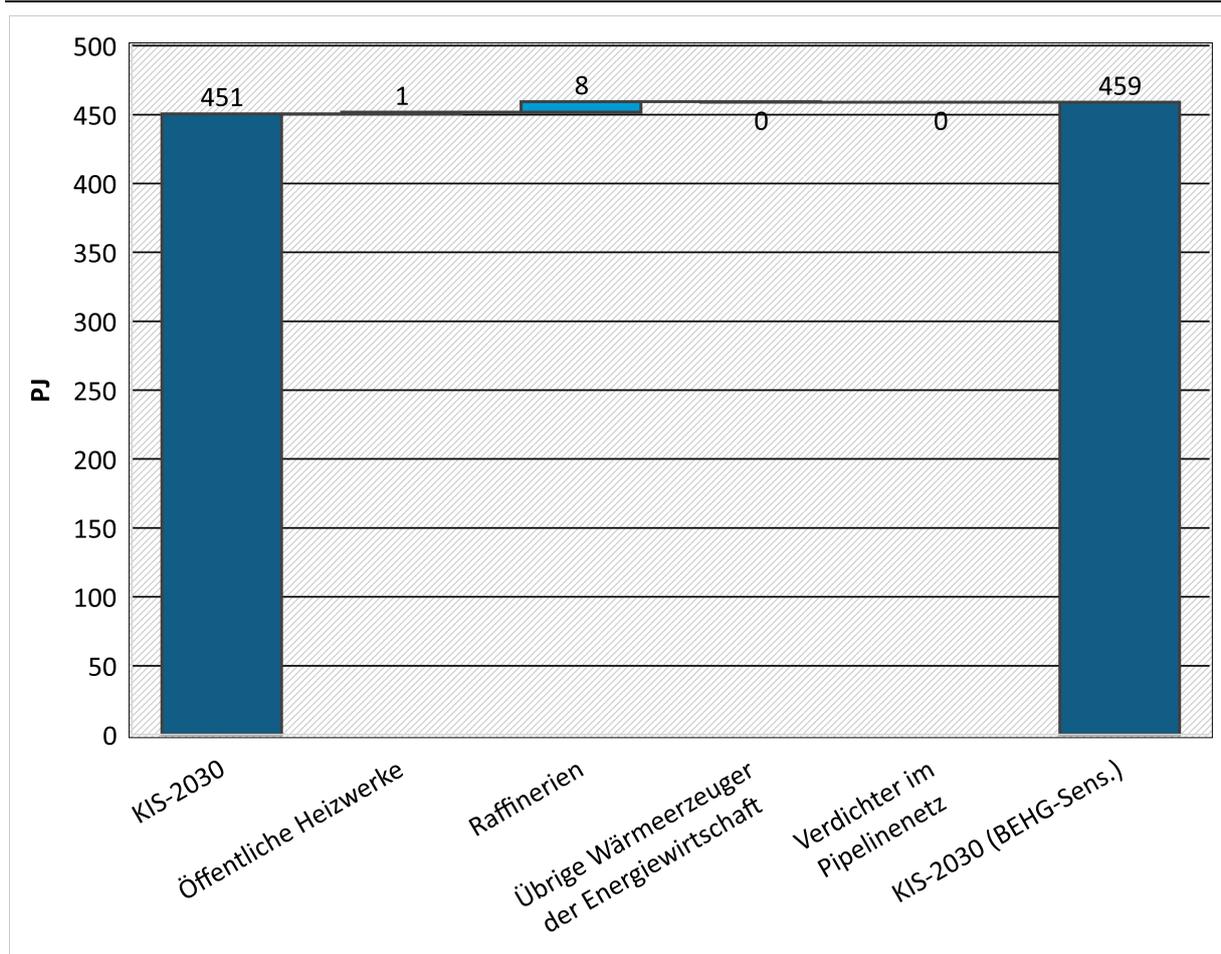
<sup>24</sup> Siehe Abschnitt 7.2.3.1.2 und insbesondere Abbildung 42.

**Abbildung 21: Veränderung des Energieeinsatzes der Übrigen Energiewirtschaft im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2030**

Quelle: eigene Berechnungen des Öko-Instituts

In der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 führt vor allem eine höhere Nachfrage nach Mineralölprodukten zu einer höheren Raffinerieaktivität (Abbildung 22). Zudem ist auch der Energieeinsatz in öffentlichen Heizwerken etwas höher.

**Abbildung 22: Veränderung des Energieeinsatzes der Übrigen Energiewirtschaft im der BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030, 2030**



Quelle: eigene Berechnungen des Öko-Instituts

In Tabelle 36 sind die Emissionen der übrigen Energiewirtschaft im Vergleich der drei Szenarien gegenübergestellt.

**Tabelle 36: Entwicklung der Emissionen der übrigen Energiewirtschaft zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	38,0	35,1	31,7				
MMS				29,6	26,6	23,6	21,1
KIS-2030				27,0	18,2	11,6	8,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				27,2	18,8	12,1	8,3
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,1	0,1	0,2				
MMS				0,2	0,2	0,2	0,2

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
KIS-2030				0,2	0,2	0,1	0,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,2	0,2	0,1	0,1
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,2	0,2	0,2				
MMS				0,2	0,2	0,1	0,1
KIS-2030				0,2	0,1	0,1	0,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,2	0,1	0,1	0,1
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	38,3	35,4	32,1				
MMS				30,0	27,0	23,9	21,3
KIS-2030				27,4	18,5	11,8	8,3
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				27,6	19,1	12,3	8,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
<b>Veränderung ab 1990 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018		-7,4	-16,1				
MMS				-21,6	-29,5	-37,5	-44,2
KIS-2030				-28,4	-51,6	-69,1	-78,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-27,9	-50,2	-67,7	-77,9
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
<b>Veränderung ab 2005 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018			-9,4				
MMS				-15,3	-23,8	-32,4	-39,7
KIS-2030				-22,7	-47,7	-66,6	-76,6
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-22,1	-46,2	-65,1	-76,1

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030

„Zwischen 1990 und 2018 sanken die Emissionen der Übrigen Energiewirtschaft lediglich um 16 % und somit deutlich geringer als die Gesamtemissionen. Während die Emissionen aus Heizwerken und dem übrigen Umwandlungssektor in diesem Zeitraum gesunken sind, sind die Emissionen aus Raffinerien und Erdgaspipelineverdichtern sogar gestiegen. Im MMS sinken die Emissionen über alle Teilbereiche hinweg und liegen dann 2030 knapp 30 % und 2040 gut 44 % unter dem Niveau von 1990“ (Öko-Institut et al. 2021). Im Vergleich dazu sinken die Emissionen im KIS-2030 deutlich schneller und erreichen bereits im Jahr 2030 eine Emissionsminderung von knapp 52 % gegenüber 1990. Die BEHG-Sensitivität führt dazu, dass die Emissionen 2030 um gut einen Prozentpunkt höher liegen als im KIS-2030. „Da die Emissionen der Übrigen Energiewirtschaft zum überwiegenden Teil aus der Verbrennung fossiler Energieträger stammen, dominieren die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einem Anteil von etwa 99 % über den gesamten Zeitraum von 1990 bis 2040. Bei den Anteilen der Methan- und Lachgasemissionen gibt es nur geringe Verschiebungen“ (Öko-Institut et al. 2021).

## 6.3 Diffuse Emissionen aus Brennstoffen

### 6.3.1 Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick

Es gibt im KIS-2030 keine direkt auf die diffusen Emissionen aus Brennstoffen abzielende Instrumente oder Maßnahmen.

### 6.3.2 Methodik

Die Berechnung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen erfolgt für alle drei Szenarien der gleichen Methodik, wie sie bereits im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) beschrieben wurde.

### 6.3.3 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Da es in keinem der Szenarien direkt die diffusen Emissionen aus Brennstoffen adressierenden Instrumente gibt, gibt es keine szenariospezifischen Annahmen und Parameter. Es werden also für alle drei Szenarien die gleichen Annahmen und Parameter verwendet, wie sie bereits im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) beschrieben wurden. Damit ergeben sich alle Unterschiede zwischen den Szenarien auf veränderten Brennstoffnachfragen in anderen Sektoren.

### 6.3.4 Instrumente und deren Parametrisierung

Es gibt in allen untersuchten Szenarien keine direkt auf die diffusen Emissionen aus Brennstoffen abzielende Instrumente oder Maßnahmen.

### 6.3.5 Ergebnisse

#### 6.3.5.1 KIS-2030

Tabelle 37 „zeigt die Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen. Im Zeitraum von 1990 bis 2018 sanken diese Emissionen um 77 % von 37,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf 8,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq“ (Öko-Institut et al. 2021). Es gibt im KIS-2030 zwar keine explizit auf die diffusen Emissionen abzielenden Instrumente oder Maßnahmen, aber viele Instrumente zielen auf eine Verbrauchsreduktion fossiler Energieträger und wirken daher indirekt auch auf die diffusen Emissionen. Hierdurch verbleiben im Jahr 2030 dann nur noch 6,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, was einer Reduktion von 83 % gegenüber 1990 entspricht.

Die wesentlichen Emissionsreduktionen zwischen 2018 und 2030 ergeben sich bei den diffusen Emissionen ergeben sich bereits im MMS (siehe Abschnitt 6.2.5.3). Daher werden im Folgenden nur die Änderungen gegenüber dem MMS beschrieben.

Durch Änderung der Stahlproduktion weg von der Hochofenroute sinkt der Koksbedarf und in Folge auch die bei der Koksproduktion entstehenden diffusen Emissionen von 0,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2018 auf 0,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030. Auch führt der schnellere Rückgang des Braunkohlenabbaus zu einer schnelleren Reduktion der (eher marginalen) Emissionen des Kohlenbergbaus.

Der im KIS-2030 deutlich stärkere Verbrauchsrückgang von Mineralölprodukten und Erdgas hat eine entsprechende Wirkung auf die damit zusammenhängenden diffusen Emissionen in den einzelnen Prozessstufen.

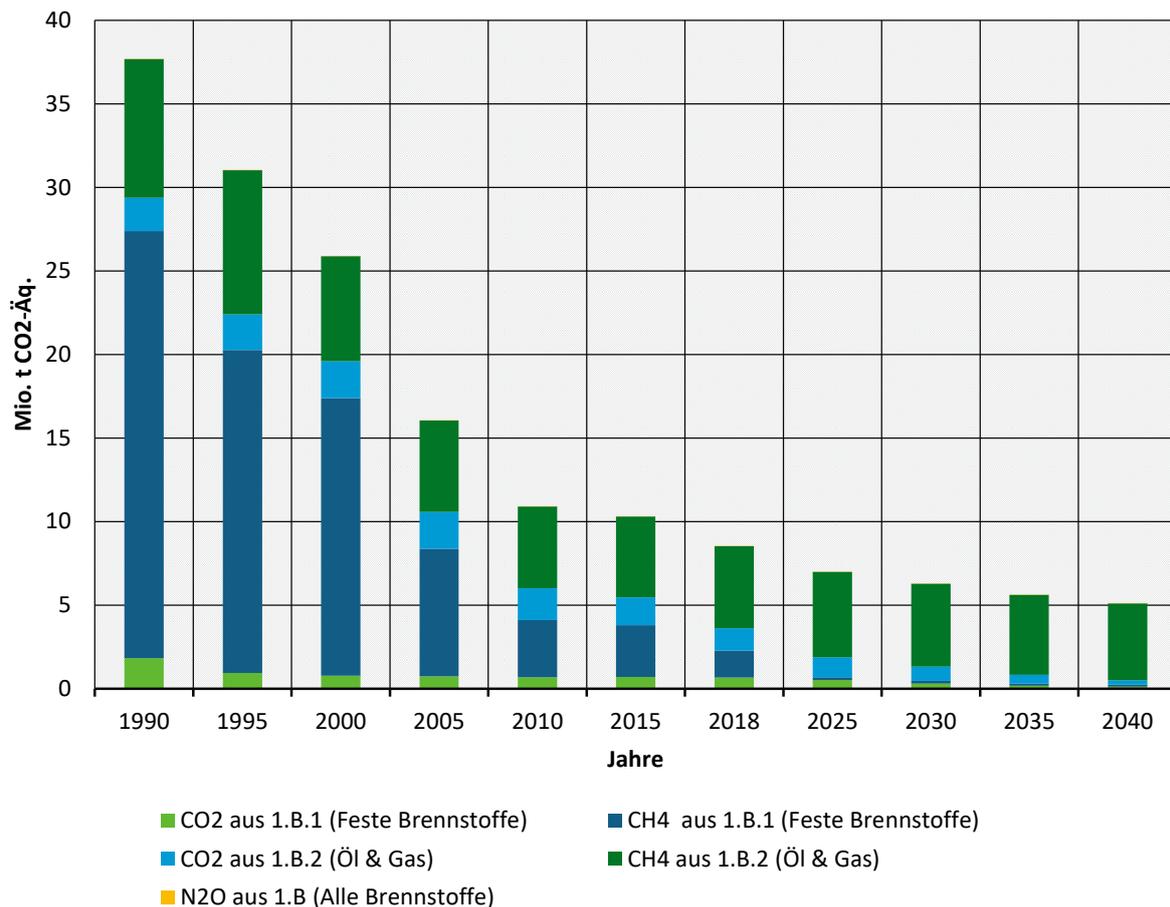
**Tabelle 37: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im KIS-2030, 1990-2040**

	1990	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>						
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Koksproduktion (1.B.1.b)	1,8	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	1,0	0,6	0,5	0,4	0,2	0,0
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>3,8</b>	<b>2,0</b>	<b>1,7</b>	<b>1,2</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>						
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	25,5	1,6	0,1	0,1	0,1	0,1
Koksproduktion (1.B.1.b)	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	8,0	4,8	5,1	4,9	4,7	4,6
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>33,9</b>	<b>6,5</b>	<b>5,3</b>	<b>5,1</b>	<b>4,9</b>	<b>4,7</b>
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>						
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen gesamt</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
<b>CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>						
<b>Diffuse Emissionen gesamt</b>	<b>37,7</b>	<b>8,5</b>	<b>7,0</b>	<b>6,3</b>	<b>5,6</b>	<b>5,1</b>
<i>ggü. 2005</i>	<i>134,8 %</i>	<i>-46,9 %</i>	<i>-56,4 %</i>	<i>-60,8 %</i>	<i>-65,1 %</i>	<i>-68,2 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-77,4 %</i>	<i>-81,5 %</i>	<i>-83,3 %</i>	<i>-85,1 %</i>	<i>-86,4 %</i>

Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

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

In Abbildung 23 ist sowohl die historische als auch die im KIS-2030 projizierte Entwicklung der diffusen Emissionen grafisch dargestellt. Der historische Rückgang der Emissionen wurde im Wesentlichen aus einem Rückgang der Festbrennstoffe verursacht. Der weitere Emissionsrückgang ist im KIS-2030 deutlich langsamer als in der Historie.

**Abbildung 23: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im KIS-2030, 1990-2040**

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

### 6.3.5.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Die Variation der BEHG-Preise hat nur sehr geringe Auswirkungen auf die diffusen Emissionen aus der Brennstoffnutzung. Der Unterschied gegenüber dem KIS-2030 in allen Szenariojahren ist kleiner bzw. gleich 0,02 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Daher wurde darauf verzichtet, diese noch einmal detailliert darzustellen, stattdessen sei auf Tabelle 37 verwiesen. Im Rahmen der dort dargestellten Genauigkeiten gelten diese Emissionswerte auch für die BEHG-Sensitivität.

### 6.3.5.3 MMS

Tabelle 38 „zeigt die Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen. Im Zeitraum von 1990 bis 2018 sanken diese Emissionen um 77 % von 37,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf 8,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Durch weitere deutliche Emissionsminderungen verbleiben im Jahr 2030 noch 6,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, was einer Reduktion von 82 % gegenüber 1990 entspricht. Der weitere Emissionsrückgang ist dann deutlich langsamer, im Jahr 2040 verbleiben 6,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, 84 % niedriger als 1990.

Im Jahr 1990 war die bedeutendste Emissionsquelle der Kohlenbergbau mit 25,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, vor allem verursacht durch Methanemissionen. Bis zum Jahr 2018 sind diese Emissionen bereits um fast 94 % auf nur noch 1,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq zurückgeführt worden. Aufgrund der kompletten Rückführung des deutschen Steinkohlenbergbaus bis zum Ende des Jahres 2018 betragen die Emissionen im Jahr 2030 nur noch 0,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, ein Rückgang um über 99 % gegenüber 1990. Die verbleibenden Emissionen aus den stillgelegten Zechen sinken nach 2030 [...] kaum [noch]. Braunkohlentagebaue hingegen haben nur sehr geringe diffuse Emissionen. Die Emissionen aus der Koksproduktion [sinken] von 1,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (1990) um 62 % auf 0,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (2018). Im Szenarioverlauf sinken

diese Emissionen durch eine geringe Koksnachfrage in der Stahlproduktion auf [0,525] Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2040 ab.

Die diffusen Emissionen aus der Förderung, Verarbeitung und Verteilung von Erdgas stiegen von 9,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 1990 zunächst auf 11,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 1993 an und fielen anschließend auf 5,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2018. Bis zum Jahr 2030 ändern sich diese Emissionen nur geringfügig, bis 2040 sinken sie aber leicht und liegen mit 4,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2040 um 46 % niedriger als 1990. Ursache für diese vergleichsweise konstanten Emissionen sind zwei gegenläufige Trends: Deutlich rückläufige Emissionen sind einerseits durch eine rückläufige Erdgasförderung und damit verbundene Gasaufarbeitung und andererseits durch sinkende Erdgasverbräuche zu erwarten. Andererseits führt ein Ausbau des Erdgasnetzes zu einem leichten Anstieg der dortigen diffusen Emissionen.

Förderung, Verarbeitung und Verteilung von Öl trägt nur in geringem Umfang zu diffusen Emissionen aus Brennstoffen bei. Hier sanken die Emissionen von 0,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 1990 auf 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2018 und werden auf 0,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2040 sinken. Ähnliches gilt für die Emissionen aus Abfackelung und Belüftung: Hier sanken die Emissionen von 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (1990) auf 0,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (2018) und werden leicht auf 0,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (2040) absinken.

Insgesamt zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Anteile der unterschiedlichen fossilen Brennstoffe an den diffusen Emissionen. Wurden 1990 noch 73 % der diffusen Emissionen durch Kohle und Koks verursacht, sank dieser Anteil bis 2018 auf 27 % und im Jahr 2040 wird er bei nur noch 11 % liegen. Erdgas steigerte seinen Anteil hingegen von 24 % im Jahr 1990 auf 64 % im Jahr 2018 und wird im Jahr 2040 mit einem Anteil von 81 % die diffusen Emissionen dominieren. Der Anteil von Öl an den diffusen Emissionen stieg von 2 % (1990) auf 6 % (2018) und wird mit einem Anteil von 5 % (2040) eine ähnlich untergeordnete Bedeutung behalten. Ähnlich stieg der Anteil von Abfackelung und Belüftung von 1 % (1990) auf 4 % (2018), [bleibt] aber bis zum Jahr 2040 in etwa bei diesem Anteil“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Tabelle 38: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2040**

	1990	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>						
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Koksproduktion (1.B.1.b)	1,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	1,0	0,6	0,5	0,4	0,2	0,0
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>3,8</b>	<b>2,0</b>	<b>1,8</b>	<b>1,5</b>	<b>1,2</b>	<b>1,0</b>
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>						
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	25,5	1,6	0,2	0,1	0,1	0,1

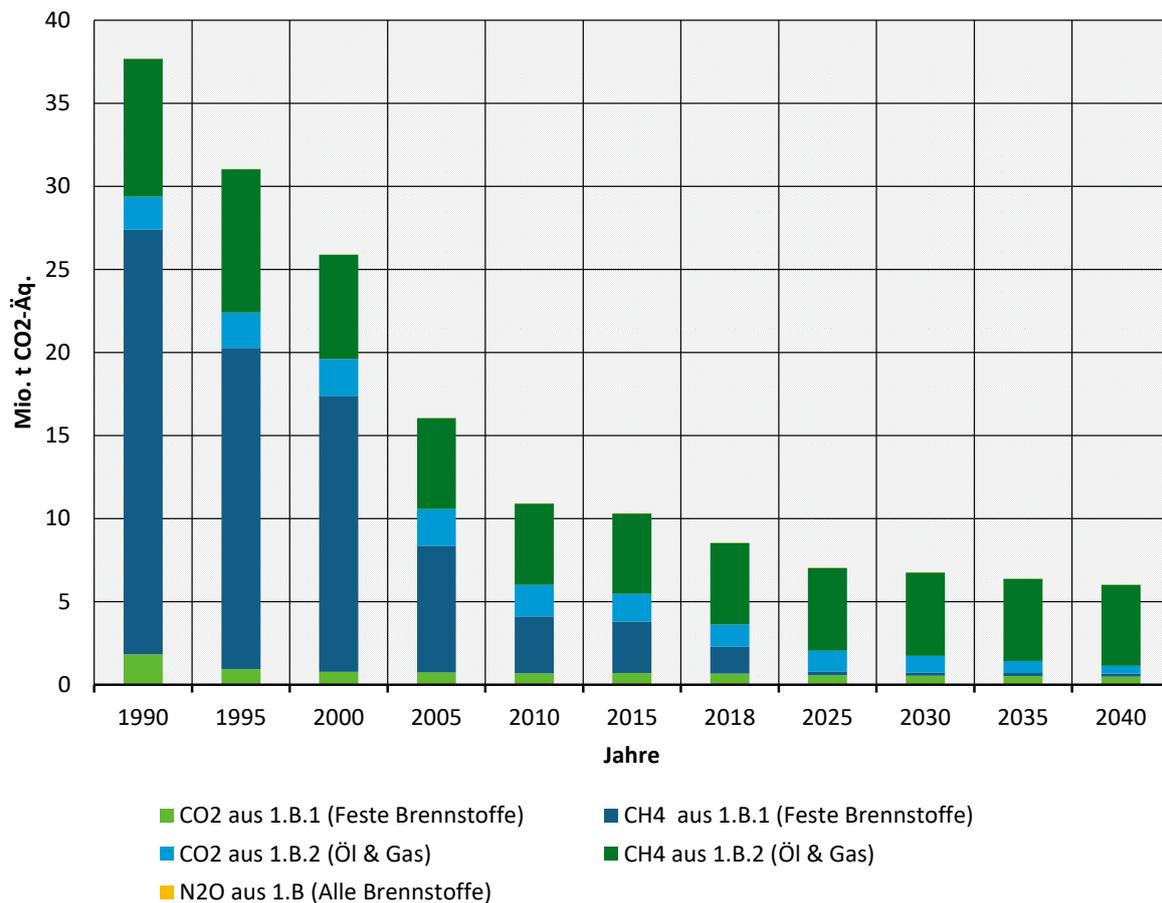
<sup>25</sup> Zahlenwert gegenüber dem Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. (2021)) korrigiert.

	1990	2018	2025	2030	2035	2040
Koksproduktion (1.B.1.b)	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	8,0	4,8	4,9	5,0	4,9	4,8
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen gesamt</b>	<b>33,9</b>	<b>6,5</b>	<b>5,2</b>	<b>5,2</b>	<b>5,1</b>	<b>5,0</b>
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>						
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen gesamt</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
<b>CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>						
<b>Diffuse Emissionen gesamt</b>	<b>37,7</b>	<b>8,5</b>	<b>7,0</b>	<b>6,8</b>	<b>6,4</b>	<b>6,0</b>
<i>ggü. 2005</i>	<i>134,8 %</i>	<i>-46,9 %</i>	<i>-56,2 %</i>	<i>-57,9 %</i>	<i>-60,3 %</i>	<i>-62,5 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-77,4 %</i>	<i>-81,3 %</i>	<i>-82,1 %</i>	<i>-83,1 %</i>	<i>-84,0 %</i>

Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

Abbildung 24 „fasst die historische und projizierte Entwicklung der diffusen Emissionen grafisch zusammen. Deutlich zu erkennen ist, dass der historische Rückgang der Emissionen vor allem aus einem Rückgang der Festbrennstoffe herrührt. Für die Zukunft zeigt das Diagramm, dass der Ausstieg aus der Steinkohleförderung noch einen kurzfristigen Emissionsminderungseffekt (Rückgang der CH<sub>4</sub>-Emissionen aus festen Brennstoffen) auf die diffusen Emissionen hat und die diffusen Emissionen danach nur noch sehr langsam sinken“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Abbildung 24: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2040**

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

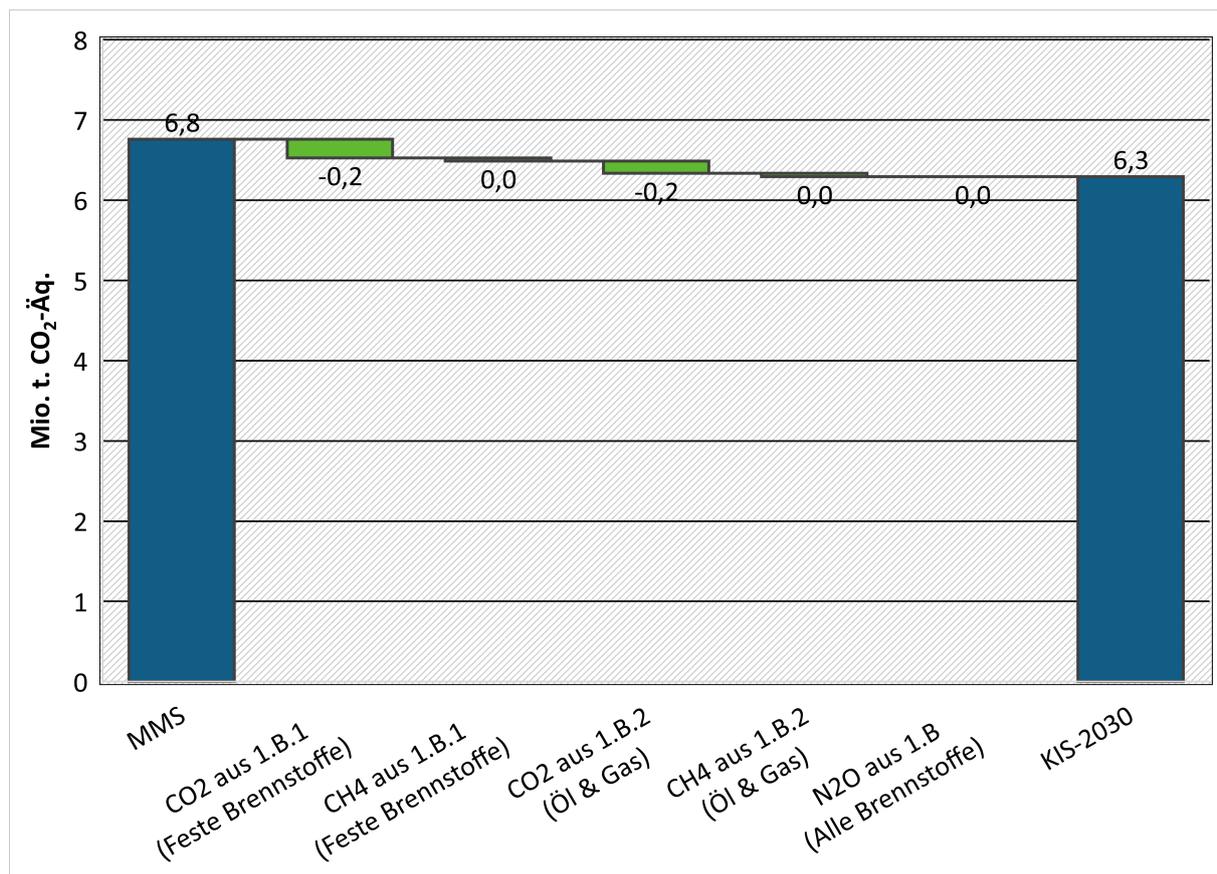
„Die Wirkungen von Maßnahmen in anderen Bereichen auf die diffusen Emissionen sind recht klein. Bedeutender für die absolute Höhe der Emissionen der diffusen Emissionen sind die Modellierungsannahmen, insbesondere

- a) zur Weiterentwicklung der Erdgasinfrastruktur und
- b) zur zukünftigen Erdöl- und Erdgasförderung“ (Öko-Institut et al. 2021).

#### 6.3.5.4 Vergleich der Szenarien

Auch wenn es im KIS-2030 keine direkt auf die diffusen Emissionen abzielenden Politikinstrumente gibt, so zeigt der Vergleich des KIS-2030 mit dem MMS in Abbildung 25, dass Instrumente und Maßnahmen zur Reduktion des Verbrauchs fossiler Energieträger hier auch indirekt wirken und 2030 etwa eine halbe Million Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente bzw. 7 % weniger emittiert werden. Im Jahr 2030 ist im KIS-2030 der größte Emissionsrückgang bei der Koksproduktion zu sehen, verursacht durch einen schnelleren Umstieg von der konventionellen Hochofenroute unter Verwendung von Koks hin zu alternativen Stahlherstellungsverfahren. Ebenso führen niedrigere Verbräuche von Mineralölprodukten und Erdgas zu niedrigeren diffusen Emissionen bei Öl- und Gasverarbeitung und -transport.

Abbildung 25: Veränderung der diffusen Emissionen im KIS-2030 gegenüber dem KIS-MMS, 2030



Quelle: eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Einen Vergleich für alle Szenariojahre bietet Tabelle 39. Bis 2018 konnten die diffusen Emissionen bereits um 77 % gegenüber 1990 reduziert werden. Während im Jahr 2030 des MMS die diffusen Emissionen 82 % niedriger liegen als 1990, ist die Minderung im KIS-2030 mit 83 % etwa einen Prozentpunkt höher. In der Tabelle sind auch Daten zur BEHG-Sensitivität aufgeführt. Wie bereits in Abschnitt 6.3.5.2 erläutert, hat der veränderte CO<sub>2</sub>-Preis nur marginale Auswirkungen auf die diffusen Emissionen, sodass sich die Emissionsänderungen gegenüber 1990 für die BEHG-Sensitivität in allen Szenariojahren um weniger als einen Zehntel Prozentpunkt unterscheiden.

Tabelle 39: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	3,8	3,0	2,0				
MMS				1,8	1,5	1,2	1,0
KIS-2030				1,7	1,2	0,7	0,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				1,7	1,2	0,7	0,4
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							

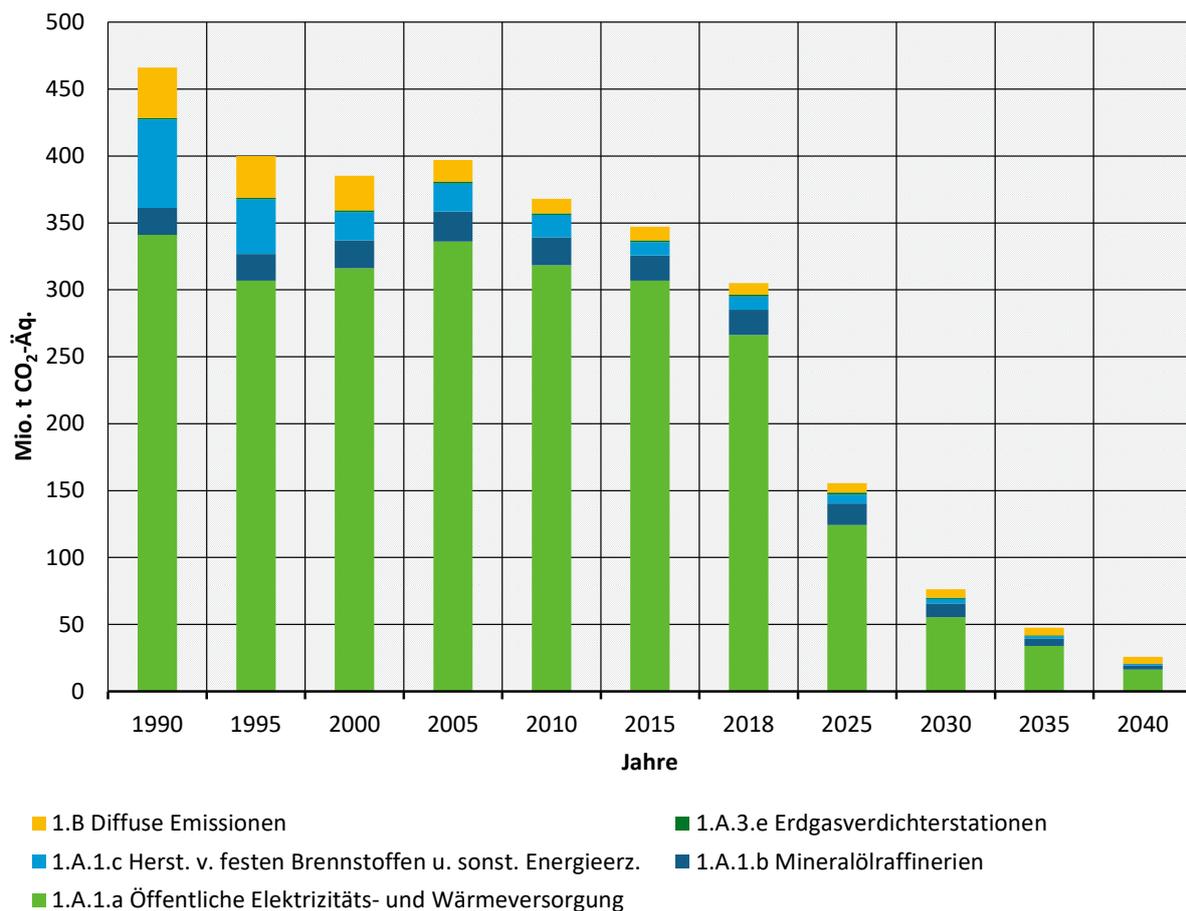
	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Entwicklung 1990 – 2018	33,9	13,1	6,5				
MMS				5,2	5,2	5,1	5,0
KIS-2030				5,3	5,1	4,9	4,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				5,3	5,1	4,9	4,7
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,0	0,0	0,0				
MMS				0,0	0,0	0,0	0,0
KIS-2030				0,0	0,0	0,0	0,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	37,7	16,1	8,5				
MMS				7,0	6,8	6,4	6,0
KIS-2030				7,0	6,3	5,6	5,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				7,0	6,3	5,6	5,1
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
<b>Veränderung ab 1990 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018		-57,4	-77,4				
MMS				-81,3	-82,1	-83,1	-84,0
KIS-2030				-81,5	-83,3	-85,1	-86,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-81,4	-83,3	-85,1	-86,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
<b>Veränderung ab 2005 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018			-46,9				
MMS				-56,2	-57,9	-60,3	-62,5
KIS-2030				-56,4	-60,8	-65,1	-68,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-56,4	-60,7	-65,0	-68,0

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030

## 6.4 Gesamtergebnisse Energiewirtschaft

### 6.4.1 KIS-2030

Abbildung 26 stellt für den Sektor Energiewirtschaft die Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen über den im Szenario KIS-2030 betrachteten Zeitraum sowie ausgewählte frühere Jahre dar. Tabelle 40 enthält weitere Details.

**Abbildung 26: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

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

Die gesamten Treibhausgasemissionen sinken im KIS-2030 von etwas über 305 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Basisjahr 2018 auf knapp 156 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2025 und bis 2030 auf etwas über 76 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Gegenüber 2018 entspricht das einer Minderung von fast der Hälfte bis 2025 und drei Vierteln bis 2030. Gegenüber 1990 (etwas über 466 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) beträgt die Minderung bis 2025 67 % und bis 2030 84 %. Das Sektorziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes von 108 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 wird somit in der Energiewirtschaft erreicht – konkret um fast 32 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq unterschritten.

Der wichtigste Treiber des Rückgangs ab 2018 ist im KIS-2030 die öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung. Hier sinken die Emissionen von etwas über 266 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Basisjahr 2018 auf gut 124 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2025 und etwas über 55 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030, mit hin ein Rückgang von fast 80 %. Dieser wird zum größten Teil durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung, getrieben von deutlich steigenden Zertifikatspreisen im EU ETS, und den ambitionierten Ausbau von Windenergie und PV bewirkt. Der Ausbau der erneuerbaren Fernwärme im Rahmen der BEW und der Energieflächenverpflichtung öffentlicher Eigentümer tragen ebenfalls einen kleineren Teil bei.

In den anderen Quellgruppen gehen von 2018 bis 2030 ebenfalls die Treibhausgasemissionen zurück. Bei den Mineralölraffinerien halbieren sie sich fast, von 19 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf knapp über 10 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Dies liegt vor allem am deutlichen Rückgang der Mineralölnachfrage und damit verbunden der geringeren Aktivität der Raffinerien. Die Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von festen Brennstoffen gehen ebenfalls zurück, von 10 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Basisjahr 2018

auf etwas über 3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030. Hier ist die sinkende Nachfrage nach Koks in der Stahlherstellung der wichtigste Faktor, vor allem verursacht durch Umstellungen der Produktionsprozesse (vergleiche Abschnitt 7.4.3.1). Die Emissionen der Erdgasverdichterstationen gehen von 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Basisjahr 2018 auf 1,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 zurück, maßgeblich aufgrund der Elektrifizierung der Verdichter, die als Instrument im KIS-2030 hinterlegt ist (vergleiche Abschnitt 6.1.4.1). Die diffusen Emissionen, die hauptsächlich bei Gasförderung, -transport und -verarbeitung entstehen, sinken ebenfalls bis 2030, wenn auch weniger deutlich, von 8,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Basisjahr 2018 auf 6,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030.

Nach 2030 sinken die Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft weiter. Im KIS-2030 betragen sie im Jahr 2035 gut 47 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und knapp 26 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2040. Auch hier entfällt der größte Teil auf die öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung, insbesondere die in den 2030er Jahren verbleibenden Erdgaskraftwerke sowie die Kraftwerke mit sonstigen fossilen Brennstoffen wie Kuppelgasen oder Abfall. Auch in den anderen Quellgruppen setzt sich der sinkende Trend fort.

**Tabelle 40: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	266,2	164,8	143,2	145,5	134,8	124,3	104,0	89,1	75,3	64,6	55,4	34,0	16,3
Mineralölraffinerien	19,0	17,7	18,7	18,1	17,1	16,1	15,1	14,0	12,9	11,7	10,1	5,4	3,0
Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	10,0	8,4	8,1	7,8	7,4	6,7	5,9	5,3	4,7	4,0	3,4	1,8	1,1
Erdgasverdichterstationen	1,3	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	1,1	1,0	0,6	0,1
Diffuse Emissionen	8,5	7,0	7,0	7,0	7,1	7,0	6,9	6,7	6,6	6,4	6,3	5,6	5,1
<b>Gesamt</b>	<b>305,1</b>	<b>199,2</b>	<b>178,5</b>	<b>179,8</b>	<b>167,9</b>	<b>155,5</b>	<b>133,2</b>	<b>116,4</b>	<b>100,7</b>	<b>87,9</b>	<b>76,3</b>	<b>47,4</b>	<b>25,7</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021			257								108		
Abweichung vom Sektorziel			-78,5								-31,7		

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

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

#### 6.4.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Tabelle 41 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft in der BEHG-Sensitivität des KIS-2030. Ausgehend von gut 305 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Basisjahr 2018 sinken sie bis 2030 auf etwas über 75 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Das Sektorziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2030 (108 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) wird damit um fast 33 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq unterschritten. Die Emissionen sinken dabei in allen Quellgruppen. Der absolut und relativ größte Rückgang findet im Bereich der öffentlichen Elektrizitäts- und Wärmeversorgung statt.

**Tabelle 41: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	266,2	165,1	143,5	145,7	134,7	123,8	102,8	87,3	73,7	63,2	53,8	33,0	16,3
Mineralölraffinerien	19,0	17,6	18,7	18,2	17,3	16,3	15,3	14,4	13,4	12,2	10,7	6,0	3,2
Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	10,0	8,4	8,1	7,7	7,4	6,7	5,9	5,3	4,7	4,0	3,4	1,8	1,1
Erdgasverdichterstationen	1,3	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,1	1,0	0,6	0,2
Diffuse Emissionen	8,5	7,0	7,0	7,0	7,1	7,0	6,9	6,7	6,6	6,4	6,3	5,6	5,1
<b>Gesamt</b>	<b>305,1</b>	<b>199,5</b>	<b>178,8</b>	<b>180,1</b>	<b>167,9</b>	<b>155,3</b>	<b>132,4</b>	<b>115,1</b>	<b>99,6</b>	<b>87,0</b>	<b>75,3</b>	<b>47,0</b>	<b>25,9</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021			257								108		
Abweichung vom Sektorziel			-78,2								-32,7		

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

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

### 6.4.3 MMS

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft im MMS des Projektionsberichts 2021 ist in Tabelle 42 dargestellt. Ausgehend von gut 305 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Basisjahr 2018 sinken die Emissionen in allen Quellgruppen bis 2030 ab, auf insgesamt etwas über 193 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Während der Rückgang in der öffentlichen Elektrizitäts- und Wärmeversorgung mit 104 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq deutlich ist, fällt er in den anderen Quellgruppen geringer aus. Insbesondere reicht die Gesamtminderung nicht aus, um das Sektorziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2030 (108 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) zu erreichen; es wird um 85 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq verfehlt.

**Tabelle 42: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	266,2	241,9	236,0	228,3	220,9	207,9	208,2	205,0	195,8	181,9	162,2	108,4	51,7
Mineralölraffinerien	19,0	18,0	18,9	18,7	18,5	18,2	17,9	17,5	17,1	16,7	16,1	13,5	11,3
Herstellung von festen Brennstoffen und	10,0	8,7	8,6	8,5	8,5	8,3	8,0	7,7	7,5	7,2	7,0	6,0	5,0

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
sonstige Energieerzeuger													
Erdgasverdichterstationen	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0
Diffuse Emissionen	8,5	6,9	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	6,9	6,8	6,8	6,8	6,4	6,0
<b>Gesamt</b>	<b>305,1</b>	<b>276,8</b>	<b>271,7</b>	<b>263,8</b>	<b>256,2</b>	<b>242,8</b>	<b>242,3</b>	<b>238,4</b>	<b>228,5</b>	<b>213,8</b>	<b>193,2</b>	<b>135,4</b>	<b>74,9</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021			257								108		
Abweichung vom Sektorziel			14,7								85,2		

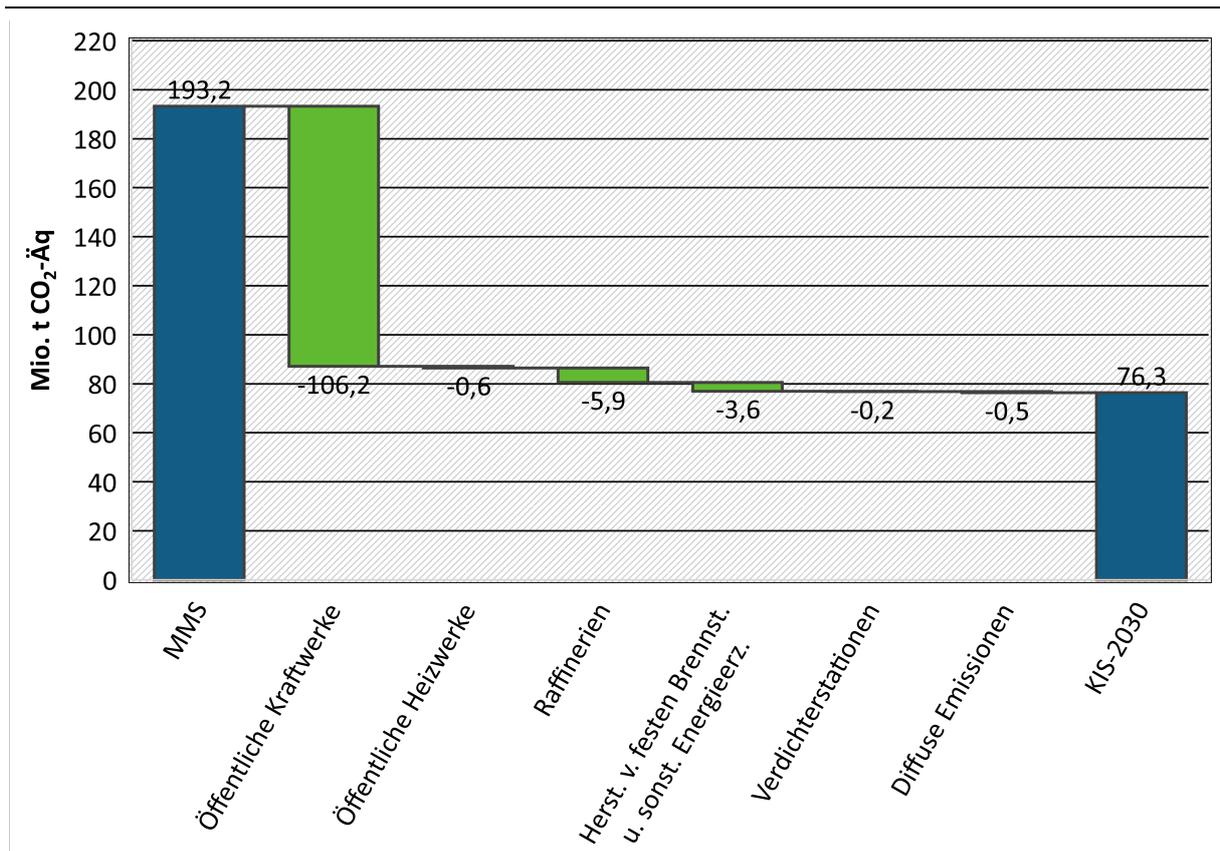
Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021)

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

#### 6.4.4 Vergleich der Szenarien

Abbildung 27 vergleicht die Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft im Jahr 2030 zwischen dem MMS des Projektionsberichts 2021 und dem KIS-2030 und teilt die Unterschiede nach Quellgruppen auf. Tabelle 43 zeigt eine detailliertere Entwicklung für mehrere Jahre auf.

**Abbildung 27: Veränderung der Emissionen der Energiewirtschaft im KIS-2030 gegenüber dem MMS, Jahr 2030**



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

Mit etwas über 106 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq geht der größte Teil des Gesamtunterschieds von knapp 117 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf die Treibhausgasemissionen der öffentlichen Kraftwerke zurück. Der wichtigste Faktor hierbei sind die Kohlekraftwerke, die im MMS deutlich über 100 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq emittieren und im KIS-2030 im Jahr 2030 nicht mehr am Netz sind und entsprechend keine Emissionen aufweisen. Aber auch alle anderen Teile der Energiewirtschaft haben im KIS-2030 niedrigere Emissionen als im MMS. Hervorzuheben sind hier die Raffinerien und die Sammelkategorie „Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger“, die unter anderem auch die Koksherstellung für die Stahlerzeugung umfasst.

**Tabelle 43: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	428,8	380,3	293,4				
MMS				233,4	184,4	127,0	67,2
KIS-2030				146,2	68,5	40,5	19,5
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				145,9	67,6	40,1	19,7
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	34,1	14,0	9,2				
MMS				7,5	7,4	7,3	7,2
KIS-2030				8,2	7,2	6,5	5,9
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				8,2	7,2	6,5	5,9
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	3,2	2,7	2,4				
MMS				1,9	1,4	1,1	0,5
KIS-2030				1,1	0,6	0,4	0,3
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				1,1	0,6	0,4	0,3
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	466,2	396,9	305,1				
MMS				242,8	193,2	135,4	74,9
KIS-2030				155,5	76,3	47,4	25,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				155,3	75,3	47,0	25,9
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
<b>Veränderung ab 1990 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018		-14,8	-34,6				
MMS				-47,9	-58,5	-71,0	-83,9

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
KIS-2030				-66,6	-83,6	-89,8	-94,5
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-66,7	-83,8	-89,9	-94,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 2005 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018			-23,1				
MMS				-38,8	-51,3	-65,9	-81,1
KIS-2030				-60,8	-80,8	-88,0	-93,5
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-60,9	-81,0	-88,2	-93,5

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Entsprechend der unterschiedlichen Entwicklung von Emissionen aus Kraftwerken und des Stromverbrauchs entwickelt sich auch der resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des Strommix' deutlich unterschiedlich zwischen den Szenarien, siehe Tabelle 44. Da im KIS-2030 eine höhere Stromnachfrage durch einen Kraftwerkspark mit in Summe niedrigeren Emissionen gedeckt wird, ist der resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor im Jahr 2030 um das 3,5-fache geringer als im MMS. Vor allem der geringere Stromverbrauch führt dazu, dass in der BEHG-Sensitivität der Stromemissionsfaktor noch einmal etwas geringer ist als im KIS-2030. Berücksichtigt ist dabei jeweils (in methodischer Anlehnung an Icha et al. (2021) sowie die Methodik der Energiebilanzen) für KWK-Kraftwerke nur der mittels der sogenannten Finnischen Methode (auch als *Referenzwirkungsggradmethode* bezeichnet) auf die Stromscheibe entfallende Emissionsanteil der gesamten Brennstoffeinsätze.<sup>26</sup>

**Tabelle 44: Entwicklung des resultierender CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors des Strommix' zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien, in g CO<sub>2</sub>/kWh**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Entwicklung 1990 – 2018	762,8	610,4	468,3				
MMS				397,6	287,6	176,8	87,0
KIS-2030				240,7	81,8	36,8	12,3
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				240,0	80,1	36,3	12,3

Quelle: eigene Berechnungen, Öko-Institut

<sup>26</sup> Eine detaillierte Beschreibung der Finnischen Methode findet sich beispielsweise in AGE (2019), Kapitel 2.3.2.

## 7 Industrie

### 7.1 Instrumente

#### 7.1.1 Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick

**Tabelle 45: Treibhausgasminderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 für einzelne Jahre bis 2030 im Sektor Industrie**

Szenario/ Instrument	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Summe 2021-2030
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq											
MMS	172,2	174,6	175,7	176,0	174,8	170,4	166,2	162,2	158,4	154,6	1.685,1
Steigerung der Ambition im EU ETS und höherer Zertifikatspreis	-2,4	-3,9	-5,4	-5,6	-6,5	-7,1	-7,7	-8,3	-8,9	-9,5	-65,2
Energiesteuerreform (BEHG+Energiepreise)	-0,0	-0,3	-0,5	-0,5	-0,7	-0,8	-0,9	-1,2	-1,4	-1,5	-7,8
Aufstockung der Mittel für die finanzielle Förderung CO <sub>2</sub> -armer und -freier Technologien	0,0	0,0	-0,2	-3,9	-4,6	-6,1	-7,8	-9,6	-11,7	-14,1	-57,9
Instrumentenbündel "Materialeffizienz"	0,0	0,0	-2,4	-2,5	-3,0	-2,8	-2,5	-2,2	-1,7	-1,2	-18,3
Instrumentenbündel "Energieeffizienz"	0,0	-0,6	-1,1	-1,1	-1,4	-1,8	-2,3	-2,8	-3,4	-4,0	-18,5
Instrumentenbündel "Industriekraftwerke"	0,0	-0,7	-1,5	-2,2	-3,0	-3,7	-4,4	-5,2	-5,9	-6,6	-33,2
Anpassung/Verschärfung des EU HFKW-Phase-down (gemäß EU-F-Gas-Verordnung 517/2014) nach 2030	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Selektive Verbote der Verwendung von SF <sub>6</sub> in neuen elektrischen Schaltanlagen	0	0	0	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0
KIS-2030	169,8	169,1	164,7	160,2	155,7	148,1	140,5	132,9	125,3	117,7	1.484,0
KSG-Jahresemissionsmengen	182	177	172	165	157	149	140	132	125	118	1.517

Quelle: Fraunhofer ISI

\*Gerundet als „0,0“ ausgewiesene Minderungswirkungen sind größer als Null aber kleiner als 0,05. Das Instrument entfaltet seine volle Wirkung erst nach dem Jahr 2030.

Tabelle 45 zeigt die Minderungswirkung der einzelnen modellierten Instrumentenbündel für den Sektor Industrie. Die stärkste Wirkung entfällt auf die Bündel zur Finanzierung CO<sub>2</sub>-armer Technologien sowie die Steigerung der Ambition im Emissionshandel. Der EU-ETS zeigt durch

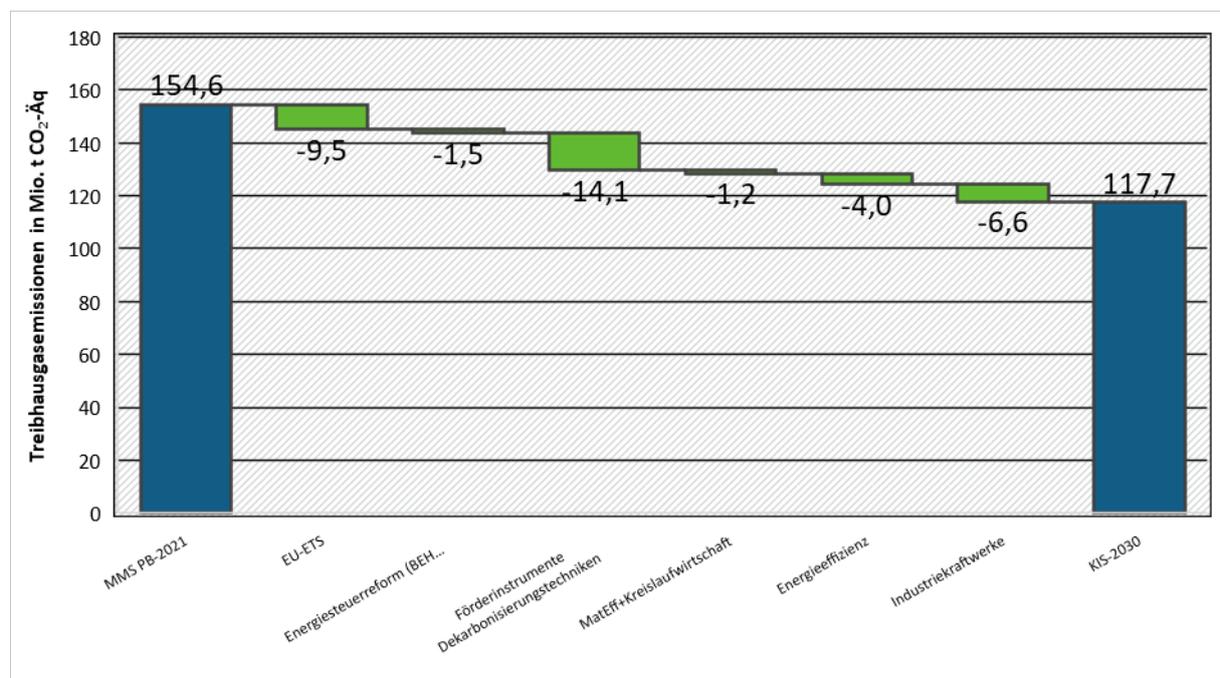
einen schnell ansteigenden CO<sub>2</sub>-Preis bereits kurzfristig Wirkung, wohingegen die anderen Instrumente eine längere Vorlaufzeit benötigen.

Die modellierten Instrumente bewirken gegenüber dem MMS des Projektionsberichtes 2021 eine Senkung der Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 um 36,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Damit wird im Jahr 2030 das Ziel im Sektor Industrie erreicht und geringfügig unterschritten.

Darunter sind die Instrumente mit den höchsten Wirkungen die „Aufstockung der Mittel für die finanzielle Förderung CO<sub>2</sub>-armer und -freier Technologien“ (siehe Abschnitt 7.1.2.1.3) mit 14,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 (kumuliert 57,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) und die *Steigerung der Ambition im EU ETS und höherer Zertifikatepreis* (siehe Abschnitt 7.1.2.1.1) im Rahmen der wichtigsten industrierelevanten Elemente des sektorübergreifenden Instruments „Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung“ mit jährlich 9,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 (kumuliert 65,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq). Zusammen machen diese 61 % der zwischen 2020 und 2030 kumulierten Instrumentenwirkung und 64 % der jährlichen Wirkung im Jahr 2030 im KIS-2030 aus.

Die restliche Wirkung entsteht durch weitere industrierelevante Elemente des sektorübergreifenden Instruments *Energiesteuerreform (BEHG+Energiepreise)* (siehe Abschnitt 7.1.2.1.2) mit jährlich 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 (kumuliert 7,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq), das *Instrumentenbündel „Materialeffizienz“* (siehe Abschnitt 7.1.2.1.5) mit jährlich 1,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 (kumuliert 18,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) und das *Instrumentenbündel „Energieeffizienz“* (siehe Abschnitt 7.1.2.1.6) mit jährlich 4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 (kumuliert 18,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq).

**Abbildung 28: Instrumentenwirkung im Sektor Industrie im KIS-2030 für das Jahr 2030 ggü. dem MMS des Projektionsberichtes 2021**



Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Bei dieser Einzeldarstellung der Instrumentenwirkung ist zu beachten, dass es erhebliche Unsicherheiten gibt, hinsichtlich zeitlicher Umsetzung, Interaktionen und Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten und ihrer Ausgestaltung und Effektivität. Entsprechend sind diese Ergebnisse als Größenordnung zu betrachten. Auch andere Rahmenbedingungen wie Energiepreise haben großen Einfluss auf die Wirkung der einzelnen Instrumente.

Es gibt keine explizit nur die Industriekraftwerke betreffenden Instrumente und Maßnahmen. Aber viele der Instrumente der Energiewirtschaft wirken auch auf Industriekraftwerke, wie beispielsweise der Ausstieg aus der Kohleverstromung. Da im Strommarktmodell PowerFlex sowohl die Kraftwerke der Energiewirtschaft als auch die Industriekraftwerke abgebildet sind, ist die Wirkung dieser Instrumente in den Instrumentenwirkungen der Energiewirtschaft (Abschnitt 6.1.1) mitbilanziert.

## 7.1.2 Instrumente und deren Parametrisierung

### 7.1.2.1 KIS-2030

#### 7.1.2.1.1 Steigerung der Ambition im EU ETS: Höherer Zertifikatepreis und Mindestpreisfad

Beschreibung und Parametrisierung: Siehe übergreifendes Instrument (Abschnitt 5.1).

In diesem Instrument ist maßgeblich Teil d) „Steigerung der Ambition im EU ETS und höherer Zertifikatepreis“ für die Industrie relevant. Es beinhaltet neben einem höheren EU-ETS Zertifikatepreis für die Industrie auch einen angenommenen Mindestpreis. Weiterhin wird – als flankierendes Instrument von hoher, wenn auch nur qualitativ bewertbarer Bedeutung – von einem effektiven Carbon-Leakage Schutz (z. B. durch einen Grenzausgleichsmechanismus) ausgegangen.

#### Parametrisierung und Modellierung

Für die Quantifizierung der Wirkungen des EU-ETS stellen die Zertifikatspreise die zentrale Annahme dar (Abschnitt 5.1.1.4). Die Preise verbessern im Modell die Wirtschaftlichkeit energieeffizienter Technologien und CO<sub>2</sub>-armer Energieträger. Entsprechend gewinnen diese höheren Marktanteile und verbreiten sich schneller im Anlagenbestand.

Das Modell FORECAST ermöglicht aufgrund der prozessspezifischen Struktur die Berücksichtigung der Preise der Emissionszertifikate nur für Prozesse, die tatsächlich dem EU-ETS unterworfen sind. Eine Schwierigkeit bei der Modellierung ist dennoch die Abgrenzung der Unternehmen, die am EU-ETS teilnehmen. Die energieintensiven Prozesse wurden entsprechend Tabelle 46 dem Emissionshandel zugeordnet. Ausnahmeregeln, wie z. B. der Ausschluss von Papier- und Kartonfabriken mit einer jährlichen Kapazität unter 7.300 t Papier, können nicht berücksichtigt werden. Diese kleinen Anlagen fallen aufgrund des niedrigen Beitrags zu den gesamten Treibhausgasemissionen der Branche allerdings kaum ins Gewicht.

**Tabelle 46: Zuordnung der energieintensiven Industrieprozesse und -produkte des Energiesystemmodells FORECAST zum EU-ETS nach Sektoren**

Prozess
<b>Roheisen und Stahl</b>
Direkte Reduktion, Elektrostahl – EAF, Oxygenstahl – Hochofen, Schmelzreduktion, Walzstahl
<b>Zementklinker und Kalk</b>
Kalkbrennen, Klinkerbrennen (halbtrocken), Klinkerbrennen (trocken)
<b>Nichteisenmetalle</b>

<b>Prozess</b>
Aluminium Gießereien, Aluminium Walzen, Aluminium primär, Aluminium sekundär, Aluminium Strangpressen, Kupfer primär, Kupfer sekundär, Kupferbearbeitung, Primärzink, Sekundärzink
<b>Keramische Erzeugnisse durch Brennen</b>
Feuerfestkeramik, Fliesen, Platten, Andere, Haushaltswaren, Sanitärkeramik, Technische Keramik, Ziegel
<b>Glas einschließlich Glasfasern</b>
Behälterglas, Flachglas, Glasfasern, Übriges Glas
<b>Zellstoff, Papier und Pappe</b>
Altpapierstoff, Holzstoff – Verfahren, Papier, Zellstoff – Verfahren
<b>Chemische Produkte</b>
Adipinsäure, Ammoniak, Ethylen, Industrieruß, Methanol, Polycarbonat, Polyethylen, Polypropylen, Salpetersäure, Soda
<b>Andere</b>
Zucker

Quelle: Fraunhofer ISI

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

Der Einfluss des CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreises auf die Investitionsentscheidung der Unternehmen folgt einem Simulationsansatz, bei dem die Unternehmen nicht zwangsläufig ihre Investitionen optimieren. Anders als im MMS wird im KIS-2030 davon ausgegangen, dass Unternehmen auch den zukünftigen CO<sub>2</sub>-Preis kennen und so bei Investitionsentscheidungen bereits den jeweiligen CO<sub>2</sub>-Preis zugrunde legen, der fünf Jahre in der Zukunft liegt. Dieser ist unter den gegebenen Annahmen deutlich höher und steigert somit die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Klimaschutzinvestitionen. Grundlage hierfür ist die angenommene Einführung eines Mindestpreispfades. Dieser stärkt darüber hinaus die Planungssicherheit der Investitionen.

Mögliche Rückwirkungen des Zertifikatspreises auf Produktionsmengen, erhöhte Strompreise sowie dynamische Innovationseffekte werden in der Modellierung nicht berücksichtigt. Die ausgewiesene Wirkung basiert allein auf dem Einfluss des CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreises auf die Investitionsentscheidung der Unternehmen.

#### **7.1.2.1.2 Reform der Energiebesteuerung**

Beschreibung und Parametrisierung: Siehe übergreifendes Instrument (Abschnitt 5.1).

Für den Industriesektor gilt: Die hohen Ausnahmetatbestände von besonders energieintensiven Unternehmen (z. B. bei EEG-Umlage, KWK-Umlage, Stromsteuer) führen dazu, dass bei vielen Unternehmen eine Senkung der Umlagen und Abgaben auf den Strompreis nur geringe Auswirkungen hat. Bei weniger energieintensiven und kleineren Unternehmen, die derzeit höhere Aufschläge auf den Strompreis bezahlen, kann das Instrument Optionen zur Elektrifizierung der

Prozesswärme deutlich wirtschaftlicher machen. Die Quantifizierung berücksichtigt die Endverbraucherpreise der Industrieunternehmen mit ihren jeweiligen Ausnahmen.

### **Parametrisierung und Modellierung**

In Kombination mit dem hinterlegten höheren EU-ETS-Zertifikatpreis und veränderten Energieträgerpreisen entsteht ein effektives Preissignal, das Investitionsentscheidungen und Brennstoffwahl relevant beeinflusst. Die resultierende Wahl von Energieträgern entsprechend der Kosten wird endogen in FORECAST modelliert.

#### **7.1.2.1.3 Instrumentenbündel: Aufstockung der Mittel für die finanzielle Förderung CO<sub>2</sub>-armer und -freier Technologien**

##### **Beschreibung Instrumentenbündel**

Im MMS des Projektionsberichts 2021 wurden bereits mehrere Programme zur Förderung der Markteinführung CO<sub>2</sub>-armer Herstellungsverfahren betrachtet. Für das KIS-2030 werden die Mittel der Programme deutlich erhöht. Die konkrete Erhöhung der Budgets orientiert sich dabei an der Lücke zum Sektorziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes für die Industrie im Jahr 2030. Anders als im Projektionsbericht 2021 werden die Annahmen zu den hinterlegten Budgets im KIS-2030 nicht auf einzelne Instrumente verteilt, sondern für das gesamte Instrumentenbündel angenommen und ausgewiesen. Dies liegt an den starken Überschneidungen hinsichtlich der Instrumentenwirkung.

Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Instrumente des Bündels beschrieben, bevor auf die Parametrisierung des Gesamtbündels eingegangen wird.

##### *7.1.2.1.3.1 Klimaschutzverträge (CCfDs) stärken: Ausweitung der Förderung von „Mehrkosten klimaneutraler Produktionsverfahren durch Klimaschutzverträge“*

Klimaschutzverträge (CCfDs: Carbon Contracts for Difference) schließen die Wirtschaftlichkeitslücke CO<sub>2</sub>-neutraler Herstellungsverfahren und können so den Zeitraum überbrücken, bis der CO<sub>2</sub>-Preis des EU ETS hoch genug ist, um den wirtschaftlichen Betrieb entsprechender Verfahren zu ermöglichen. Sie sind insbesondere dort sinnvoll, wo neue Technologien im industriellen Maßstab umgesetzt werden sollen, die auf absehbare Zeit allein durch den CO<sub>2</sub>-Preis noch nicht wirtschaftlich wären, langfristig aber eine Schlüsselrolle im CO<sub>2</sub>-neutralen Energiesystem einnehmen werden. Dies ermöglicht der Industrie frühzeitig in Kapazitätsaufbau und Upscaling CO<sub>2</sub>-armer Schlüsseltechnologien zu investieren. Möglichkeitsfenster bei anstehenden Reinvestitionen können genutzt und Lock-Ins durch Reinvestition in fossile Verfahren vermieden werden.

CCfDs sind im MMS des Projektionsberichts 2021 auf den Einsatz von Wasserstoff in der Stahl- und Chemieindustrie begrenzt und mit einem angenommenen jährlichen Budget von rund 300 Mio. € ausgestattet. Dieses Budget ermöglicht nur einen geringen Kapazitätsaufbau und die Einschränkung auf Wasserstoffanwendungen in der Stahl- und Chemieindustrie schließt CCfDs für andere Schlüsseltechnologien wie CCU oder CO<sub>2</sub>-arme Zementsorten aus. Im KIS-2030 wird daher angenommen, dass ein höheres Budget zur Verfügung steht und CCfDs auch für weitere definierte Verfahren wie Elektrifizierung, CO<sub>2</sub>-arme Zementsorten und CCU zur Verfügung stehen. Eine komplett technologieoffene Förderung durch CCfDs erscheint hingegen nicht sinnvoll, da in diesem Fall hohe Mitnahmeeffekte zu erwarten sind. Klimaschutzverträge sind aufgrund ihrer Eigenschaft, Differenzen der Betriebskosten zu adressieren, das zentrale Instrument, um Wasserstoff als Energieträger den Markteinstieg zu ermöglichen. Darüber hinaus bestehen aber wichtige Verknüpfungen zu anderen Instrumenten:

Für die Ausgestaltung von CCfDs ist die Anbindung an den Emissionshandel zentral. Zum einen sollen CCfDs lediglich die Wirtschaftlichkeit absichern, solange der CO<sub>2</sub>-Preis dafür noch zu niedrig ist, sowie eine bessere Planungsgrundlage bieten. Bei weiter steigenden CO<sub>2</sub>-Preisen entfällt langfristig die Notwendigkeit für CCfDs. Zum anderen müssen Emissionszertifikate aus dem Markt genommen werden, um die Minderung durch CCfDs zu kompensieren und zu vermeiden, dass CCfDs zu einem Sinken des CO<sub>2</sub>-Preises führen.

#### *7.1.2.1.3.2 Aufstockung des Förderprogramms Dekarbonisierung in der Industrie*

Das Förderprogramm zur Dekarbonisierung in der Industrie des BMU, das zum 1. Januar 2021 in Kraft getreten ist, ist bereits Teil des MMS im Projektionsbericht 2021. Dort wird für dieses Programm ab 2022 ein jährliches Fördervolumen von 500 Mio. € angenommen.

Es wird weiterhin angenommen, dass mit dem Programm Investitionen in klimafreundliche Erzeugung von Prozessdampf förderfähig sind. Auf die Erzeugung von Prozessdampf entfallen etwa 25 % des gesamten Endenergieverbrauchs der Industrie. Schwerpunkte sind in den Branchen Chemie, Papier und Nahrungsmittel, aber auch in anderen Branchen wird Prozessdampf eingesetzt. Große Anlagen sind bereits vom EU ETS und kleine Anlagen vom nationalen Emissionshandel (BEHG) adressiert. Erdgas ist der wichtigste Energieträger für die Dampferzeugung und wird entweder in Kesseln oder in Anlagen mit KWK eingesetzt. Für die Dekarbonisierung der Dampferzeugung ist die Elektrifizierung im Vergleich zu anderen Technologien (Einsatz von Biomasse, H<sub>2</sub> oder PtG) sehr vielversprechend, da sie eine höhere Gesamteffizienz aufweist und weniger auf begrenzte natürliche Ressourcen zurückgreift. Im niedrigen Temperaturbereich ist eine sehr effiziente Elektrifizierung über Wärmepumpen möglich. Hochtemperatur-Großwärmepumpen sind sogar im Temperaturbereich zwischen 100 und 200 °C in der Entwicklung und können damit zentrale Anwendungen (z. B. Trockenprozesse u.A. in der Papierherstellung) bedienen. Wärmepumpen zur Dampferzeugung können abhängig von verfügbaren Wärmequellen einen wichtigen Beitrag leisten. Sie sollten dem direkten Stromeinsatz in elektrischen Dampfkesseln vorgezogen werden. Dennoch wird ein Großteil des Dampfbedarfs wegen hoher Drücke und Temperaturen nur mit Dampfkesseln elektrifizierbar sein.

Ein wirtschaftlicher Betrieb von elektrischen Dampfkesseln misst sich an den Kosten von erdgasbefeuerten Anlagen und ist bei den derzeitigen Energiepreisen und im regulatorischen Rahmen des MMS nicht möglich. Im Bestand befindet sich heutzutage nur eine geringe Anzahl Elektrokessel, die einen konventionellen mit Erdgas befeuerten Kessel ergänzen, indem sie Spitzenlast abdecken oder auf eine hohe Stromerzeugung Erneuerbarer Energien reagieren können.

Mit den KIS-2030-Instrumenten zu einem CO<sub>2</sub>-Mindestpreisfad sowie einer Reduzierung von Abgaben auf den Strompreis wird die Wirtschaftlichkeit von elektrischen Dampfkesseln langfristig (nach 2030) für die meisten Anlagen ermöglicht. Bis dahin wurden viele Reinvestitionen in fossile Dampferzeuger getätigt und der verbleibende Zeitraum für die komplette Umstellung des Anlagenbestandes bis 2050 ist sehr klein.

Entsprechend kann eine frühzeitige Förderung von Anlagen zur elektrischen Dampferzeugung entscheidend zum Erfolg dieser Dekarbonisierungsstrategie beitragen. Im Zeitraum bis 2030 können elektrische Dampfkessel in hybriden Systemen gemeinsam mit KWK-Anlagen oder Erdgas-Kesseln bereits eine wichtige Rolle spielen: Sie ermöglichen Unternehmen, Erfahrungen mit elektrischer Dampferzeugung zu sammeln, bereiten den Markthochlauf für die Zeit nach 2030 vor und tragen durch flexiblen Betrieb über Demand Side Management zum Lastausgleich im Stromsystem bei, indem sie sich zur Primär- und Sekundärregelung eignen. Der Einsatz in Zeiten hoher Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien senkt zudem die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des eingesetzten Stroms.

#### 7.1.2.1.3.3 *Aufstockung des IPCEI Wasserstoff: Investitionskostenförderung für Anlagen zur treibhausgasneutralen Stahlerzeugung*

Zur Förderung des IPCEI im Rahmen der Wasserstoffstrategie wurden im MMS des Projektionsberichts 2021 bereits 250 Mio. € pro Jahr zur Förderung der Markteinführung CO<sub>2</sub>-armer und -freier Verfahren aus dem Fördertitel „Wasserstoffeinsatz in der Industrieproduktion“ vorgesehen. Mit einer weiteren Ergänzung der Investitionskostenförderung aus diesem Fördertitel sollen Anlagen zur treibhausgasneutralen Stahlerzeugung (Direktreduktionsanlagen, Einschmelzer, Elektrolichtbogenöfen - EAF) gefördert werden.

#### 7.1.2.1.3.4 *Ausschreibungsverfahren für Projekte zur treibhausgasneutralen Chemieproduktion*

Zur Investitionskostenförderung für Projekte zur treibhausgasneutralen Chemieproduktion (Elektrifizierung Herstellungsprozesse, Schließen von Kohlenstoffkreisläufen, Substitution fossiler durch erneuerbare Rohstoffe) soll eine Projektidee der „Chemistry4Climate“-Plattform aufgegriffen und ein Ausschreibungsverfahren initiiert werden. Das entscheidende Zuschlagskriterium ist ein CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale von  $\geq 10\%$ .

### **Parametrisierung und Modellierung des Instrumentenbündels**

Die Quantifizierung des Instrumentenbündels erfolgt über die Modellierung von ausgewählten CO<sub>2</sub>-armen und -freien Technologien. Darunter fallen die Direktreduktion von Roheisen, die wasserstoffbasierte Herstellung von Grundstoffchemikalien, CCU und CCS sowie hybride Elektrifizierung von Industrieöfen und Dampferzeugung.

Die Berechnung stützt sich auf zwei wesentliche Aspekte der ökonomischen Bewertung der Technologien: Ihren Investitionsbedarf und die Differenz der energiebedingten Betriebskosten verglichen mit konventionellen, fossilen Verfahren<sup>27</sup>. Durch die Erfassung dieser beiden Größen werden im KIS-2030 bestehende Finanzierungs- und Förderbedarfe errechnet. Aufgrund der Unsicherheit wichtiger Einflussgrößen wird eine Spannbreite (obere/untere Abschätzung) berechnet. Wichtig ist: beide Abschätzungen erzeugen die gleiche Instrumentenwirkung, allerdings mit unterschiedlichem Aufwand (Finanzierungsbedarf). Die Ergebnisse werden für die drei Rechenschritte separat ausgewiesen:

- ▶ Finanzierungsbedarf (Tabelle 47)
- ▶ Resultierender Förderbedarf (Tabelle 49)
- ▶ Differenz Förderbedarf zum MMS des Projektionsberichts 2021 (Tabelle 50)

Diese Bezugsgrößen bauen aufeinander auf.

Der resultierende Finanzierungsbedarf (Tabelle 47) ist die Summe der Mehrkosten einer CO<sub>2</sub>-armen/freien Technik ggü. einer konventionellen Alternative (OPEX und CAPEX, unabhängig davon, wer diese Kosten schließlich zahlt). Dabei werden – jeweils für untere und obere Abschätzung – Annahmen für Investition, Energieträgerpreise und CO<sub>2</sub>-Bepreisung getroffen (Tabelle 48). Es werden vermiedene Kosten für Emissionszertifikate berücksichtigt. Es wird angenommen, dass klimafreundliche Produkte die gleichen Erlöse erzielen wie konventionelle Produkte. Grüne Leitmärkte und höhere Preise für klimafreundliche Produkte würden den Finanzierungsbedarf senken. Weiterhin gilt, dass der Finanzierungsbedarf durch hohe Strom- und Wasserstoffpreise steigt und durch hohe CO<sub>2</sub>-Preise sinkt (OPEX). Erdgaspreisvariationen beeinflussen die Verfahren individuell – je nachdem, ob Erdgas eingespart (z. B. bei der Elektrifizierung von Dampferzeugung) oder zusätzlich verbraucht (bei der Direktreduktion mit Erdgas) wird. Die

<sup>27</sup> Weitere Kostenkomponenten, insbesondere Material und Personal, werden als beim Verfahrenswechsel unverändert angenommen.

Benchmark-Einordnung im EU-Emissionshandel beeinflusst die Wirkung der CO<sub>2</sub>-Preise maßgeblich. Sind CO<sub>2</sub>-arme Verfahren in einem gemeinsamen Benchmark mit konventionellen Verfahren, können sie im System der freien Zuteilung ihr volles Treibhausgasemissionsreduktionspotential zur Generierung von Einnahmen nutzen<sup>28</sup>. In einem eigenen Benchmark – dieser würde deutlich niedriger liegen – wäre das entstehende Preissignal verringert. Diese Logik wurde im Modell umgesetzt, indem CO<sub>2</sub>-arme Verfahren gegenüber konventionellen Verfahren im getrennten Benchmark keine Kostenvorteile durch CO<sub>2</sub>-Bepreisung erfahren. Dadurch steigt der Finanzierungsbedarf zum Betrieb der Anlagen (OPEX).<sup>29</sup> Der hier dargestellte Finanzierungsbedarf wurde unter der Annahme der Verwendung von grünem Wasserstoff berechnet. Der Einsatz von blauem Wasserstoff ist für dieses Instrumentenbündel nicht vorgesehen.

**Tabelle 47: Finanzierungsbedarf für CO<sub>2</sub>-arme Produktionsverfahren im KIS-2030**

In Mrd. € <sub>2020</sub>	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Summe
Finanzierungsbedarf- <b>untere</b> Abschätzung	0,7	0,8	1,1	1,4	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	15,0
<i>davon CAPEX</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>1,0</i>	<i>1,2</i>	<i>1,4</i>	<i>1,3</i>	<i>1,2</i>	<i>1,2</i>	<i>1,1</i>	<i>1,1</i>	<i>10,9</i>
<i>davon OPEX</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,09</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,8</i>	<i>4,0</i>
Finanzierungsbedarf - <b>obere</b> Abschätzung	1,2	1,5	2,1	2,8	3,6	4,0	4,6	5,2	5,8	6,4	37,3
<i>davon CAPEX</i>	<i>1,2</i>	<i>1,5</i>	<i>1,8</i>	<i>2,1</i>	<i>2,4</i>	<i>2,3</i>	<i>2,2</i>	<i>2,1</i>	<i>2,0</i>	<i>1,9</i>	<i>19,7</i>
<i>davon OPEX</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,3</i>	<i>0,7</i>	<i>1,2</i>	<i>1,7</i>	<i>2,4</i>	<i>3,1</i>	<i>3,8</i>	<i>4,5</i>	<i>17,6</i>

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

**Tabelle 48: Annahmen für die Berechnung des Finanzierungsbedarfs CO<sub>2</sub>-armer Produktionsverfahren im KIS-2030**

Merkmal	Ausprägung		Einheit
	Untere Abschätzung	Obere Abschätzung	
Investition	Literaturwerte	Faktor 1,8*	-
Strompreise für die konkrete Anwendung (2030)	4	8	€/kWh
Wasserstoffpreise für die konkrete Anwendung (2030)	3,5	5,5	€/kg H <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> -Preise (EU-ETS, 2030)	115	55	€/t CO <sub>2</sub>

<sup>28</sup> Oder den Benchmark entsprechend reduzieren. Unabhängig davon wären die Differenzkosten zu konventionellen Verfahren vermindert.

<sup>29</sup> Beispielrechnung für das Jahr 2030, wasserstoffbasierte Direktreduktionsanlage: Die Investition in eine Produktionskapazität von 1 Mio. t kostet 415 Mio. € Vogl et al. (2018). Differenzkosten entstehen durch einen Wasserstoffbedarf von 8 GJ/t (zum Preis von 32,5 €/GJ) und Strombedarf von 2,28 GJ/t (zum Preis von 11 €/GJ) – Summe 285 €/t – gegenüber der konventionellen Hochofenroute mit einem Brennstoffbedarf von 17,08 GJ/t (vereinfacht Kohle zum Preis von 2,9 €/GJ) und Strombedarf von 0,85 GJ/t (zum Preis von 11 €/GJ) – Summe 58 €/t. Differenzkosten: 227 €/t. Die verminderten Treibhausgasemissionen (0,1 t CO<sub>2</sub>/t im Vergleich zu 1,71 t CO<sub>2</sub>/t) reduzieren die Differenzkosten bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 115 €/tCO<sub>2</sub> um 185 €/t. Es verbleibt eine Differenz von 42 €/t. Diese erzeugen für dieses Jahr, bei 1 Mio. t Produktion, neue OPEX-Finanzierungsbedarfe in Höhe von 42 Mio. €. Für die Realisierung von geförderten Anlagen ist ein Zeitraum von 3 Jahren zwischen Förderung der CAPEX und Inbetriebnahme angesetzt. Eine CAPEX-Förderung 2025 erzeugt also erstmalig 2028 OPEX-Förderbedarf.

Merkmal	Ausprägung		Einheit
	Untere Abschätzung	Obere Abschätzung	
Benchmarkdefinition im EU ETS	Gemeinsam mit konventionellen Verfahren	Getrennt von konventionellen Verfahren	-

Quelle: Eigene Annahmen, \*basierend auf Agora Energiewende (2021)

Der **Förderbedarf** (Tabelle 49) wird, ausgehend vom Finanzierungsbedarf, über zwei zentrale Annahmen ermittelt (Tabelle 51): die *Förderquote* und die *wirksame Förderung*. Die *Förderquote CAPEX* beschreibt, welcher Anteil der Investitionen staatlich bezuschusst wird. Der Wert ist für die untere Abschätzung mit 40 % angenommen, für die obere Abschätzung mit 50 %. Ein höherer Wert erhöht den Förderbedarf. Diese angenommene Bandbreite spiegelt den aktuellen Rahmen der Instrumente sowie zukünftig höhere Fördersätze durch die Anpassung der Leitlinien für staatliche Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen<sup>30</sup> wieder. Die *wirksame Förderung CAPEX* beschreibt, welcher Anteil der Fördersummen das Ziel erreichen und tatsächlich in Anlagen CO<sub>2</sub>-armer /CO<sub>2</sub>-freier Verfahren münden, die langfristig betrieben werden. Dieser Wert ist für beide Abschätzungen mit 80 % angenommen. Eine höhere wirksame Förderung verringert den Förderbedarf. Beide wirken nur auf die CAPEX-Komponente des Finanzierungsbedarfes und erzeugen einen *Bedarfan CAPEX-Förderung*. Für den OPEX wurde angenommen, dass die Förderung den Finanzierungsbedarf, also die Mehrkosten der CO<sub>2</sub>-armen Techniken, komplett decken muss.

Neben dem absoluten Förderbedarf des Instrumentenbündels im KIS-2030 ist im Folgenden der zusätzliche Förderbedarf ggü. dem Projektionsbericht 2021 ausgewiesen (Tabelle 50)<sup>31</sup>. Für die untere Abschätzung ergibt sich nach dieser Logik sogar ein negativer zusätzlicher Förderbedarf im KIS-2030. Dies lässt sich u.a. mit höheren CO<sub>2</sub>-Preisen begründen, welche die Finanzierungslücke verkleinern.

**Tabelle 49: Resultierender Förderbedarf für CO<sub>2</sub>-arme Produktionsverfahren im KIS-2030**

In Mio. € <sub>2020</sub>	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Summe
Resultierender Förderbedarf - <b>untere</b> Abschätzung	339	423	596	792	1.011	1.111	1.211	1.302	1.354	1.369	9.509
Resultierender Förderbedarf - <b>obere</b> Abschätzung	763	953	1.440	2.017	2.682	3.177	3.756	4.420	5.045	5.647	29.899

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

<sup>30</sup> [https://ec.europa.eu/competition-policy/sectors/energy-and-environment/legislation\\_de](https://ec.europa.eu/competition-policy/sectors/energy-and-environment/legislation_de)

<sup>31</sup> Beispielrechnung **untere** Abschätzung: 10.936 Mio. € Investitionsbedarf bei einer Förderquote von 40 % erzeugen 4.374 Mio. € CAPEX-Förderung. Wirken nur 80 % davon tatsächlich, erhöht dies den benötigten Betrag (für die gleiche Wirkung) auf 5.468 Mio. €. Dazu werden 4.041 Mio. € OPEX addiert, um den Förderbedarf von 9.509 M€ zu erhalten. Im Vergleich zum Förderbudget des MMS ist dies eine Minderbedarf von 2.151 Mio. €.

**Tabelle 50: Zusätzlicher Förderbedarf ggü. MMS des Projektionsberichts 2021**

In Mio. € <sub>2020</sub>	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Summe
Zusätzlicher Förderbedarf ggü. MMS – <b>untere</b> Abschätzung	-421	-777	-634	-418	-199	-99	1	92	144	159	-2.151
Zusätzlicher Förderbedarf ggü. MMS – <b>obere</b> Abschätzung	3	-247	210	807	1.472	1.967	2.546	3.210	3.835	4.437	18.239

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Tabelle 51 fasst Annahmen und Zwischenschritte zur Berechnung des Förderbedarfs zusammen.

**Tabelle 51: Berechnung des Gesamtförderbedarf zwischen 2021-2030 aus dem Finanzierungsbedarf im KIS-2030**

In Mrd. € <sub>2020</sub>	Untere Abschätzung	Obere Abschätzung
<b>Summe Finanzierungsbedarf (Mehrkosten) in KIS-2030</b>	15,0	37,3
<i>davon Investitionsbedarf (CAPEX)</i>	10,9	19,7
<i>davon Energie-Differenzkosten (OPEX)</i>	4,0	17,6
Förderquote CAPEX	40 %	50 %
Wirksame Förderung CAPEX	80 %	80 %
Resultierender Bedarf CAPEX-Förderung	5,5	12,3
<b>Summe staatlicher Förderbedarf (OPEX+CAPEX)</b>	9,5	<b>29,9</b>
Förderbudget MMS	11,7	
<b>Zusätzlicher Gesamtförderbedarf zwischen 2021-2030 ggü. MMS des Projektionsberichts 2021</b>	-2,2	<b>18,2</b>

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Zwischen diesem Instrumentenbündel und dem sektorübergreifenden Instrument „Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung“ – darin Teil d), "Steigerung der Ambition im EU-ETS" besteht eine starke Wechselwirkung. Diese ist durch den Parametrisierungsansatz der Differenzkosten bedingt: Hohe Zertifikatpreise senken die Differenzkosten der CO<sub>2</sub>-armen und CO<sub>2</sub>-freien Produktionsverfahren und verringern so den Finanzierungsbedarf. Im Rahmen der Einzelinstrumentenbewertung wurden die Effekte getrennt. Auch mit der Stärkung von grünen Leitmärkten bestehen große Wechselwirkungen, indem diese den zusätzlichen Finanzierungsbedarf über staatliche Förderung senken.

#### 7.1.2.1.4 „Grüne Leitmärkte“ für CO<sub>2</sub>-arme Produkte etablieren

CO<sub>2</sub>-arme Produkte können mögliche Mehrkosten in der Herstellung häufig nicht am Markt geltend machen, da es bei vielen Produkten keine entsprechende Marktnachfrage gibt. Dies liegt an mangelnder Nachfrage der Kunden, grundsätzlich gleichen Produkteigenschaften CO<sub>2</sub>-armer

und konventioneller Produkte, aber auch an fehlenden Informationen, die erlauben würden, Produkte entsprechend der CO<sub>2</sub>-Intensität zu differenzieren.

Langfristig müssen die Kosten der Dekarbonisierung an den Markt weitergegeben werden können. Die Etablierung von grünen Leitmärkten kann ein Instrument sein, das Herstellern erlaubt, bereits kurz- bis mittelfristig klimafreundliche Produkte zu höheren Preisen abzusetzen und so höhere Herstellungskosten einzupreisen. Die Maßnahme „Grüne Leitmärkte“ fasst verschiedene einzelne Instrumente zusammen, welche unterschiedliche Hebel adressieren, um Märkte für klimafreundliche Produkte zu schaffen.

Es sind grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten denkbar, welche grüne Leitmärkte etablieren und stärken würden. Darunter fallen z. B.:

- ▶ CO<sub>2</sub>-Verbrauchsabgabe: Abgabe auf CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei Produktion der Ware tatsächlich entstehen.
- ▶ Quote für CO<sub>2</sub>-arme Materialien: Produzenten müssen CO<sub>2</sub>-arme Materialien in steigender Menge verbauen.
- ▶ Quote für grüne Produkte: Händler müssen in steigender Menge CO<sub>2</sub>-arme Produkte anbieten.
- ▶ Technische Regeln, Bauordnungsrecht: Überarbeitung der Bauregeln mit Ziel Materialeffizienz, -substitution.
- ▶ Klimaorientierte Produktstandards: Vorgaben z. B. für Zement und Beton.
- ▶ Nachhaltige öffentliche Beschaffung: Öffentliche Hand muss nachhaltig beschaffen, insbesondere Bau, Fahrzeuge (z. B. 10 % CO<sub>2</sub>-armer Zement bis 202X); bei Maßnahmen im Bereich öffentliche Beschaffung sind dabei die Bestimmungen aus §45 Kreislaufwirtschaftsgesetz zu beachten.

Im Folgenden werden daraus abgeleitete Instrumente kurz beschrieben. Für die Quantifizierung ihrer Wirkung werden die Einzelinstrumente zu einem Bündel aggregiert.

#### 1. Treibhausgaskennzeichnung CO<sub>2</sub>-intensiver Produkte

Gerade im gewerblichen Kontext gewinnt die Betrachtung von indirekten Emissionen (insb. Scope 3) zunehmend an Verbreitung. Aktuell haben die Nutzer energieintensiver Produkte keine Informationen über die tatsächlichen Treibhausgasemissionen während deren Herstellung, was ein zentrales Hemmnis für die Etablierung von Märkten für grüne Produkte ist. Daher ist eine nachvollziehbare Treibhausgaskennzeichnung ein wesentlicher Baustein, hier Transparenz für alle Marktakteure zu schaffen. Betroffene Produktgruppen sind insbesondere treibhausgasintensive Produkte (bspw. Stahl, weitere Metalle, mineralische Stoffe).

#### 2. Ausweitung Ökodesign auf Vorprodukte, kumulierter Energieaufwand (KEA), kumulierte Treibhausgasemissionen, nachhaltiges Design

Bei vielen Produkten ist die Nutzungsphase nicht (mehr) die dominante Phase hinsichtlich der Umweltwirkungen. Eine Ausweitung der Regulierung auf andere Lebensphasen ist zwar mit dem aktuellen Instrumentarium theoretisch angelegt, praktisch aber derzeit nicht umsetzbar, da sehr stark auf am Produkt verifizierbare Eigenschaften abgehoben wird. Die in Vorprodukten erzeugten Emissionen sind am Endprodukt jedoch nicht messbar. Daher wurde von der EU-Kommission im Rahmen der Sustainable Product Initiative die Erweiterung des Betrachtungsrahmens

bei der produktbezogenen Regulierung vorgeschlagen. Ein Schwerpunkt ist dabei ein noch stärkerer lebenszyklusbezogener Ansatz. Hierdurch können dann auch Vorgaben zu den Vorkettenemissionen gemacht werden, die eine Nutzung von CO<sub>2</sub>-armen Ausgangsprodukten erfordern. Als Instrument kommt der von der Kommission geplante Digitale Produktpass in Betracht.

### 3. Öffentliche Beschaffung

Die öffentliche Hand ist für substantielle Anteile der Bautätigkeit in Deutschland verantwortlich. Die Möglichkeit der Einflussnahme auf die kumulierten Treibhausgasemissionen im Rahmen von Ausschreibungen sind teilweise über die Einbeziehung der Lebenszykluskosten möglich.

Die Grundätze für die öffentliche Beschaffung werden dahingehend geändert, dass regelmäßig konkrete Anforderungen an die kumulierten Treibhausgasemissionen gestellt werden können. Dadurch kann ein Markt für CO<sub>2</sub>-arme Produkte (bspw. Stahl, Glas, Zement) geschaffen werden.

Mit der Novellierung des KSG von 2021 ist eine Ergänzung des Berücksichtigungsgebots gemäß §13 (1) und (2) wie folgt vorgesehen, welches die Berücksichtigung des Klimaschutzes in der öffentlichen Beschaffung stärken soll.

### 4. Zielvorgaben für kumulierten Energieaufwand (KEA) und Treibhausgasemissionen für den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden

Im Jahr 2022 wird eine Verpflichtung zur Berechnung des KEA und der Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus bei der Planung von Neubauten und umfangreichen Sanierungsmaßnahmen von Gebäuden eingeführt. Grundlage sind die elektronische Lebenszyklusanalyse (eLCA) und die Ökobilanz-Datenbank ÖKOBAUDAT des Bundesamtes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Eine Baugenehmigung wird nur erteilt, wenn die geplante Baumaßnahme den Kriterien des Qualitätssiegels „Nachhaltige Gebäude“ des BMI entspricht.

Kriterien für Anforderungen an das Gebäude in Bezug auf die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus werden gerade für das Qualitätssiegel „Nachhaltige Gebäude“ des BMI erarbeitet. Es wird ca. 5 Kriterien geben, wie z. B. kumulierte Treibhausgasemissionen oder kumulierter Primärenergieaufwand.

### Parametrisierung und Modellierung

Die genannten Instrumente werden nicht einzeln differenziert, sondern als Bündel modelliert. Grüne Leitmärkte wirken je nach Ausgestaltung in unterschiedliche Richtung: Sie können Märkte für neue CO<sub>2</sub>-arme Grundstoffe wie Stahl oder Kunststoffe etablieren, aber auch Anreize für Kreislaufwirtschaft und effizienten Materialeinsatz in den Endverbrauchssektoren schaffen. Entsprechend handelt es sich um ein Querschnittsinstrument, das in die Quantifizierung anderer Instrumentenbündel und Wirkungskategorien einfließt. Es wurde angenommen, dass die Leitmärkte die Wirkung von Förderprogrammen hinsichtlich der Marktdiffusion von neuen CO<sub>2</sub>-armen Produktionstechnologien unterstützen. Starke Leitmärkte können den Förderbedarf deutlich senken. Eine separate Quantifizierung der Leitmarktinstrumente ist bei derzeitiger Datenglage und komplexer Wirkweise der Instrumente derzeit nicht möglich.

#### 7.1.2.1.5 Instrumentenbündel „Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft“

Instrumente, die Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft anreizen und entsprechende Maßnahmen in der Industrie unterstützen, sind oft kleinteilig und durch fehlende empirische Daten schwer zu quantifizieren. Im KIS-2030 wurden daher Instrumente, die diesbezüglich Wirkung entfalten können, zusammengefasst. KIS-2030-Instrumente mit Bezug zur Steigerung von Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft sind

- ▶ „Grüne Leitmärkte“ für CO<sub>2</sub>-arme Produkte

- ▶ Steigerung der Ambition des EU ETS (sektorübergreifend)
- ▶ Ambitioniertere Ausgestaltung der Mindeststandards unter der EG-Ökodesign-Richtlinie und der Sustainable Products Initiative (sektorübergreifend)
- ▶ Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung (sektorübergreifend)
- ▶ Förderung der Ressourceneffizienz und -substitution
- ▶ Klimamanagement in der Wirtschaft (flankierend)
- ▶ Beratung und Förderung für Ressourceneffizienz und -substitution (sektorübergreifend)

### Parametrisierung und Modellierung

Alle diese Instrumente haben gemein, dass die effiziente Materialverwendung entlang der Wertschöpfungskette und in den Endverbrauchssektoren angereizt wird, um einerseits Kosten zu senken und andererseits regulativen Vorgaben gerecht zu werden.

In der Modellierung wird davon ausgegangen, dass geänderte Nachfragemengen sich auf die Produktion in Deutschland niederschlagen und so die nationalen Treibhausgasemissionen beeinflussen. Entsprechend wird im Modell für ausgewählte CO<sub>2</sub>-intensive Grundstoffe, die Produktionsmenge gesenkt. Diese Reduktion beläuft sich je nach Produkt auf bis zu 2 % bis zum Jahr 2030 ggü. dem MMS. Ergänzend wurde angenommen, dass der Anteil der Sekundärroute bei der Rohstahlherstellung gegenüber dem MMS durch dieses Instrumentenbündel zusätzlich um 1 Mio. t bis 2030 ansteigt. Da die konkrete Ausgestaltung des Instrumentenbündels unsicher ist, ist diese Parametrisierung als ebenso unsichere Annahme anzusehen.

#### 7.1.2.1.6 Instrumentenbündel „Energieeffizienz“

Die vielfältigen Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz gegenüber dem MMS sind zu einem Instrumentenbündel zusammengefasst. Dazu gehören die folgenden Einzelinstrumente.

##### 7.1.2.1.6.1 Ausnahmetatbestände der Industrie stärker an Gegenleistungen binden

Die aktuellen Gegenleistungen für die Ausnahmetatbestände sind hinsichtlich der konkreten Instrumentenumsetzung bei den begünstigten Unternehmen nur mittelbar wirksam. Die branchenweite Primärenergieeffizienzverpflichtung entfaltet auf Grund der Einbeziehung des Umwandlungssektors und der dortigen Fortschritte de facto gar keine Wirkung. Die verpflichtende Einfügung von Energiemanagementsystemen führt auch nicht direkt zur Instrumentenumsetzung, sondern nur, wenn die Unternehmen dies aktiv angehen. Darüber hinaus sind verschiedene Prozesse ohne weitere Gegenleistung privilegiert. In diesem Instrument werden folgende Gegenleistungen eingeführt:

- ▶ Kopplung der Ausnahmetatbestände an die konkrete Umsetzung von Effizienzmaßnahmen
- ▶ Kopplung der Privilegierung von Prozessen an dieselben Voraussetzungen
- ▶ Einführung eines robusten Berichtswesens der Potenziale und der Maßnahmenumsetzungen.
- ▶ Verpflichtung der privilegierten Unternehmen, einen „Transformationsplan zur CO<sub>2</sub>-Neutralität“ zu entwickeln und zu veröffentlichen

Bislang kann von Unternehmen, die dem ETS unterliegen, keine weitere Effizienzverpflichtung gefordert werden. Bei Aufhebung der entsprechenden Beschränkung ergibt sich ein weiterer Hebel im Rahmen von Genehmigungsverfahren, Auflagen zur Steigerung der Effizienz zu machen.

Diese Auflagen können konkrete Anforderungen an Effizienzkenwerte oder die Einführung von Energiemanagementsystemen mit Abwärmenutzungskonzept sein. Basierend auf den im Rahmen von Energiemanagement oder Abwärmenutzungskonzept ermittelten Potenzialen ist darüber hinaus eine Umsetzungspflicht für wirtschaftliche Maßnahmen denkbar.

*7.1.2.1.6.2 Aufhebung der Sperrklausel nach § 5 Abs. 2 Satz 2 BImSchG und eine Konkretisierung der Anforderungen zur sparsamen und effizienten Energieverwendung in genehmigungsbedürftigen Industrieanlagen auf Basis von § 5 Abs. 1 Nr. 4 BImSchG durch eine Verordnung über effiziente Energienutzung*

Im Bundes-Immissionsschutzgesetz ist in § 5 Abs. 1 Nr. 4 für Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen die Grundpflicht zur sparsamen und effizienten Energieverwendung („Energieeffizienzgebot“) festgelegt. Für Anlagen, die am EU-ETS teilnehmen, sind Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz gegenwärtig durch die Sperrklausel nach § 5 Abs. 2 Satz 2 BImSchG ausgeschlossen. Aufgrund fehlender Konkretisierung für Genehmigungsbehörden wird der § 5 Abs. 1 Nr. 4 BImSchG bislang im Vollzug nur in Einzelfällen angewendet.

Dieses Instrument schlägt daher vor,

- ▶ die Sperrklausel nach § 5 Abs. 2 Satz 2 aufzuheben und
- ▶ das Energieeffizienzgebot des § 5 Abs. 1 Nr. 4 BImSchG insofern zu konkretisieren, dass eine Verordnung über effiziente Energienutzung nach § 7 BImSchG erlassen wird. Die Verordnung soll für Neuanlagen und Bestandsanlagen Verpflichtungen enthalten; für Bestandsanlagen sind Effizienzmaßnahmen innerhalb eines angemessenen Zeitraums durchzuführen. Die näheren Inhalte müssen noch erarbeitet werden. Ein noch festzulegender typisierter Wirtschaftlichkeitsmaßstab trägt den notwendigen Verhältnismäßigkeitserwägungen Rechnung und schafft damit Rechtssicherheit für Anlagenbetreiber und Vollzugsbehörden.

**Parametrisierung**

In der Industrie besteht ein großes ungenutztes Abwärmepotenzial (~275 PJ, Papapetrou et al. (2018)). Dieses Potenzial ist jedoch sehr heterogen hinsichtlich der zeitlichen Verfügbarkeit, der technischen Nutzbarkeit sowie der anfallenden Menge am einzelnen Standort. So ist insbesondere zu unterscheiden zwischen der Abwärme, die in kleinerem Umfang beispielsweise bei Druckluftherzeugern anfällt und überwiegend lokal genutzt werden kann, und der Abwärme, die in den großen industriellen Anlagen anfällt und deren Menge auch eine wirtschaftliche Nutzung im überbetrieblichen und großmaßstäblichen Umfang interessant macht. Dieses Instrument zielt vor allem auf letzteres, bisher nur in Ansätzen ausgeschöpfte Potenzial.

Für die Wirkungsabschätzung wird davon ausgegangen, dass dieses Instrument zum 1.1.2023 in Kraft tritt. Die Quantifizierung des Instruments erfolgt über Annahmen zur stärkeren Ausschöpfung des wirtschaftlichen Energieeffizienzpotenzials für die Abwärme im Rahmen der integrierten Bewertung im Maßnahmenbündel „Energieeffizienz“.

*7.1.2.1.6.3 Energieeffizienz in der Wirtschaft - Förderung der außerbetrieblichen Abwärmenutzung*

Über die „Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft“ (EEW) wird die Erschließung von industriellen Abwärme-Quellen derzeit mit einem Satz von 30 % (KMU: 40 %) der förderfähigen Investitionskosten gefördert. Der Fördersatz für die Nutzung von außerbetrieblich verwendeter Abwärme (z. B. als Fernwärme) wird auf 40 % (KMU: 50 %) erhöht, um das vorhandene industrielle Abwärme-Potenzial auszuschöpfen.

**Parametrisierung**

Die Abschätzung der Instrumentenwirkung erfolgt bottom-up auf Basis einer jährlich zugrunde gelegten Fördersumme, die mit den durchschnittlichen spezifischen Einsparungen der entsprechenden Vorhaben aus dem Vorläuferprogramm („Richtlinie für die Förderung der Abwärmevermeidung und Abwärmenutzung in gewerblichen Unternehmen“, Förderjahre 2016-2018) verknüpft wird. Die Instrumentenwirkung ist Teil des Maßnahmenbündels „Energieeffizienz“.

*7.1.2.1.6.4 Degressive Abschreibung für Investitionen in Klimaschutz und Energieeffizienz*

Mit der Einführung von beschleunigten Abschreibungsmöglichkeiten für Investitionen in energieeffiziente Produkte und Anlagen soll ein (aufkommensneutraler) Steueranreiz für Unternehmen in Industrie und Gewerbe gesetzt werden. Dieser Instrumentenvorschlag basiert auf Erfahrungen in Irland und dem Vereinigten Königreich, die ein solches Instrument eingeführt haben. Danach können durch dieses Instrument bestehende Hemmnisse für die Durchführung von Energieeffizienzinvestitionen abgebaut und damit bestehende Effizienzpotenziale stärker ausgeschöpft werden (Department of Finance Ireland 2017). Die Einführung eines solchen Instruments wurde bereits im Rahmen der Erarbeitung des Klimaschutzprogramms 2030 diskutiert, jedoch damals nicht umgesetzt. Im Rahmen des Konjunkturpaketes von Juni 2020 wurde bereits eine befristete beschleunigte Abschreibungsmöglichkeit für Investitionsgüter geschaffen, an die mit diesem Instrument angeknüpft werden kann. Neben Energieeffizienzinvestitionen kann der Steueranreiz auch auf weitere Klimaschutzinvestitionen ausgeweitet werden (DENEFF, Fraunhofer ISI, Öko-Institut 2021).

**Parametrisierung**

Die Abschätzung der Instrumentenwirkung erfolgt bottom-up auf der Basis von Annahmen zu einer anteilmäßigen Ausschöpfung eines wirtschaftlichen Effizienzpotenzials (basierend auf BfEE (Prognos et al. 2018)).

*7.1.2.1.6.5 Umsetzungspflicht für Maßnahmen aus Energieaudits*

Bei diesem Instrument geht es um eine Weiterentwicklung des bestehenden ordnungsrechtlichen Instruments der Durchführung von Energieaudits nach § 8 EDL-G, das mit einem Nachweis tatsächlich erbrachter Effizienzsteigerung verknüpft wird. Es wird eine verpflichtende Durchführung von Effizienzmaßnahmen für alle Unternehmen vorgeschlagen, die unter die Durchführungspflicht eines Energieaudits nach § 8 EDL-G fallen, beginnend mit dem nächsten anstehenden Re-Audit (2023). Bei der Ausgestaltung des Instruments werden eventuelle Änderungen von Art. 8 EED in dem für Mitte Juli 2021 angekündigten Revisionsvorschlag der Europäischen Kommission berücksichtigt.

**Parametrisierung**

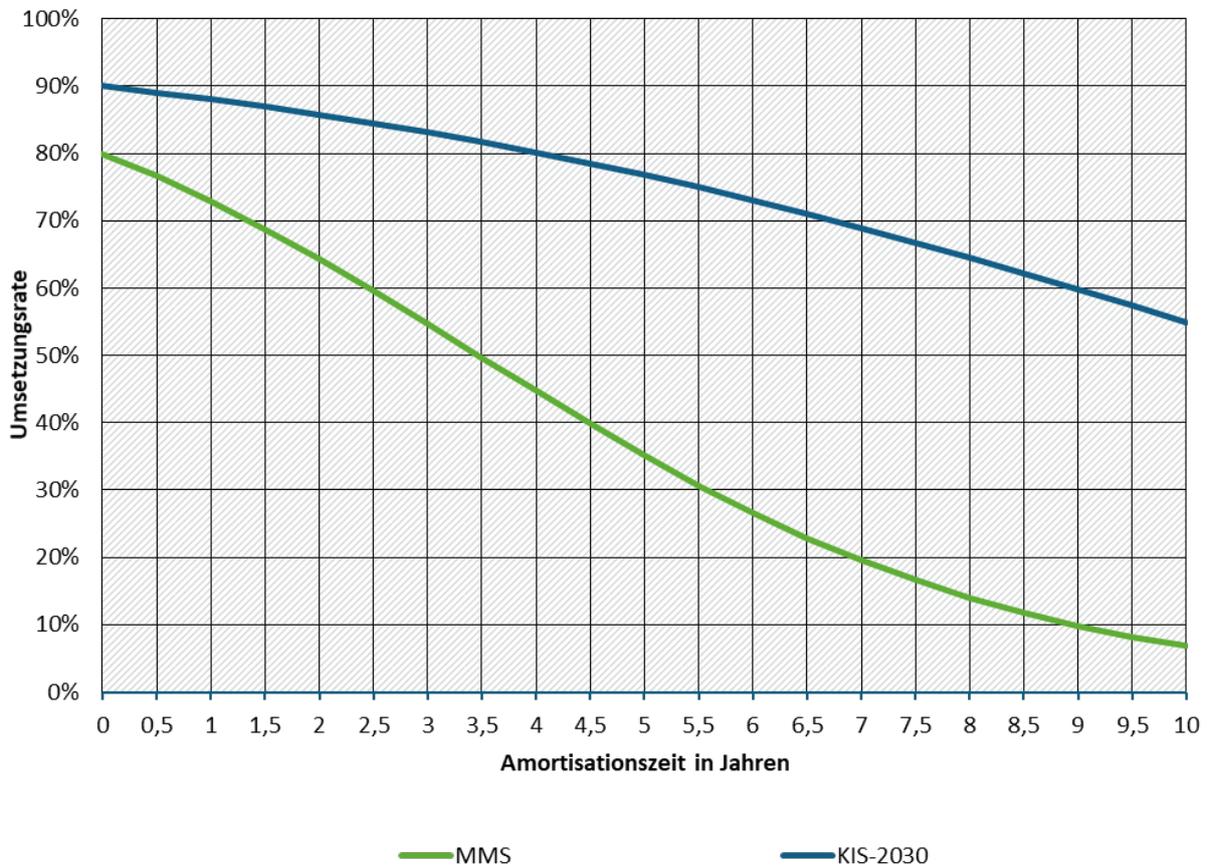
Die Abschätzung der Instrumentenwirkung erfolgt bottom-up, wiederum auf der Basis von Annahmen zu einer anteilmäßigen zusätzlichen Ausschöpfung eines wirtschaftlichen Effizienzpotenzials.

**Modellierung des Instrumentenbündels Energieeffizienz im Modell FORECAST**

Die Quantifizierung der Instrumente erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird über eine Einzelbewertung der Instrumente ihre individuelle Wirkung berechnet. Dabei wird auf evtl. verfügbare empirische Daten zu den Instrumenten zurückgegriffen. Im zweiten Schritt wird das Modell FORECAST auf diese Wirkungsmenge und Parameter kalibriert.

Das Instrumentenbündel wird im Modell abstrahiert durch eine höhere Adoptionsrate von Energieeffizienzmaßnahmen modelliert. Diese bezieht sich nicht auf individuelle Maßnahmen, sondern verändert die von Investierenden angelegte Anforderungen und Erwartungen an Amortisationszeiträume (Abbildung 29)<sup>32</sup>.

**Abbildung 29: Umsetzungsrate von Energieeffizienzmaßnahmen abhängig von ihrer Amortisationszeit im Modell FORECAST**



Quelle: FORECAST Modellannahmen (Fraunhofer ISI)

Damit wird eine höhere Risikobereitschaft (oder eine Risikoübernahme durch andere) unterstellt. Dies umfasst auch Verpflichtungen zur Umsetzung von Maßnahmen, die ansonsten außerhalb der akzeptierten Parameter lagen. Zur Einordnung ist zu erwähnen, dass bereits die im MMS angenommenen Parameter sehr ambitioniert waren und über die in der Industrie beobachteten Verhaltensmuster (relevante Adoption von Energieeffizienzmaßnahmen etwa bis zu einer Amortisationszeit von 3 Jahren) hinausgingen. Die im KIS-2030 unterstellte, deutlich ausgeweitete Umsetzungsrate ist nur möglich, wenn Risikoabwägungen massiv neu gedacht werden. Darüber hinaus ist von Risikoverlagerungen (die nicht im Modell abgebildet sind) auszugehen. Es gilt für alle Energieeffizienzmaßnahmen (sowohl im MMS als auch KIS-2030), dass sie vor Ende ihrer Lebensdauer ihre Kosten einspielen – also stets wirtschaftlich sind<sup>33</sup>. Aus den Annahmen zum Investitionsverhalten bei Energieeffizienzmaßnahmen ergibt sich im KIS-2030

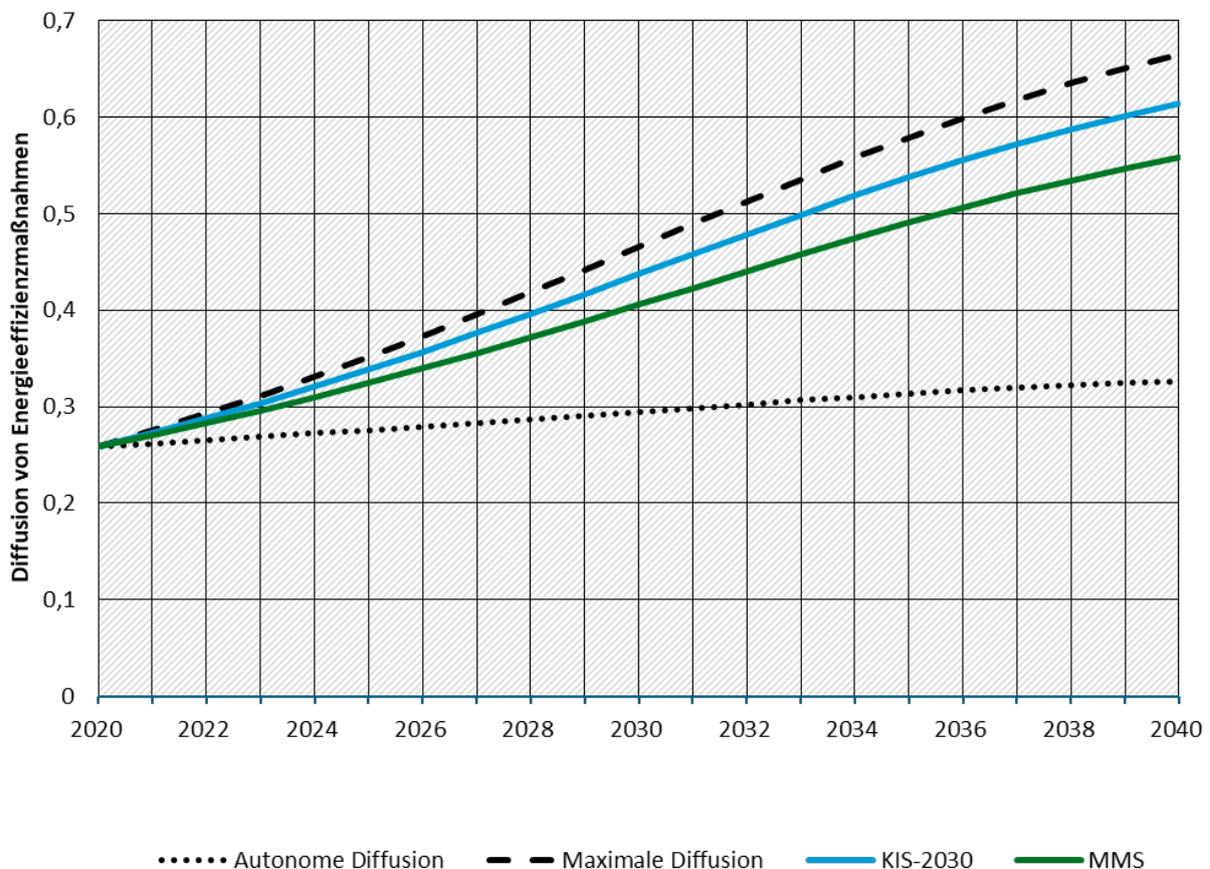
<sup>32</sup> Ablesebeispiel Abbildung 29: Eine Energieeffizienzmaßnahme mit einer Amortisationszeit von 5 Jahren (Abszisse) wird im MMS (grüne Linie) zu etwa 35 % (Ordinate) umgesetzt. Im KIS-2030 (blau) besteht eine Umsetzungswahrscheinlichkeit von etwa 75 %.

<sup>33</sup> In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass die Amortisationszeit ausschließlich ein Risikomaß ist, es also im eigentlichen Sinn nur eine – allerdings oft genutzte – Hilfestellung für Investitionsentscheidungen darstellt. Es ersetzt keine Wirtschaftlichkeitsberechnung und es ist davon auszugehen, dass bei eingehenderer Beschäftigung mit individuellen Energieeffizienzmaßnahmen die Umsetzungsrate steigt.

eine stärkere Umsetzung derselben und damit eine insgesamt höhere Energieeffizienz als im MMS, wie in Abbildung 30 gezeigt. Im Korridor der technisch möglichen ("maximalen") und minimalen ("autonomen") Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen ist das KIS-2030 sehr stark am oberen Rand lokalisiert – eine stärkere Diffusion ist im Grunde nur theoretisch denkbar, da der Aufwand für die Umsetzung bei Annäherung an das Maximum überproportional ansteigt<sup>34</sup>.

Bis 2030 steigt die Wirkung – berechnet basierend auf vermiedener Brennstoffnutzung – stetig an und erreicht 4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (Tabelle 45).

**Abbildung 30: Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen**



Quelle: FORECAST Modellannahmen (Fraunhofer ISI)

#### 7.1.2.1.7 Instrumente in Bezug auf Industriekraftwerke

Siehe die Instrumente für Stromerzeugung und gekoppelte Wärmeerzeugung in der Energiewirtschaft (Abschnitt 6.1.4.1).

#### 7.1.2.1.8 Ambitionssteigerungen bei den Mengenbeschränkungen von HFKW

Die Maßnahme geht davon aus, dass im Rahmen der anstehenden Revision der EU-F-Gas-Verordnung 517/2014 die EU-weit geltenden Mengenbeschränkungen für HFKW („Phase-down“) über 2030 hinaus verlängert und in einem solchen Maße verschärft werden, dass damit eine Einhaltung derjenigen Zielwerte für den HFKW-Verbrauch ab 2034 und 2036 sichergestellt wird,

<sup>34</sup> Dies betrifft die stark abstrahierte Modellierungssicht, wenn die Instrumente wirksam sind. Die Umsetzung konkreter Maßnahmen am Standort ist mit dieser Aussage nicht gemeint – insbesondere nicht, dass etwa Energieeffizienzpotenziale erschöpft wären.

die für die EU unter dem Montrealer Protokoll (Beschluss von Kigali) gelten. Eine EU-interne Einigung auf mindestens eine solche Verschärfung der EU-F-Gas-Verordnung kann als sicher angenommen werden.

Eine darüberhinausgehende Verschärfung des EU-internen HFKW-Phase-downs auch schon vor 2030 und auch über die Anforderungen des Montrealer Protokolls hinaus ist denkbar als Ergebnis des aktuell laufenden Revisionsprozesses<sup>35</sup>, liegt aber nicht in der Entscheidungskompetenz der Bundesregierung und wird deshalb im KIS-2030 nicht berücksichtigt.

### Parametrisierung

Die Maßzahlen für die Einhaltung der Mengengrenzungen für HFKW einerseits unter der EU-F-Gas-Verordnung (Inverkehrbringen von HFKW – „placing on the market“ – „POM“) und andererseits unter dem Montrealer Protokoll (Verbrauch von HFKW – „consumption“) tragen zwar dieselbe Einheit (t CO<sub>2</sub>-Äquivalente), lassen sich aber nur ex-post exakt ineinander umrechnen, nicht ex-ante. Einen wesentlichen Beitrag zur Differenz zwischen beiden Maßzahlen liefert die Menge an HFKW, die in der EU außerhalb des Quotensystems des Phase-down zum Einsatz in Dosier-Aerosolen für die Verabreichung pharmazeutischer Wirkstoffe („metered dose inhalers“ - MDIs) auf den Markt gebracht wird.

Für die Parametrisierung der Maßnahmen wird angesichts der in der Vergangenheit für MDIs auf den Markt gebrachten Mengen geschätzt, dass der Zielwert des EU HFKW-Phase-down (gemessen als POM) ab 2034 um etwa 10 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq abgesenkt würde. Bei der Berechnung der Emissionsminderungen, im Wesentlichen angesichts eines damit schneller notwendig werden Umstiegs bei neuen Kälte- und Klimaanlage auf Kältemittel mit niedrigerem GWP, ist zu beachten, dass diese wegen der üblicherweise langen Lebensdauer der Anlagen (bis zu 30 Jahren) zum größten Teil erst später zu beobachten sein werden. Für das KIS-2030 werden angesichts dessen die zusätzlichen Emissionsminderungen im Vergleich zum MMS über eine proportionale Fortschreibung und Steigerung der innerhalb des MMS modellierten jährlichen Emissionsminderungsraten geschätzt.

#### 7.1.2.1.9 Inverkehrbringungsverbote für SF<sub>6</sub> in elektrischen Schaltanlagen

Die Maßnahme geht davon aus, dass für den Einsatz von SF<sub>6</sub> in neuen elektrischen Schaltanlagen Anwendungsverbote erlassen werden. Dies kann entweder im Rahmen der anstehenden Revision<sup>36</sup> der EU-F-Gas-Verordnung 517/2014 geschehen oder in einer nationalen Regelung.

### Parametrisierung

Es wird davon ausgegangen, dass die Verbote mit einem Zeitplan in Kraft treten, welcher zwischen verschiedenen Spannungsebenen (Hochspannung und Mittelspannung) und weiteren technischen Differenzierungen unterscheidet und ggf. technisch definierte Ausnahmen beinhaltet.

Bei der Parametrisierung ist weiterhin zu beachten, dass ein Großteil der in Deutschland hergestellten und mit SF<sub>6</sub> befüllten Schaltanlagen ins Ausland exportiert wird. Die SF<sub>6</sub>-Emissionen aus dem Befüllungsprozess solcher exportierten Schaltanlagen werden im Modell ebenfalls berücksichtigt. Diese Emissionen werden von einem Anwendungsverbot in Deutschland nicht berührt und entwickeln sich deshalb im KIS-2030 identisch wie im MMS.

Für die Wirkung der Verbote wird angenommen, dass diese ab 2024 die erste Wirkung entfalten, und der Anteil von SF<sub>6</sub> an der Befüllung von Schaltanlagen für den deutschen Markt in der

<sup>35</sup> Die Europäische Kommission hat am 5. April 2022 einen Vorschlag für die Revision vorgelegt, der eine Verschärfung des HFKW-Phase-down ab 2024 beinhaltet. Verhandlungen im Europäischen Parlament und im Rat zu diesem Vorschlag stehen noch aus.

<sup>36</sup> Die Europäische Kommission hat am 05. April 2022 einen Vorschlag für die Revision vorgelegt, der Verbote von SF<sub>6</sub> in neuen Schaltanlagen enthält. Verhandlungen im Europäischen Parlament und im Rat zu diesem Entwurf sind noch ausstehend.

Summe von 100 % im Jahr 2023 auf gut 50 % im Jahr 2030, und unter 30 % im Jahr 2040 sinkt. Dementsprechend werden Emissionsminderungen aus der Befüllung und aus dem Betrieb von neuen Schaltanlagen unter Berücksichtigung der Lebensdauer modelliert. Für Schaltanlagen ist eine Lebensdauer von etwa 40 Jahren zu berücksichtigen. Die Emissionen, die aus der ab etwa Mitte der 2020er Jahre anstehenden Entsorgung von alten seit den 1980er Jahren installierten Schaltanlagen stammen, bleiben unberührt.

#### 7.1.2.2 MMS

Im zuvor veröffentlichten MMS des Projektionsberichts 2021 wurden die folgenden Instrumente berücksichtigt:

- ▶ EU-Emissionshandel
- ▶ Energie- und Stromsteuer
- ▶ CO<sub>2</sub>-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme
- ▶ EEG-Umlagesenkung
- ▶ Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)
- ▶ Besondere Ausgleichsregelung (BesAR) des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)
- ▶ Energieberatung im Mittelstand
- ▶ Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz (MIE)
- ▶ Mindesteffizienzstandards – EG-Ökodesign-Richtlinie
- ▶ Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit
- ▶ NKI: Kälte-Klima-Richtlinie
- ▶ Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke (IEEKN)
- ▶ Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Förderwettbewerb
- ▶ Pilotprogramm Einsparzähler
- ▶ Energieauditpflicht für Nicht-KMU (Umsetzung Art. 8 EED)
- ▶ KfW-Energieeffizienzprogramm
- ▶ NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen
- ▶ Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie
- ▶ Programm CO<sub>2</sub>-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien
- ▶ EU-ETS-Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms
- ▶ Nationale Wasserstoffstrategie: CCfDs
- ▶ Nationale Wasserstoffstrategie: IPCEI
- ▶ 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
- ▶ Ressourceneffizienz und -substitution
- ▶ Neue Konstruktionstechniken und Werkstoffe für eine emissionsarme Industrie
- ▶ Verabschiedung Verpackungsgesetz und Novellierung Gewerbeabfallverordnung
- ▶ 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
- ▶ FONA - Forschung Für Nachhaltigkeit - Strategie des BMBF

Instrumente, die sich auf Industriekraftwerke beziehen, können Abschnitt 6.1.4.2 entnommen werden.

Instrumente, die auf eine Reduzierung der F-Gas Emissionen abzielen:

- ▶ F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase
- ▶ Chemikalien-Klimaschutzverordnung
- ▶ MAC-Richtlinie 2006/40/EG (Mobile air conditioning)
- ▶ EU-ETS
- ▶ Selbstverpflichtung der SF<sub>6</sub>-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln >1 kV
- ▶ Kälte-Klima-Richtlinie

Eine Beschreibung der Instrumente und Maßnahmen sowie deren Parametrisierung kann Öko-Institut et al. (2021) entnommen werden.

## 7.2 Energieverbrauch (ohne Industriekraftwerke)

### 7.2.1 Methodik

Die verwendete Methodik entspricht der des Projektionsberichts 2021 (Öko-Institut et al. 2021) und ist dort ausführlich beschrieben. Für die Modellierung wurde das Industriemodell FORECAST des Fraunhofer ISI genutzt (Modellbeschreibung siehe Fleiter et al. (2018) und Anhang B.3 Modellbeschreibungen). Das Modell ist kalibriert auf die Energiebilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (AGEB 2022). Die Berechnung der Treibhausgasemissionen, wie sie in diesem Bericht dargestellt sind, erfolgt hingegen auf Basis der aus dem "Zentralen System Emissionen" (ZSE) ausgespielten Daten des Treibhausgasinventars. Ergebnisse werden entsprechend umgerechnet. Aufgrund des höheren Detailgrades der unmittelbaren Modellergebnisse

gegenüber der Umrechnung, werden für tiefergehende Analysen nicht umgerechnete Modellergebnisse verwendet. Dazu gehören insbesondere Energieträgeranteile von einzelnen Subsektoren oder Anwendungsgebieten sowie Ergebnisse zur Diffusion ausgewählter Technologien. Treibhausgasemissionen werden stets nach ZSE-Abgrenzung dargestellt. Zu den maßgeblichen Unterschieden zwischen den beiden Betrachtungsebenen zählen die Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen der Produktverwendung, die Zuordnung von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen von Anlagen der KWK sowie die Zuordnung der Nutzung von Koks in Hochöfen zu energie- oder prozessbedingten Treibhausgasemissionen.

Der hier als Energiebedarf dargestellte Teilbereich entspricht in der ZSE-Methodik den Posten "Wärmeerzeuger und Prozessfeuerung" und "bauwirtschaftlicher Verkehr", wie sie in Tabelle 71 dargestellt sind – mit dem bedeutsamen Unterschied, dass der für die Erzeugung von Wärme genutzte Energieeinsatz in KWK-Anlagen hier dem Endenergiebedarf der Industrie zugeordnet ist (nicht den Industriekraftwerken).

### 7.2.2 Rahmendaten

Die verwendeten sektorspezifischen Rahmendaten entsprechen denen des Projektionsberichts 2021 (Öko-Institut et al. 2021). Dazu gehören maßgeblich Wertschöpfung der Subsektoren (identisch mit Öko-Institut et al. (2021)) und Produktionsmengen energieintensiver Güter (ausgehend von Öko-Institut et al. (2021), mit instrumentenbedingten Änderungen der Herstellungsverfahren im Verlauf des Szenarios). Für weitere Änderungen übergreifender Rahmendaten siehe Kapitel 4 (z. B. Energieträger- und CO<sub>2</sub>-Preise). Im Folgenden sind Annahmen zur Wertschöpfung und Produktion beschrieben.

Zentrale Aktivitätsgröße für den Sektor Industrie ist die Entwicklung der realen Bruttowertschöpfung je Wirtschaftszweig (Tabelle 52). Für die energieintensiven Branchen der Industrie sind vor allem die physischen Produktionsmengen relevante Bestimmungsfaktoren des Energieverbrauchs, die sich wiederum zum Teil von der Bruttowertschöpfung ableiten lassen.

Die Entwicklung der Bruttowertschöpfung (BWS) orientiert sich dabei an der hinterlegten BIP-Entwicklung (Kapitel 4) und nimmt darüber hinaus einen strukturellen Wandel von der energieintensiven Grundstoffindustrie hin zu weniger energieintensiven Branchen wie dem Maschinen- oder Fahrzeugbau an. Letztere Branchen weisen also ein höheres jährliches Wachstum auf. Tabelle 52 zeigt die entsprechenden Annahmen. Statistische Daten sind auf Ebene der Wirtschaftszweige bis 2018 verfügbar, während die BWS des gesamten Verarbeitenden Gewerbes bereits für das Jahr 2020 verfügbar ist. Entsprechend wird im Pandemiejahr 2020 von einem Rückgang um etwa 10 % ggü. dem Vorjahr ausgegangen. Dies ist relativ gemessen ein deutlich stärkerer Einbruch als beim BIP (5 %). Da für die einzelnen Wirtschaftszweige für das Jahr 2020 noch keine statistischen Daten verfügbar sind, wurde dieser Rückgang der BWS gleichmäßig auf die Wirtschaftszweige verteilt. Lediglich die Branche "Verarbeitung Steine Erden" stellt eine Ausnahme dar. Aufgrund der auch 2020 sehr hohen Konjunkturdaten für die Bauwirtschaft wird davon ausgegangen, dass auch die Branche "Verarbeitung Steine Erden" keinen merklichen Rückgang im Jahr 2020 verzeichnet hat. Entsprechend der BIP-Entwicklung wird auch für die BWS in allen Wirtschaftszweigen davon ausgegangen, dass diese bis 2025 wieder auf dem ursprünglichen Wachstumspfad ist, auf dem sie vor dem Corona-bedingten Rückgang im Jahr 2020 war.

**Tabelle 52: Entwicklung der Bruttowertschöpfung der Industrie je Wirtschaftszweig (Mrd. €<sub>2015</sub>)**

Wirtschaftszweig der Industrie	2015	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Fahrzeugbau	108	115	100	123	128	134	141

Wirtschaftszweig der Industrie	2015	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Sonstiges Verarbeitendes Gewerbe	98	107	94	113	115	118	122
Maschinenbau	82	92	81	100	104	109	115
Ernährung und Tabak	49	51	44	54	55	57	59
Metallbearbeitung	44	49	42	50	50	50	51
Sonstige chemische Industrie	31	32	28	34	35	37	38
Grundstoffchemie	26	26	21	25	25	26	26
Gummi- u. Kunststoffwaren	25	27	23	28	28	28	29
Papiergewerbe	10	11	9	12	12	12	12
NE-Metalle, -gießereien	10	10	9	11	11	11	11
Verarbeitung v. Steine u. Erden	8	9	9	9	9	9	9
Glas u. Keramik	6	7	6	7	7	7	7
Metallerzeugung	6	8	6	8	7	8	8
Gew. v. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	2	2	2	2	2	2	2
<b>Industrie Summe</b>	<b>504</b>	<b>546</b>	<b>473</b>	<b>574</b>	<b>588</b>	<b>605</b>	<b>630</b>

Quelle: (StBA) für 2015, 2020, Fortschreibung Fraunhofer ISI

In Tabelle 53 sind die Annahmen zur Entwicklung der jährlichen Produktionsmengen dargestellt. Während die Produktionsmengen für die Jahre 2015 und 2018 (bei Stahl auch für 2020) aus verschiedenen Statistiken der Verbände sowie vom Statistischen Bundesamt stammen, stellt die Fortschreibung eine Annahme dar, die sich an die Erwartungen der Branchen sowie der Bruttowertschöpfung orientiert. Die Entwicklung der Wertschöpfung in der übergeordneten statistischen Einheit, dem NACE-2-Steller (nach europäischer Aktivitätsklassifizierung), muss jedoch nicht notwendigerweise parallel zur physischen Produktion verlaufen, da sich die Wertschöpfung zum großen Teil an der Produktion der höherwertigen weniger energieintensiven Zwischenprodukte orientiert und weniger an der Produktion energieintensiver Grundstoffe. Entsprechend ist das jährliche Wachstum der Produktionsmenge häufig niedriger als das Wachstum der Wertschöpfung der jeweiligen Branche. Weiterhin wurde für die Fortschreibung der Produktionsmengen die gleiche Methode wie für vorhergehende Projektionsberichte genutzt, wodurch eine hohe Vergleichbarkeit gewährleistet wird. Hinsichtlich des wirtschaftlichen Rückgangs im Jahr 2020 zeigt sich bei den Produktionsmengen eine ähnliche Entwicklung wie bei der BWS: Bei vielen Produkten ist im Jahr 2020 ein deutlicher Rückgang zu beobachten, der aber bis 2025 wieder kompensiert wird. Ausnahme ist auch hier die Zementproduktion, die aufgrund einer hohen Nachfrage aus der Baubranche auf hohem Niveau bleibt.

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

**Tabelle 53: Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe**

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

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

### 7.2.3 Ergebnisse

In Ergänzung zu den Wirkungen der untersuchten Instrumente auf die Treibhausgasemissionen (Tabelle 45), werden im Folgenden weitere Modellierungsergebnisse dargestellt. Dazu gehören maßgeblich der Endenergiebedarf, die Energieträger- und Anwendungsstruktur (darunter Strom- und Wasserstoffnutzung und die Diffusion klimaneutraler Produktionsverfahren) sowie Produktionsmengen bedeutender industrieller Produkte. Diese Darstellungen plausibilisieren die Instrumentenwirkung und machen ihre Modellierung transparenter.

Es werden zunächst die Ergebnisse des KIS-2030<sup>37</sup> ausführlich vorgestellt, gefolgt von denen (jeweils sehr kurz gehaltenen) einer BEHG-Variante und (als Vergleich) einer Übersicht des MMS. Für weitere Details zu Letzterem sei auf Öko-Institut et al. (2021) verwiesen.

#### 7.2.3.1 KIS-2030

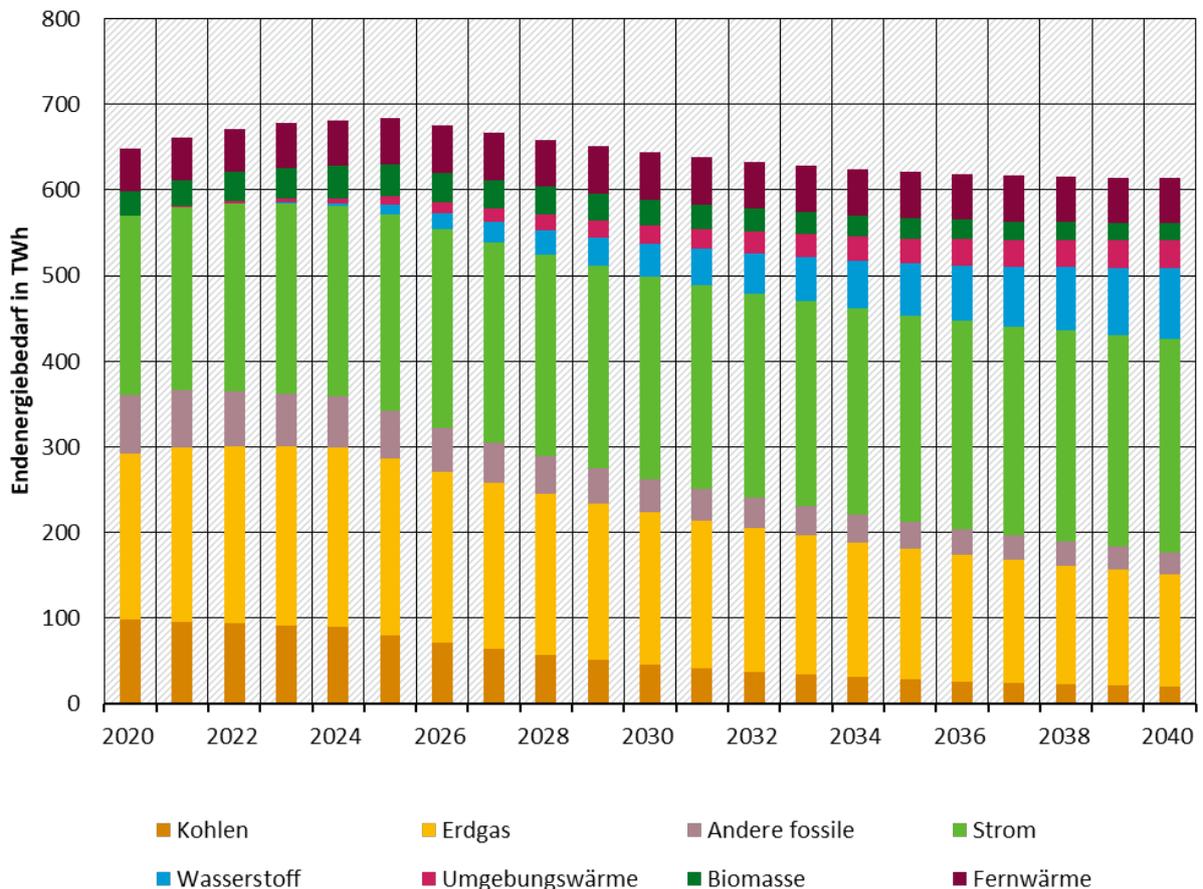
##### 7.2.3.1.1 Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf der Industrie sinkt im KIS-2030 zwischen 2020 und 2030 nur leicht (von 648 TWh auf 643 TWh, Abbildung 31 und Tabelle 54). Ausschlaggebend dafür ist, dass das Szenario von einer wirtschaftlichen Erholung aus der Corona-Krise bis 2025 (Anstieg auf 684 TWh) ausgeht – in diesem Zeitraum steigt die wirtschaftliche Aktivität an und übersteigt effizienzbedingte Bedarfsreduktionen. Parallel zu der nach 2025 einsetzenden Energiebedarfsreduktion werden CO<sub>2</sub>-arme und CO<sub>2</sub>-freie Produktionsverfahren relevant (Abbildung 42 bis Abbildung 44). Deren Marktdiffusion bewirken eine verstärkte Elektrifizierung (Abbildung 37 bis Abbildung 39) und Nutzung von Wasserstoff (Abbildung 40). Dadurch werden fossile Brennstoffe ersetzt. Deren Nutzung sinkt bis 2030 (verglichen mit 2020) von 361 TWh (56 % des Energiebedarfes) auf 262 TWh (41 % des Energiebedarfes). Die Nutzung von Biomasse wird mittel- und

<sup>37</sup> Im Folgenden getätigte Aussagen beziehen sich – auch wenn nicht ausdrücklich so beschrieben – generell auf das berechnete Szenario. Formulierungen wie "der Energieträgeranteil von Strom wird steigen" sind im Rahmen der Szenarioanalyse als "wenn-dann Aussagen" zu verstehen. Sie stellen daher insbesondere keine Prognosen dar.

langfristig auf einem – gemessen am Gesamtenergiebedarf – stabilen Niveau gehalten (~4 %)<sup>38</sup>. Dabei wird davon ausgegangen, dass in der Industrie anfallende Reststoffe dort weiter genutzt werden, dass aber keine zusätzliche Biomasse verwendet wird.

**Abbildung 31: Endenergiebedarf (energetisch) der Industrie nach Energieträgern, 2020-2040**



Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

**Tabelle 54: Endenergiebedarf (energetisch) der Industrie nach Energieträgern, 2020-2040**

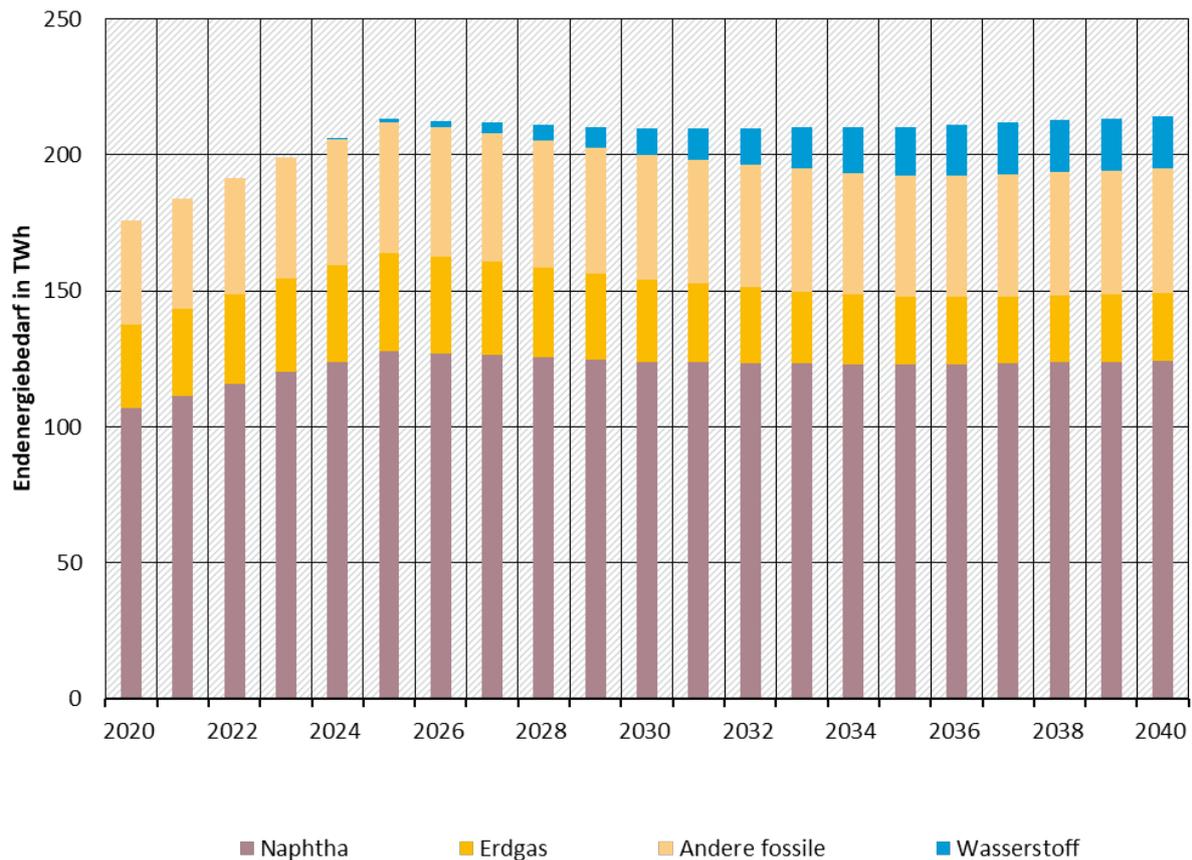
Werte in TWh	Kohlen	Erdgas	Andere fossile	Strom	Wasserstoff	Umgebungs-wärme	Bio-masse	Fern-wärme
2020	98	195	68	209	0	0	29	49
2021	96	204	66	214	0	1	31	50
2022	94	207	64	219	0	3	34	51
2023	92	208	62	222	2	5	36	52
2024	90	209	60	223	4	6	38	53

<sup>38</sup> Kurzfristig steigt die Biomassennutzung in der Industrie an (um in der Spitze etwa 9 TWh). Dabei handelt es sich um eine Reaktion auf steigende CO<sub>2</sub>-Preise. Dieser Anstieg ist ein Modellierungseffekt und im Szenario nicht notwendig für die Erreichung des Sektorziels.

Werte in TWh	Kohlen	Erdgas	Andere fossile	Strom	Wasserstoff	Umgebungs-wärme	Bio-masse	Fern-wärme
2025	79	207	56	230	11	10	36	55
2026	71	200	51	232	17	13	35	55
2027	64	194	48	234	22	16	33	55
2028	57	188	45	235	27	18	32	55
2029	51	182	42	236	31	20	31	55
2030	46	177	39	236	35	22	30	55
2031	41	172	37	238	40	23	28	55
2032	37	168	35	239	44	25	27	55
2033	34	163	34	240	48	26	26	54
2034	31	158	32	241	53	28	25	54
2035	28	153	31	242	57	29	24	54
2036	26	148	30	243	61	30	23	54
2037	24	143	29	245	65	31	22	53
2038	23	139	28	246	69	32	21	53
2039	22	135	27	247	73	33	20	53
2040	20	130	26	249	78	33	19	53

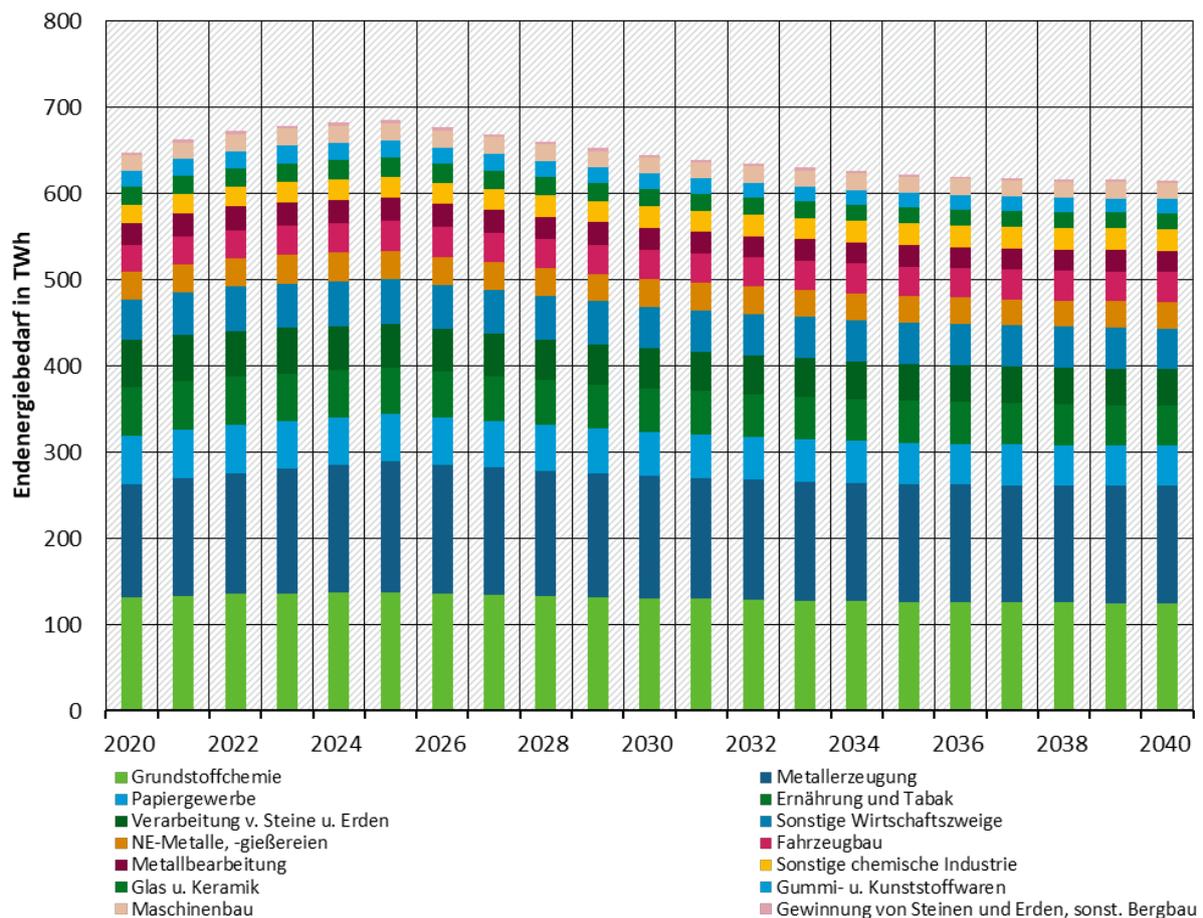
Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

Die in Abbildung 31 und Tabelle 54 dargestellte energetische Nutzung von Energieträgern wird durch stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie in Höhe von 176 TWh (2020) ergänzt (Abbildung 32). Diese steigt ebenfalls bis 2025 an (auf 213 TWh) und sinkt bis 2030 leicht (210 TWh). Die Bedeutung fossiler Energieträger (2020 100 %) sinkt bis 2030 nur geringfügig (95 %), maßgeblich wird (grüner) direkt Wasserstoff als Ersatz für (indirekt aus Erdgas gewonnenen) Wasserstoff eingesetzt und die Verfahren der Ammoniak- und Methanolproduktion entsprechend umgestellt (siehe auch Abbildung 40 und Abbildung 43).

**Abbildung 32: Endenergiebedarf (stofflich) der Industrie nach Energieträgern, 2020-2040**

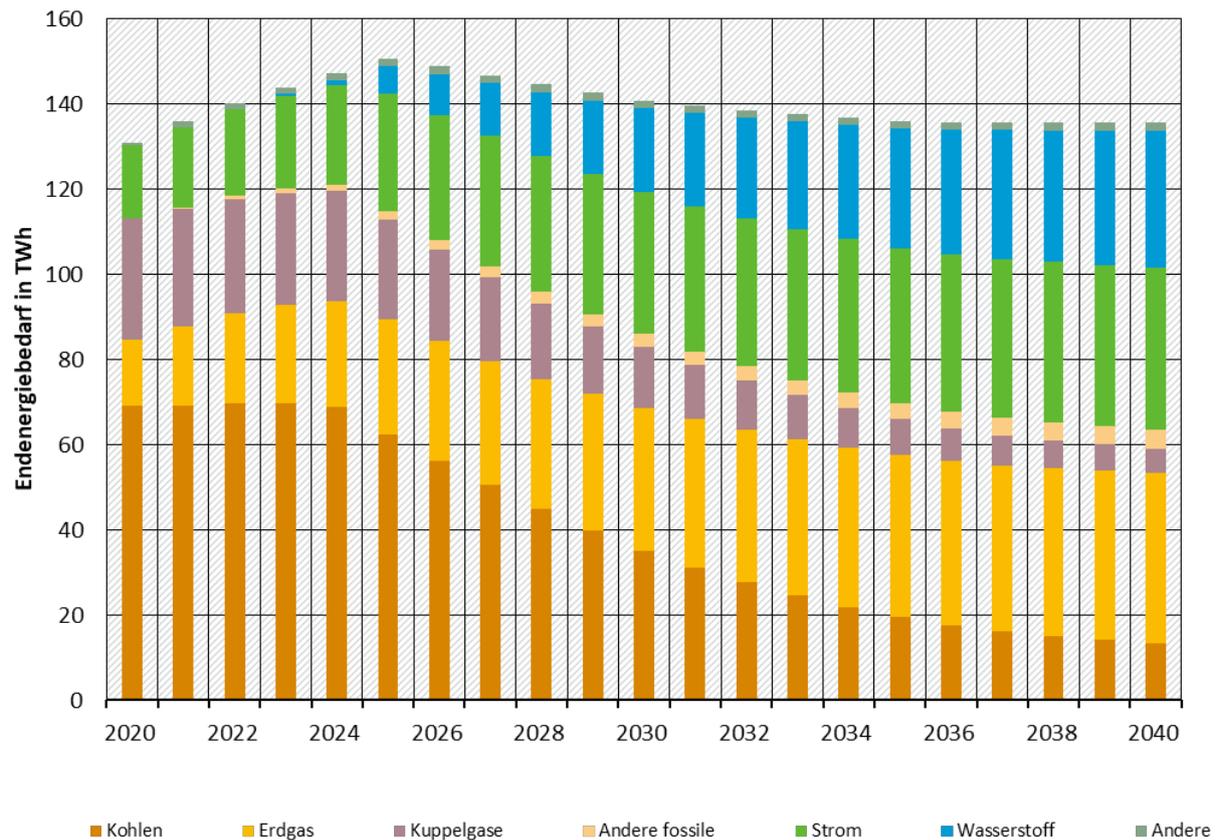
Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

In der Aufteilung des Endenergiebedarfes nach Subsektoren (Abbildung 33) sind bis 2030 keine deutlichen Verschiebungen zu erkennen. Geringfügige Änderungen bestehen in der Metallherzeugung (2020: 20,2 % am Gesamtenergiebedarf, 2030: 21,9 %), im Papiergewerbe (2020: 8,8 %, 2030: 7,9 %) und in der Verarbeitung von Steinen und Erden (2020: 8,5 %, 2030: 7,1 %). Die Industrie behält also ihre grundsätzliche Struktur der Gesamtenergienachfrage bei. Einzelne Prozesse hingegen sind von tiefgreifendem Wandel betroffen (siehe auch Abbildung 38, Abbildung 39 sowie Abbildung 40).

**Abbildung 33: Endenergiebedarf (energetisch) der Industrie nach Subsektoren, 2020-2040**

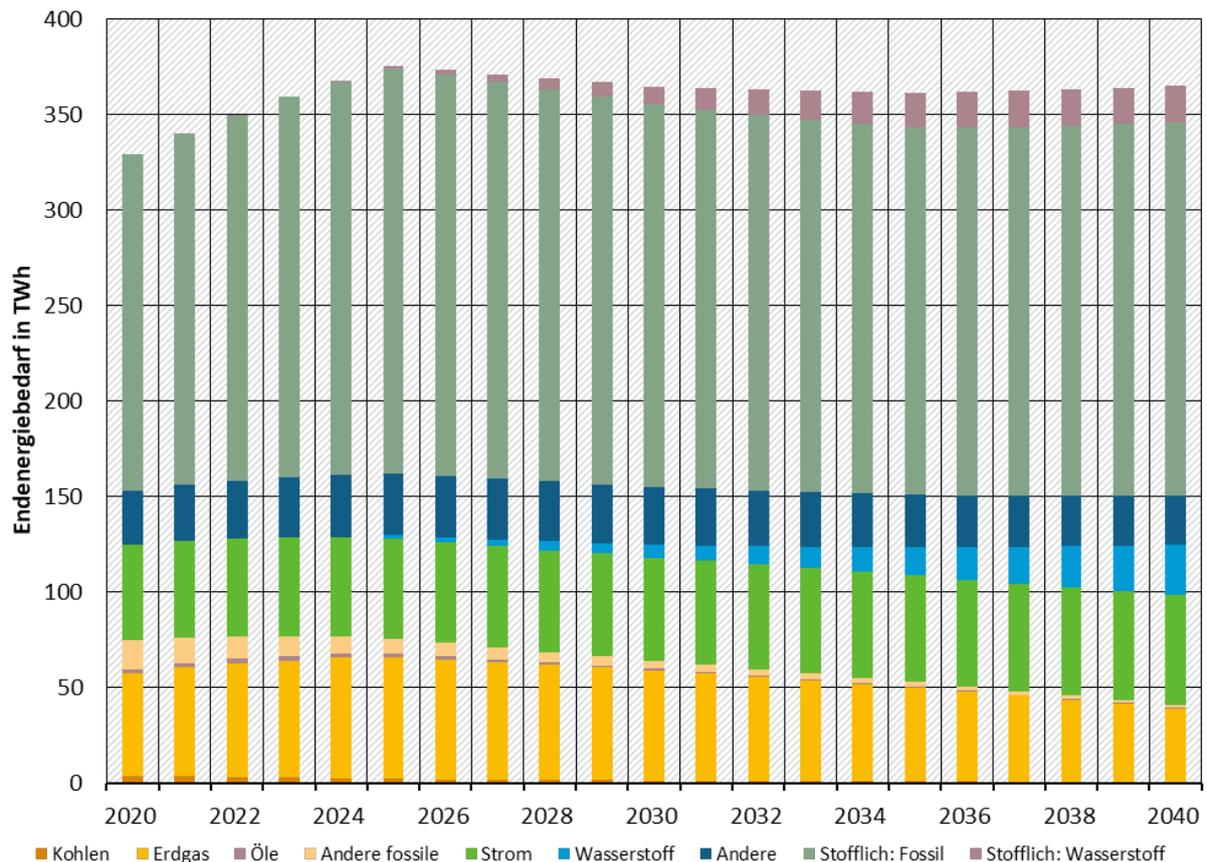
Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

Im Subsektor Metallerzeugung (Abbildung 34), der die besonders energieintensive Rohstahlerzeugung beinhaltet, ist im KIS-2030 – wie in der Gesamtentwicklung – ein aktivitätsbedingter Anstieg des Energiebedarfes (2020: 131 TWh) bis 2025 (151 TWh) und ein sich daran anschließender leichter Rückgang (141 TWh) bis 2030 modelliert. Hier spielt neben Energie- und Materialeffizienz insbesondere der Wechsel zu CO<sub>2</sub>-armen oder CO<sub>2</sub>-freien Produktionsverfahren eine Rolle. Dadurch steigt sowohl der Anteil der elektrifizierten Prozesswärmeerzeugung (z. B. für die Sekundärroute der Stahlerzeugung, Anstieg von 17 TWh auf 33 TWh) als auch die Nutzung von Wasserstoff (in der Direktreduktion zur Erzeugung von Roheisen, 2030: 20 TWh). Kohlen (darunter Koks) und Kuppelgase werden substituiert. Bis 2030 sinkt dadurch der Anteil fossiler Energieträger von 86 % (2020, 113 TWh) auf 61 % (86 TWh). Die Nutzung von Erdgas jedoch steigt durch den Einsatz von erdgasbasierter Direktreduktion (DRI) von 15 TWh (2020) auf 34 TWh (2030) an. Die verringerte Verfügbarkeit von Kuppelgasen hat Auswirkungen auf die für Industriekraftwerke zur Verfügung stehenden Brennstoffe (siehe Abschnitt 7.3).

**Abbildung 34: Endenergiebedarf (energetisch) im Subsektor Metallherzeugung nach Energieträger, 2020-2040**

Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

Die kombinierte Darstellung des stofflichen (2020: 176 TWh) und energetischen (2020: 153 TWh) Energiebedarfs der Chemieindustrie (Abbildung 35), verdeutlicht die besonderen Herausforderungen des Sektors. Eine direkte Elektrifizierung ist nur für einen Teil des Energiebedarfes – den energetisch genutzten – technisch möglich. Mit der stofflichen Nutzung benötigt die Mehrheit des Energiebedarfes eine auf Molekülen basierende Dekarbonisierungsoption, und zu den benötigten Molekülen gehört oft auch Kohlenstoff. Nicht aus der Abbildung abzulesen ist der Umstand, dass wichtige Transformationstechnologien (z. B. wasserstoffbasierte Kunststoffherstellung) der Grundstoffchemie zwar aus der Gesamtsystemperspektive notwendig sind, aber für die Erreichung des Sektorziels der Industrie keinen oder nur einen geringen unmittelbaren Beitrag leisten. Denn ein Gutteil der bei der Verwertung von Kunststoffabfällen entstehenden Treibhausgasemissionen werden im Umwandlungssektor verbucht. Zudem weisen die infrage kommenden Verfahren aufgrund ihres hohen Wasserstoffbedarfes hohe Differenzkosten auf (vergleiche Ausführungen zu Abbildung 43 und Abbildung 44).

**Abbildung 35: Endenergiebedarf (energetisch und stofflich) im Subsektor Chemie nach Energieträger, 2020-2040**

Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

Im KIS-2030 werden diese Verfahren nur in sehr geringem Umfang bis 2030 modelliert. Der fossile Anteil am gesamten Energiebedarf sinkt bis 2030 nur von 76 % auf 72 %. Es werden 7 TWh Wasserstoff eingesetzt<sup>39</sup>. Ziel dieser Modellierung ist es maßgeblich, die verwendeten Technologien über Demonstrations- und erste industriell skalierte Anlagen zur Marktfähigkeit zu verhelfen und damit eine massiv beschleunigte Diffusion ab 2030 zu ermöglichen<sup>40</sup>. Im Rahmen des KIS-2030 ist die hier beschriebene Entwicklung – im Wechselspiel mit den anderen Subsektoren – zur Erreichung der mittelfristigen Sektorziele geeignet. Eine langfristige Strategie sollte aber über den hier beschriebenen Pfad hinausgehen und spätestens ab 2030 den Einsatz CO<sub>2</sub>-armer und CO<sub>2</sub>-freier Verfahren in der Chemieindustrie deutlich beschleunigen. Damit eng verknüpft ist die Verfügbarkeit und wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit großer Mengen grünen Wasserstoffs. Szenarien möglicher Umsetzungen dieser Schlüsseltechnologien sind z. B. in Prognos et al. (2021), Fraunhofer ISI et al. (2021), Ariadne-Projekt (2021), BCG (2021) und dena (2021) gegeben.

Der Subsektor „Verarbeitung von Steinen und Erden“, der maßgeblich von der Zement- und Kalkherstellung bestimmt wird, stellt bezüglich der Entwicklung zwischen 2020 und 2025 eine Ausnahme dar (Abbildung 36). Während andere Subsektoren 2020 einen pandemiebedingten Rückgang ihrer Aktivität verzeichneten, war die Bauindustrie, und dadurch die Baumaterialherstellung, nicht in gleichem Maße beeinträchtigt. Tatsächlich stieg die Zementproduktion 2020

<sup>39</sup> Zusätzlich zu dem aus Erdgas gewonnenen – und als solches bilanzierten – grauen Wasserstoff.

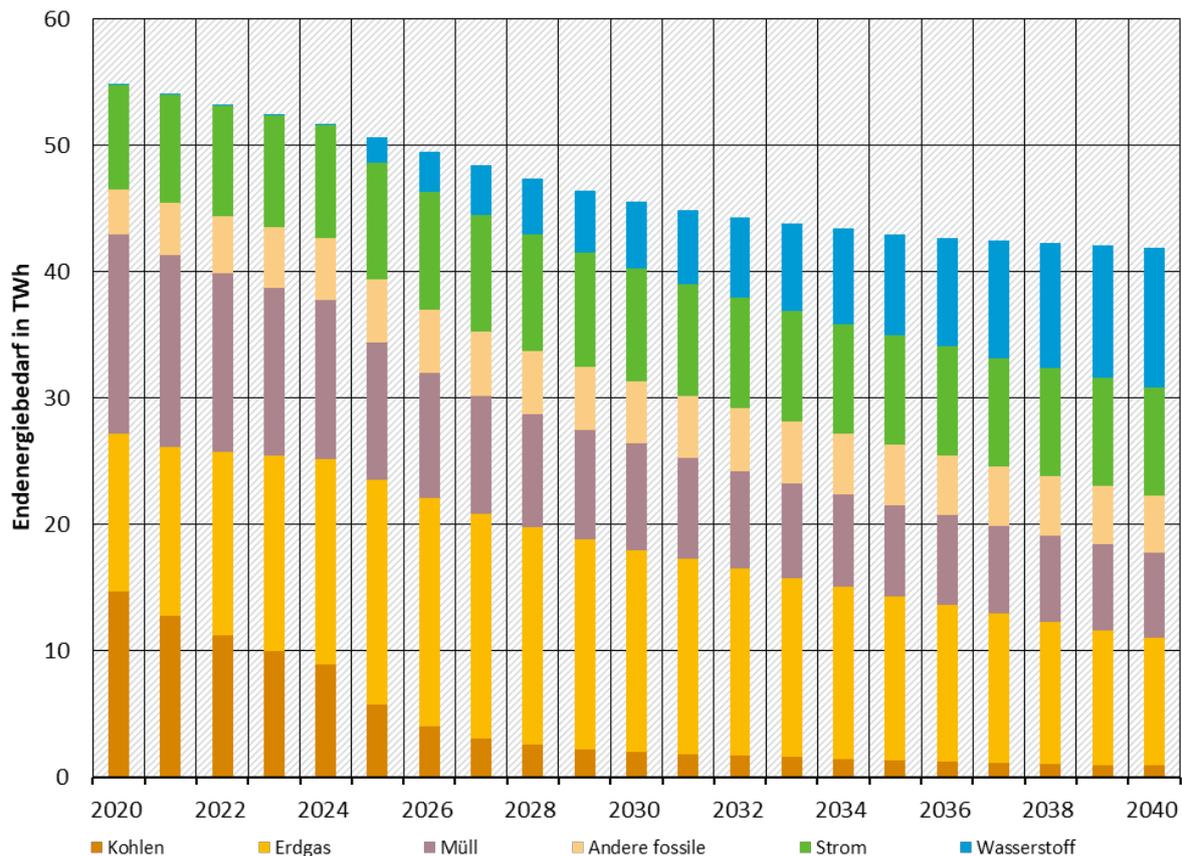
<sup>40</sup> Eine solche ist in Abbildung 35 nicht angenommen/dargestellt, da eine gegenüber anderen Annahmen deutlich höhere Unsicherheit besteht.

verglichen mit 2018 um etwa 5 % an (VDZ 2022). Entsprechend werden steigende Effizienz und Einführung neuer Verfahren in diesem Subsektor nicht von einer Aktivitätserholung überlagert und der Energiebedarf sinkt kontinuierlich (2020: 55 TWh, 2030: 46 TWh). Nicht in Abbildung 36 zu erkennen ist, dass die Energienutzung nur etwa 1/3 der Dekarbonisierungsherausforderungen des Subsektors bestimmen. Etwa 2/3 der Treibhausgasemissionen entstehen prozessbedingt. Für diesen Anteil wird in KIS-2030 die Verwendung von CCU und CCS modelliert. Diese Technologien stehen vor allem vor gesellschaftlichen Herausforderungen.

Für die Entwicklung des Energiebedarfes sind jedoch vorrangig ökonomische Abwägungen bedeutend. So werden in 2020 85 % des Energiebedarfs des Subsektors durch fossile Energieträger gedeckt (47 TWh), 2030 noch 69 % (31 TWh). Von großer Bedeutung sind darin die billigen Energieträger Braunkohle und Müll. In KIS-2030 werden diese durch besonders teure Energieträger teilweise ersetzt, insbesondere Wasserstoff und Strom (im Übergang auch Erdgas). Dieser Brennstoffwechsel wird nur durch deutliche Preissignale, z. B. einem hohen (und absehbar – im Sinne von planbar – weiter steigenden) CO<sub>2</sub>-Preis wirtschaftlich tragfähig. Die Stromnutzung nimmt absolut gesehen nicht bedeutsam zu (um 0,7 TWh)<sup>41</sup>, erhöht den Anteil am Energiebedarf aber von 15 % auf 20 %. Bis 2030 werden 5 TWh Wasserstoff genutzt. Der überwiegende Teil der Nutzung fossiler Energieträger ist aber auf die Verringerung des gesamten Energiebedarfs, maßgeblich durch Energieeffizienz bedingt, zurückzuführen. Erdgas wird in diesem Subsektor vor allem für die Produktion von Glas und Keramik eingesetzt. Die Glasproduktion wird in relevantem Umfang elektrifiziert (etwa 20 % in 2030), was zur Energieeffizienz beiträgt.

---

<sup>41</sup> Die auf industriellen Skalen verfügbare Verwendung von teil- oder vollelektrifizierten Öfen in der Kalk- und Zementherstellung wurde im KIS-2030 nicht angenommen. Sollten diese Verfahren relevant werden, können sie einen Beitrag liefern, die Verwendung von Wasserstoff in diesem Subsektor zu senken und für andere Anwendungen, in denen er aus technischen Gründen dringender benötigt wird, freizusetzen.

**Abbildung 36: Endenergiebedarf (energetisch) im Subsektor Verarbeitung von Steinen und Erden nach Energieträger, 2020-2040**

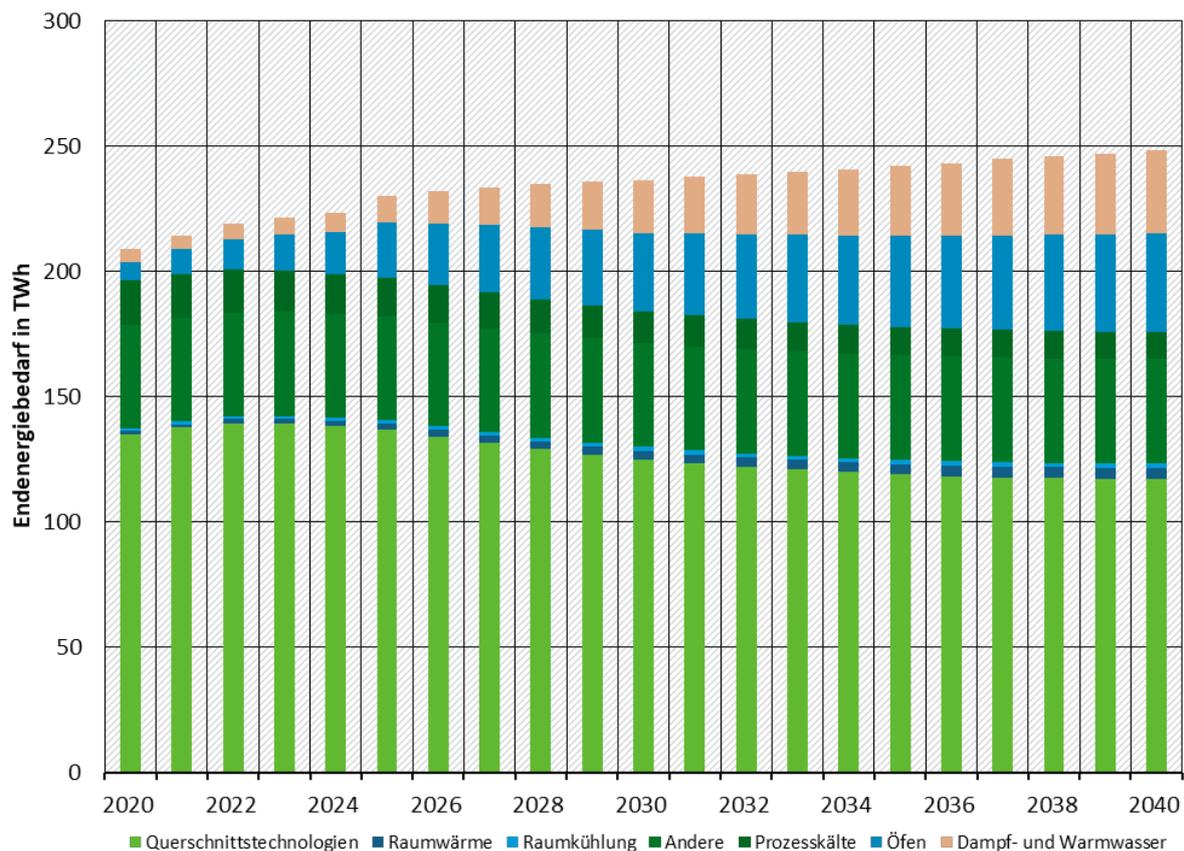
Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

Der Strombedarf aller industriellen Subsektoren steigt im KIS-2030 stetig (Abbildung 37)<sup>42</sup>. Entsprechend der Aktivitätsänderung (wie in vorhergehenden Abbildungen auch erkennbar) bis 2025 in allen Anwendungen (auf 230 TWh, 2020: 209 TWh), bis 2030 dann nur noch durch die zunehmende Verwendung von Strom in neuen Anwendungen (auf 236 TWh). Dazu zählen vor allem elektrifizierte Industrieöfen und Dampferzeugung<sup>43</sup>, deren Strombedarf von 12 TWh (2020) auf 52 TWh (2030) steigt. Die konventionellen Bedarfe (zur Bereitstellung mechanischer Energie und Beleuchtung, zusammengefasst unter „Querschnittstechnologien“) verringern effizienzbedingt ihren Strombedarf von 2020 bis 2030 von 135 TWh auf 125 TWh. Ähnliches trifft auf die Erzeugung von Prozesskälte (2020: 18 TWh, 2030: 13 TWh) zu. Raumwärme und -kälte steigern ihren Strombedarf auf geringem Niveau (zusammen 2020 2 TWh, 2030 5 TWh). Ein Block von anderen Anwendungen, darunter maßgeblich Elektrolyseanwendungen (nicht für Wasserstoffproduktion) bleibt konstant<sup>44</sup>.

<sup>42</sup> Nur direkte Stromnutzung. Der Elektrizitätsbedarf für die Herstellung von grünem Wasserstoff ist im Umwandlungssektor bilanziert.

<sup>43</sup> Nicht im technischen Sinne neu, sondern bezüglich der Breite der Anwendung. Bisher ist elektrifizierte Prozesswärmeerzeugung auf besondere Anwendungen beschränkt, in denen massive prozesstechnische Vorteile den im Vergleich zu Erdgas hohen Preis ausgleichen können. Im Verlauf des KIS-2030 wird elektrifizierte Prozesswärmeerzeugung für breitere Anwendungen attraktiv.

<sup>44</sup> Für diesen Block fehlen detaillierte Informationen in der Modellierung. Daher ist die Konstanz eine Annahme, kein Ergebnis. Allerdings bleiben für diese Anwendungsgruppe wichtige Prozesse (Elektrolyse von Aluminium und Chlor) auf einem ähnlichen Produktionsniveau, was die Annahme plausibilisiert.

**Abbildung 37: Strombedarf nach Anwendung, 2020-2040**

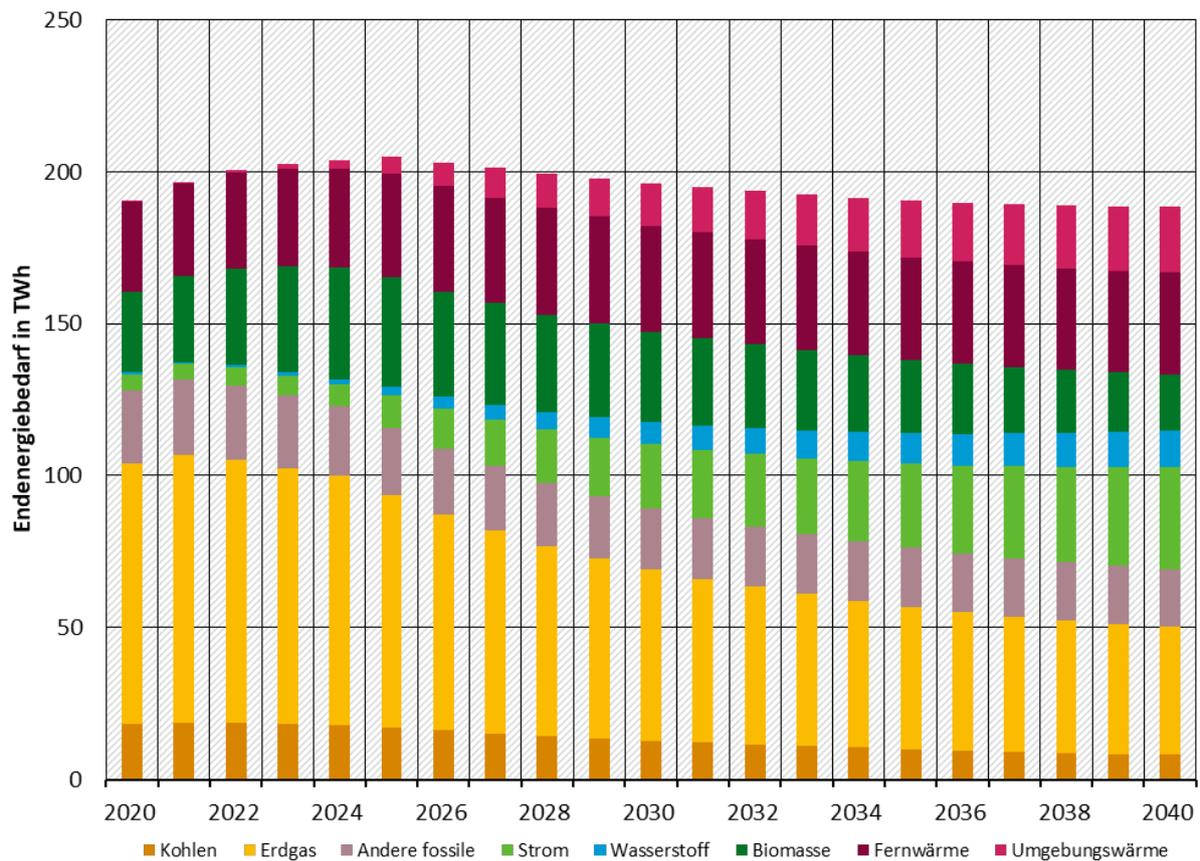
Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

Die erwähnte Anwendung der Dampf- und Warmwassererzeugung (Abbildung 38) weist Besonderheiten auf, die sie für die direkte Elektrifizierung attraktiv machen. Zum einen entstehen relevante Mengen des Energiebedarfs auf einem durch Hochtemperaturwärmepumpen (high temperature heat pumps, HTHP) erreichbaren Temperaturniveau. Dies ermöglicht eine hohe Effizienz der Prozesswärmeerzeugung – sofern vor Ort entsprechende Voraussetzungen erfüllt sind (z. B. Abwärme auf entsprechendem Temperaturniveau). Für die gesamte Anwendung gilt außerdem, dass die Prozesswärmeerzeugung durch das Medium Dampf von der Verwendung entkoppelt ist. Dadurch hat die Methode der Wärmeerzeugung nur geringen Einfluss auf ihre Verwendung, was eine hohe Flexibilität der Erzeugung ermöglicht. Daher ist diese Anwendung leichter als andere zu elektrifizieren, z. B. durch Elektrodenkessel. Im KIS-2030 steigt der gesamte Bedarf an Prozesswärme aktivitätsbedingt (vergleiche Ausführungen zu Abbildung 31 und weitere) bis 2025 von 190 TWh auf 205 TWh an, um dann bis 2030 auf 196 TWh zu sinken<sup>45</sup>. Der fossile Anteil sinkt von 67 % (2020) auf 46 % (2030). Maßgeblich die Nutzung von Erdgas geht stark zurück (von 86 TWh auf 56 TWh), verbleibt aber damit auch 2030 noch als meistgenutzter Energieträger in dieser Anwendung. Die direkte Nutzung von Strom (in Elektrodenkesseln und Wärmepumpen) steigt von 5 TWh auf 21 TWh an. Im Rahmen des KIS-2030 sind frühe Elektrifizierung der Dampf- und Warmwassererzeugung als hybride Systeme ausgelegt, deren elektrische Anteile mit geringen Volllaststunden arbeiten (etwa 1.000 h/a). Dies erleichtert den Markteintritt und stellt potenziell nachfrageseitig Flexibilität bereit. Für eine schnellere Substitution fossiler Dampferzeugung – insbesondere Erdgas – sind umfassendere Maßnahmen

<sup>45</sup> Darin sind 14 TWh Umgebungswärme enthalten.

zur Steigerung der ökonomischen Attraktivität der Elektrifizierung notwendig<sup>46</sup>. Darüber hinaus müsste der Austausch von Erzeugungsanlagen (z. B. Kesseln) deutlich beschleunigt werden.

**Abbildung 38: Endenergiebedarf (energetisch) für Dampf- und Warmwassererzeugung**



Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

Die Erzeugung von Prozesswärme in Industrieöfen (Abbildung 39) setzt sich in technischer Hinsicht auf mindestens zweierlei Arten von der über Dampf (Abbildung 38) ab. Industrieöfen stellen Wärme auf deutlich höherem Temperaturniveau bereit<sup>47</sup> und der direkte Kontakt der Wärmeerzeugung mit dem Produkt führt zu sehr heterogenen Umsetzungen und Bauformen von Öfen. Brennstoffwechsel im Allgemeinen und Elektrifizierung im Besonderen sind daher weniger allgemein zu beschreiben als in der Dampferzeugung. Es entstehen Herausforderungen, die oft nur am Standort selbst adäquat bewältigt werden können. Im KIS-2030 abstrahiert die Modellierung von diesen Herausforderungen und schätzt – basierend auf technischer Verfügbarkeit und wirtschaftlicher Attraktivität – auf Prozessebene Potenziale ab<sup>48</sup>. Zwischen 2020 und 2025 steigt der Prozesswärmebedarf in Industrieöfen aktivitätsbedingt (vergleiche Ausführungen zu Abbildung 31 und weitere) von 213 TWh auf 238 TWh und sinkt bis 2030 auf 225 TWh. In dieser Summe ist der in Abbildung 34 dargestellte Energiebedarf des Sektors Metallherzeugung (mit

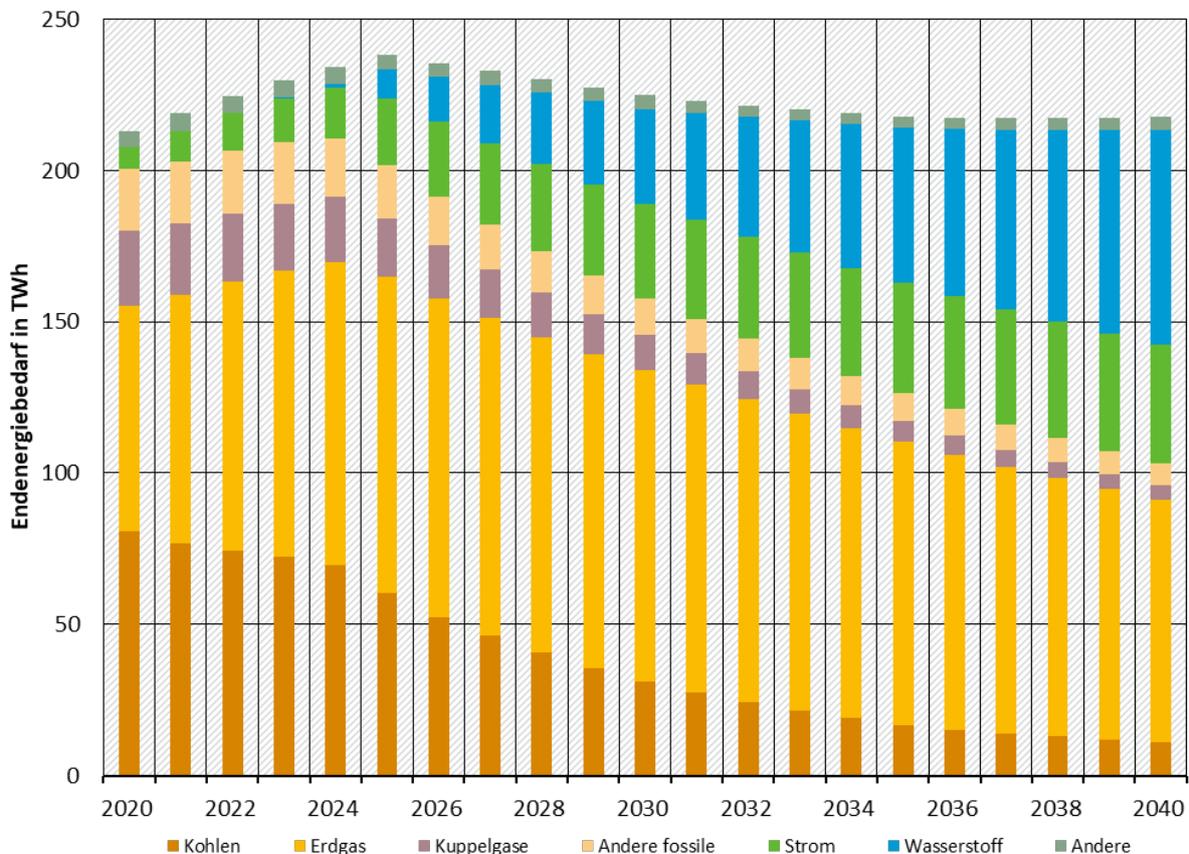
<sup>46</sup> Dies betrifft vor allem die Betriebskosten (also den Strompreis), relativ betrachtet zum kombinierten Erdgas- und CO<sub>2</sub>-Preis. Investitionen in Kessel sind gering (Größenordnung 10 % der gesamten Kosten über die Lebensdauer der Anlage).

<sup>47</sup> Das verwendete Modell unterteilt Dampf- und Industrieöfen an der Grenze von 500°C. Allerdings ist ein großer Anteil an Dampfbedarf im unteren Bereich des Intervalls 100°C-500°C anzusiedeln. Industrieöfen nutzen Temperaturen deutlich über 500°C, zum Teil 1400°C und mehr (Zementklinker, Hochofen).

<sup>48</sup> Die Modellierung kann daher standortabhängige Gegebenheiten wie die verfügbaren be- bzw. umbaubaren Flächen nicht berücksichtigen.

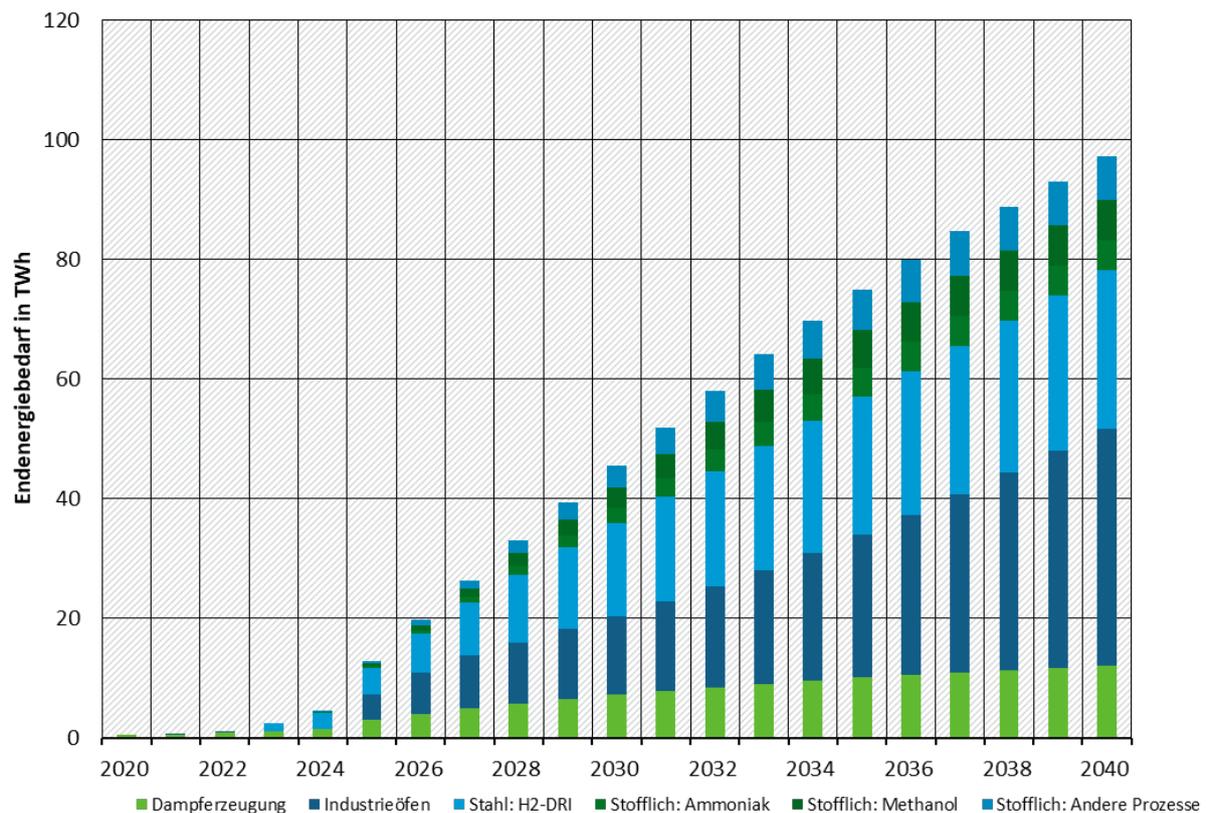
der energieintensiven Stahlerzeugung) enthalten. Dieser bewirkt auch einen Großteil der veränderten Energienutzung durch den Ersatz von Hochöfen durch Direktreduktionsanlagen (siehe Abbildung 34). Der fossile Anteil sinkt zwischen 2020 und 2030 von 94 % (201 TWh) auf 70 % (158 TWh), maßgeblich durch den Rückgang der Nutzung von Kohlen (-50 TWh, darunter Koks), Kuppelgase (-13 TWh) und andere fossile (-8 TWh). Stromnutzung für Prozesswärme steigt von 7 TWh (2020) auf 31 TWh (2030), ähnlich für Wasserstoff (2030: 31 TWh, davon 13 TWh für wasserstoffbasierte Direktreduktion). Wasserstoff wird dabei vor allem dort eingesetzt, wo direkte Elektrifizierung schwer umzusetzen ist.

**Abbildung 39: Endenergiebedarf (energetisch) für Industrieöfen**



Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

Der gesamte industrielle Wasserstoffbedarf (stofflich und energetisch) wird im KIS-2030 vor allem durch die Nutzung in Industrieöfen bestimmt (Abbildung 40). Er steigt relevant ab 2025, wenn Förderinstrumente die Errichtung und den Betrieb der ersten entsprechenden Anlagen ermöglichen, vor allem der wasserstoffbasierten Direktreduktion von Eisenerz – bei einer angenommenen Umsetzungszeit von 3 Jahren ab Fördermittelverbuchung. Bis 2030 steigt der Wasserstoffbedarf so auf 45 TWh (davon 35 TWh energetische Nutzung, vgl. Abbildung 120). Darin sind Industrieöfen (vergleiche Abbildung 39) mit 28 TWh (davon 16 TWh wasserstoffbasierte Direktreduktion) der größte Posten, gefolgt von Dampferzeugung (7 TWh, vergleiche Abbildung 38) und stofflicher Nutzung für Ammoniak (3 TWh), Methanol (3 TWh) und weitere stoffliche Nutzung (4 TWh, Abbildung 43 und Abbildung 44). Insbesondere bei der stofflichen Nutzung in der Chemie besteht weiterer potenzieller Bedarf an Wasserstoff, der im KIS-2030 nur leicht steigt (siehe Ausführungen zu Abbildung 35).

**Abbildung 40: Wasserstoffbedarf (energetisch und stofflich) nach Anwendung**

Quelle: Fraunhofer ISI / FORECAST Modell

Anmerkung: Die Darstellung enthält nur zusätzlichen grünen Wasserstoff in neuen Anwendungen. Die herkömmliche Herstellung von Wasserstoff als Zwischenprodukt aus Raffinerieprozessen oder der Dampfreformierung für die Ammoniakherstellung ist nicht enthalten (bilanziert über die Erdgasnutzung).

Erdgas ist 2020 der wichtigste Brennstoff der Industrie. Er macht industrieweit<sup>49</sup> 65 % der Primärenergieträger, in vielen Subsektoren (Ernährung und Tabak, Gummi- und Kunststoffwaren, Glas und Keramik, NE-Metalle und Gießereien, Metallbearbeitung, Maschinenbau) über 90 % (AGEB 2022) aus. Weitere Subsektoren sind aus technischen Gründen besonders auf Erdgas angewiesen (z. B. die Grundstoffchemie). Im KIS-2030 steigt der Erdgasbedarf aktivitätsbedingt bis 2025 von 225 TWh auf 243 TWh und sinkt bis 2030 auf 207 TWh (Abbildung 41). Dabei steigen die sektoralen Anteil am Gesamtbedarf in der Chemieindustrie (2020: 34 %, 2030: 39 %) und der Metallerzeugung (2020: 7 %, 2030: 16 %), Letzterer aufgrund der angenommenen Nutzung von erdgasbasierter Direktreduktion (Erdgas-DRI) als Brücke zur technisch sehr ähnlichen wasserstoffbasierten Direktreduktion (H<sub>2</sub>-DRI, vergleiche Ausführungen zu Abbildung 42).

Das KIS-2030 wurde vor dem Angriff Russlands auf die Ukraine am 24. Februar 2022 entworfen und gerechnet, sodass damit zusammenhängende Entwicklungen nicht berücksichtigt sind. Es ist<sup>50</sup> davon auszugehen, dass die im KIS-2030 beschriebenen Entwicklungen deutlich beschleunigt werden müssen und die Bedeutung von Erdgas schneller als hier dargestellt abnehmen wird. Insbesondere im Kontext der Erdgasabhängigkeit zeigt das KIS-2030 allerdings bereits

<sup>49</sup> Abgrenzung nach AGEB: Verarbeitendes Gewerbe.

<sup>50</sup> Stand Mai 2022

eine Entwicklung auf (Tabelle 55). Darin sinkt der Anteil von Erdgas am gesamten Energiebedarf<sup>51</sup> mit Ausnahme der Metallerzeugung (Erdgas-DRI) in allen Subsektoren und insgesamt im Bereich des verarbeitenden Gewerbes. Besonders deutlich ist der Rückgang in der Glas- und Keramikindustrie (2020: 71 %, 2030: 52 %), dem Papiergewerbe (2020: 32 %, 2030: 22 %) und der Ernährungsindustrie (2020: 54 %, 2030: 29 %). Die letzten beiden Subsektoren nutzen vor allem Dampf zur Bereitstellung von Prozesswärme und sind daher als besonders flexibel einzuschätzen (siehe dazu Ausführungen zu Abbildung 38). Es ist anzumerken, dass bereits diese Entwicklung einen schnelleren Austausch von Bestandsanlagen annimmt, als sie in der Vergangenheit zu beobachten war. Eine weitere Beschleunigung ist als Reaktion auf starke – und andauernde – Preissignale zu erwarten. Ob dies ausreicht oder ergänzende Instrumente nötig sind, kann durch die Analyse des KIS-2030 nicht beantwortet werden. Es scheint aber eine robuste Erkenntnis zu sein, dass große Teile des Anlagenbestandes deutlich vor dem Ende ihrer technischen Lebensdauer ausgetauscht werden müssen, um die in Tabelle 55 dargestellte Entwicklung relevant zu beschleunigen.

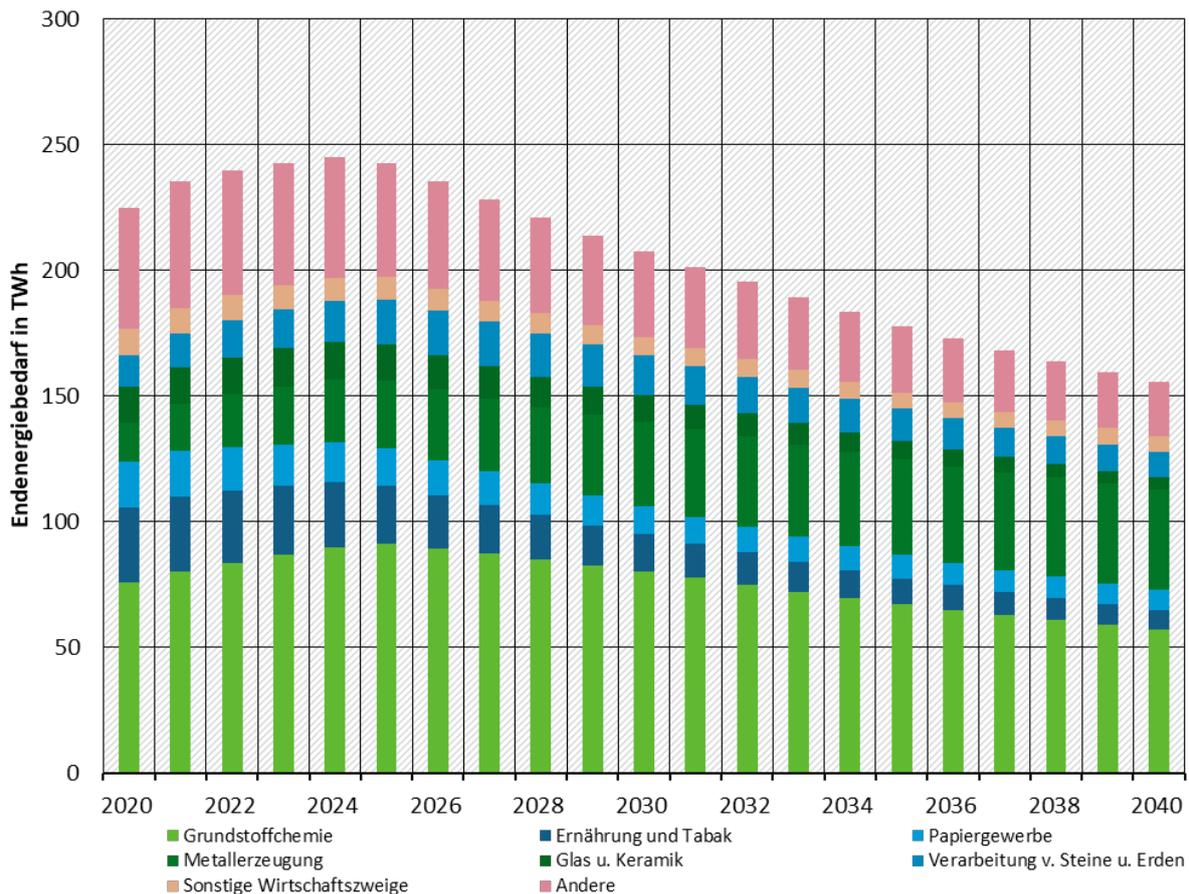
**Tabelle 55: Anteil von Erdgas am Endenergieverbrauch nach Subsektor im KIS-2030, 2020-2040**

Erdgasanteil am subsektoralen Energiebedarf	Grundstoffchemie	Metallerzeugung	Ernährung und Tabak	Glas u. Keramik	NE-Metalle, -gießereien	Papiergewerbe	Andere	Verarbeitendes Gewerbe <sup>1</sup>
2020	25 %	12 %	54 %	71 %	31 %	32 %	28 %	27 %
2025	26 %	18 %	43 %	65 %	29 %	28 %	27 %	27 %
2030	24 %	24 %	29 %	52 %	24 %	22 %	23 %	24 %
2035	20 %	28 %	22 %	38 %	20 %	19 %	19 %	21 %
2040	17 %	29 %	17 %	24 %	17 %	17 %	16 %	19 %

1: Mengengewichteter Mittelwert aller Subsektoren

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

<sup>51</sup> Nicht nur, wie oben, an Primärenergieträgern, da im KIS-2030 insbesondere die Elektrifizierung ein wichtiger Hebel ist. Insbesondere für die Grundstoffchemie ist in diesem Zusammenhang relevant, dass der in Tabelle 55 dargestellte Wert durch nicht-energetische Energieträgernutzung stark reduziert wird, da dort ölbasiertes Naphtha dominiert. Bezüglich der energetischen Primärenergienutzung (ohne Strom und Fern- und Nahwärme) ist die Grundstoffindustrie zu 80 % von Erdgas abhängig.

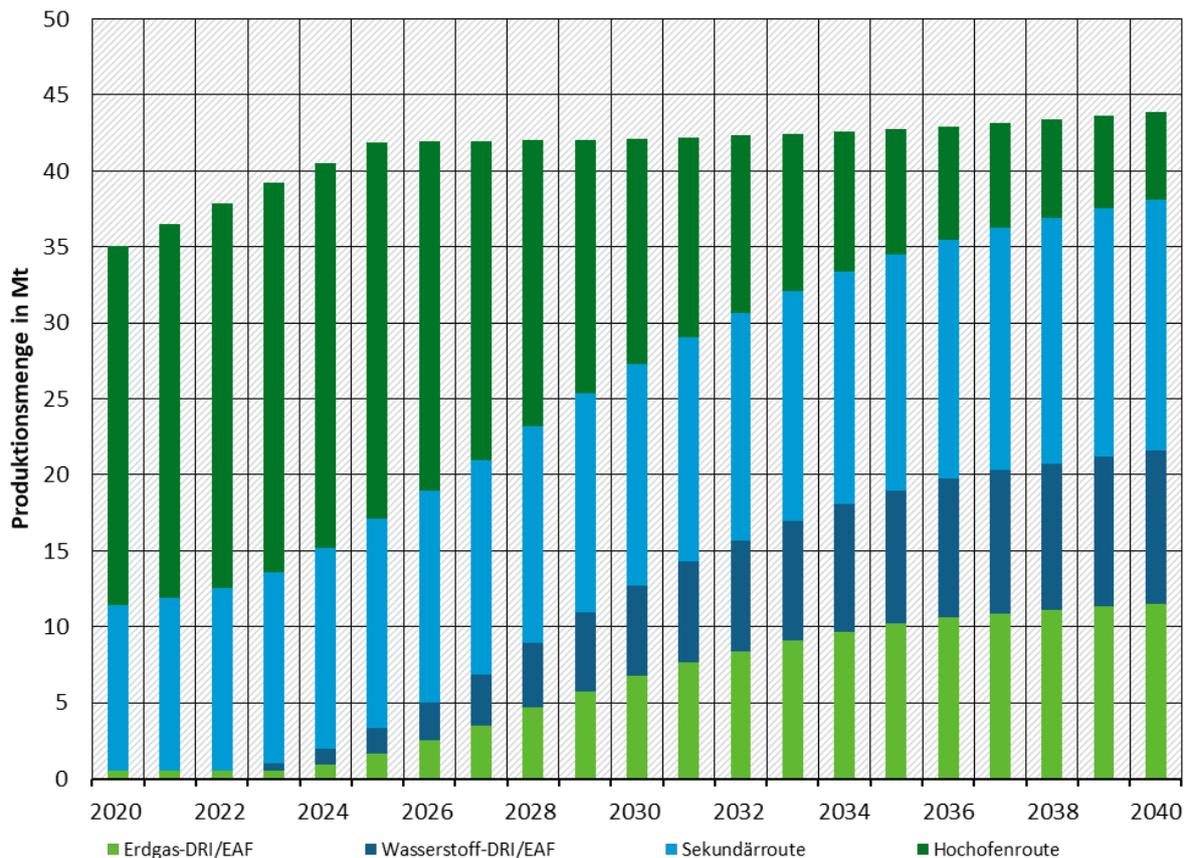
**Abbildung 41: Erdgasnutzung (energetisch und stofflich) nach Subsektor**

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

### 7.2.3.1.2 Prozesswechsel und Technologiediffusion

Die für die Modellierung in FORECAST (siehe Methodik) angenommenen Produktionsmengen sind bezüglich Gesamtmenge (z. B. von Roh- und Walzstahl, Olefinen, Zement usw.) Rahmendaten<sup>52</sup>. Die für die Erzeugung dieser Produkte verwendeten Verfahren sind allerdings Ergebnisse des KIS-2030, da darin der Prozesswechsel auf CO<sub>2</sub>-arme oder CO<sub>2</sub>-freie Produktionsverfahren eine zentrale Instrumentenwirkung darstellt. Die mögliche Diffusion wird über eine ökonomische Modellierung der Differenzkosten und der zum Schließen dieser Differenz verfügbaren Fördermittel durchgeführt (siehe Abschnitt 7.1.2.1.3). Das Resultat sind Produktionsmengenanteile der verschiedenen Verfahren und (davon abgeleitet) ihr Energiebedarf.

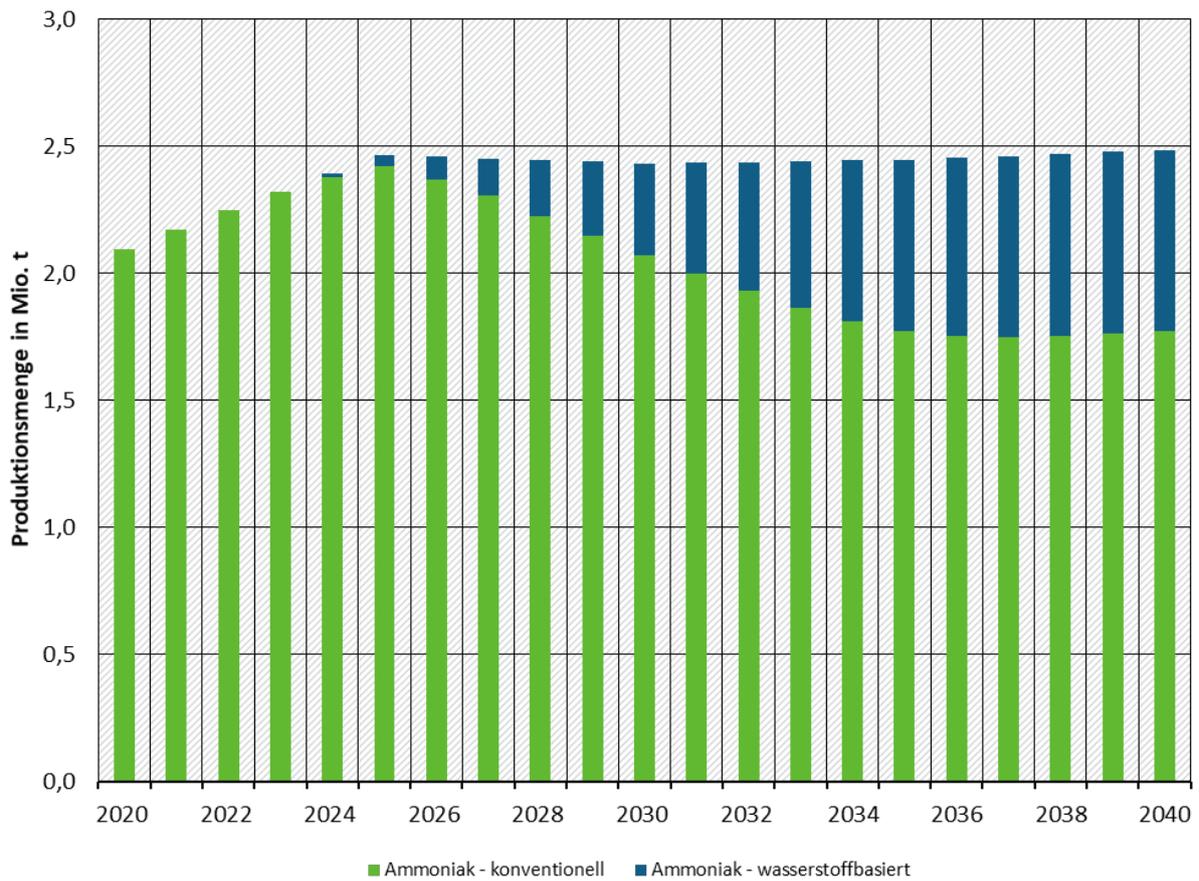
<sup>52</sup> Durch die Materialeffizienz steigernde Maßnahmen werden diese zusätzlich etwas reduziert.

**Abbildung 42: Produktionsmengen Rohstahl nach Verfahren, 2020-2040**

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Zur Produktion von Rohstahl werden im KIS-2030 vier Verfahren betrachtet: die konventionelle Hochofenroute, die Sekundärroute über Stahlschrott und zwei Direktreduktionsverfahren; über Erdgas, ein CO<sub>2</sub>-armes Produktionsverfahren, und über Wasserstoff ein –beinahe – CO<sub>2</sub>-freies Produktionsverfahren (Abbildung 42). Die Gesamtproduktionsmenge steigt zwischen 2020 (35 Mio. t) und 2025 (42 Mio. t) stark an, in einer angenommenen Erholung aus der Corona-Krise<sup>53</sup> und bleibt dann bis 2030 weitgehend konstant. Dies gilt qualitativ ebenso für die Walzstahlproduktion (2020: 30 Mio. t, 2030: 36 Mio. t). Die Produktion in der konventionellen, fossilen Hochofenroute geht bis 2030 auf 35 % (15 Mio. t) der Gesamtmenge zurück (2020: 67 %, 24 Mio. t). Gleichzeitig steigt der Anteil der Sekundärroute von 31 % (11 Mio. t) auf 35 % (15 Mio. t) und der der erdgasbasierten Direktreduktion von 2 % (0,6 Mio. t) auf 16 % (7 Mio. t). Die wasserstoffbasierte Direktreduktion kommt ab 2025 nennenswert hinzu und erreicht bis 2030 einen Anteil von 14 % (6 Mio. t). Die Reduktion der Hochofenaktivität ist eine maßgebliche Wirkung, die zur Erreichung der Sektorziele 2030 bedeutend beiträgt. Möglich wird sie durch die gezielte Subventionierung der CO<sub>2</sub>-armen und CO<sub>2</sub>-freien Produktionsverfahren sowie durch einen relevanten und verlässlich kommunizierten Anstieg der CO<sub>2</sub>-Bepreisung im EU ETS. Es zeigt sich allerdings, dass die hinterlegte Kombination aus Förderbudgets und CO<sub>2</sub>-Preis nicht genügt, um nach 2030 einen vollständigen Übergang auf Wasserstoff in der Direktreduktion zu ermöglichen. Stattdessen spielt auch Erdgas noch bis 2040 eine bedeutende Rolle. Gleichzeitig ist die resultierende Umstellung der Stahlerzeugung auf das DRI-Verfahren bis 2030 sehr ambitioniert und setzt eine klare Priorisierung sowie Beschleunigung voraus.

<sup>53</sup> 2018 wurden in Deutschland 42 Mio. t Rohstahl produziert (World Steel Association (2021)).

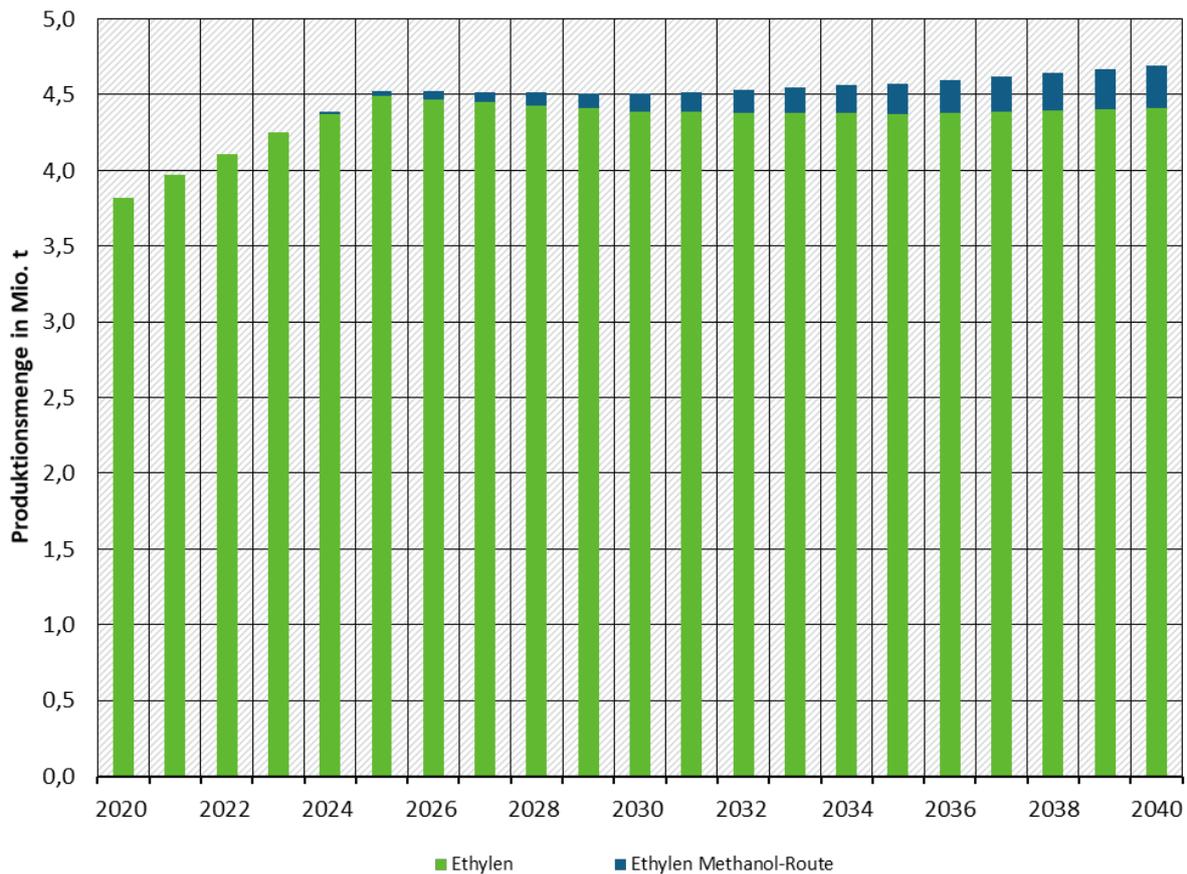
**Abbildung 43: Produktionsmengen Ammoniak nach Verfahren, 2020-2040**

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Die Ammoniakproduktion wird im KIS-2030 nur behutsam umgestellt (Abbildung 43). Bis 2030 werden lediglich 15 % der bis dahin auf 2,5 Mio. t ansteigenden Produktion wasserstoffbasiert durchgeführt. Hauptgrund hierfür sind die hohen Differenzkosten zwischen dem konventionellen, erdgasbasierten, und CO<sub>2</sub>-armen, wasserstoffbasierten Verfahren. Diese werden im KIS-2030 noch 2030 mit etwa 450 €/t Produkt berechnet<sup>54</sup>. Im Vergleich dazu liegen die Differenzkosten wasserstoffbasierter Direktreduktion 2030 nur noch bei geringen 40 €/t Produkt, bei einer ähnlichen spezifischen Treibhausgasemissionsvermeidung (1,6 t CO<sub>2</sub>/t Produkt).

Bei der für das KIS-2030 getroffenen Entscheidung, Förderinstrumente auf die Stahlindustrie zu fokussieren, ist der Erreichung des Sektorziels geschuldet. Denn so können im Rahmen eines limitierten Budgets mehr Minderungen umgesetzt werden. Langfristige Planungen und Strategieentwicklungen hingegen müssen unbedingt auch die teureren Optionen berücksichtigen. Denn sie müssen irgendwann gezogen werden und benötigen entsprechenden Vorlauf, insbesondere Technologieentwicklung und -umsetzung sowie Infrastrukturanbindung. Um das so entstehende Dilemma zu quantifizieren, lässt sich abschätzen, dass die über die Umstellung der Stahlherstellung erzielte Treibhausgasreduktion – mit den angelegten Rahmendaten des KIS-2030 – in der Chemie mindestens mit einer Verzehnfachung des Finanzierungsbedarfes einhergehen würden.

<sup>54</sup> Der überwiegende Teil der Differenzkosten entsteht aus dem Wasserstoffbedarf (25,2 GJ H<sub>2</sub>/t NH<sub>3</sub>), dessen hoher Preis (2030: 32,5 €/GJ) im Vergleich zum günstigen Erdgas (6 €/GJ) bereits Differenzkosten von 670 €/t Produkt erzeugt. Die CO<sub>2</sub>-Bepreisung reduziert diese Differenz etwas – es werden knapp 2 t CO<sub>2</sub>/t Produkt vermieden – kann sie aber nicht kompensieren. Zur Einordnung: Eine Verdreifachung des Erdgaspreises würde diese Differenzkosten auf etwa 30 €/t Produkt senken. Einen ähnlichen Effekt hätte eine ungefähre Verdreifachung (320 €/t CO<sub>2</sub>) der CO<sub>2</sub>-Bepreisung im Jahr 2030.

**Abbildung 44: Produktionsmengen Ethylen nach Verfahren**

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Der für Ammoniak geschilderte Zusammenhang (siehe Ausführungen zu Abbildung 43) gilt in verstärkter Form für die Produktion von Olefinen, hier repräsentiert durch Ethylen (Abbildung 44). Die Differenzkosten des CO<sub>2</sub>-armen, wasserstoffbasierten Produktionsverfahrens im Vergleich zu konventionellen Verfahren über fossiles Naphtha und Dampfspaltöfen sind noch einmal deutlich höher (2030: 2.500 €/t Produkt)<sup>55</sup>.

Im KIS-2030 wird in ähnlicher Größenordnung wie im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) CO<sub>2</sub>-Abscheidung (carbon capture and storage, CCS) zur Reduktion der prozessbedingten Treibhausgasemissionen in der Kalk- und Zementherstellung eingesetzt. Damit werden ansonsten unvermeidbare Treibhausgasemissionen (bzw. nur vermeidbar durch Produktionsreduktion und neue Produktionsverfahren, die im KIS-2030 als nicht relevant verfügbar angenommen wurden) adressiert. Bis 2030 steigt die abgeschiedene Menge auf 0,6 Mio. t, das entspricht etwa den Treibhausgasemissionen eines mittleren Zementwerkes und fällt damit in den Bereich von fortgeschrittenen Demonstrationsanlagen. Die Verwendung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> – zum

<sup>55</sup> Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass für die Produktion von Ethylen die Methanol-to-Olefines-Route (MtO) verwendet wird und das dafür benötigte Methanol aus Wasserstoff hergestellt wird. Aus dem Wasserstoffbedarf von Methanol (22,7 GJ/t Produkt) und der benötigten Menge für Ethylen (2,28 t Methanol/t Ethylen), sowie den ebenfalls zu erzeugenden Nebenprodukten (die in der konventionellen Route immer anfallen, in der MtO-Route jedoch nicht) – dies erhöht den Bedarf noch einmal um den Faktor 2,23 (VCI (2022)) – entsteht ein stofflicher Gesamtbedarf von Wasserstoff von 115 GJ/t Ethylen. Zusammen mit dem für die Verarbeitung benötigten Energiebedarf (11,15 GJ Strom/t Produkt) entspricht dies dem Energieeinsatz der konventionellen Route (in Summe 124 GJ/t Produkt). Wasserstoff (2030: 32,5 €/GJ) ist allerdings deutlich teurer als Naphtha (geschätzt auf Basis von VCI (2022), 11,5 €/GJ). Ein niedrigerer Wasserstoffpreis hätte massive Auswirkungen auf die Differenzkosten, Parität würde bei etwa 11 €/GJ (1,3 €/kg) erreicht. Dieser ist aber nicht absehbar. Er entspräche etwa einem für die Elektrolyse anzulegenden Strompreis von 2 €/ct/kWh – bei auch an anderen Stellen (Investition, Volllaststunden) sehr optimistischen Annahmen.

Beispiel in der wasserstoffbasierten Ethylenproduktion – ist grundsätzlich eine Option. Allerdings ist deren Produktionsmenge im KIS-2030 noch so gering, dass der Aufbau entsprechender Infrastruktur nicht plausibel erscheint.

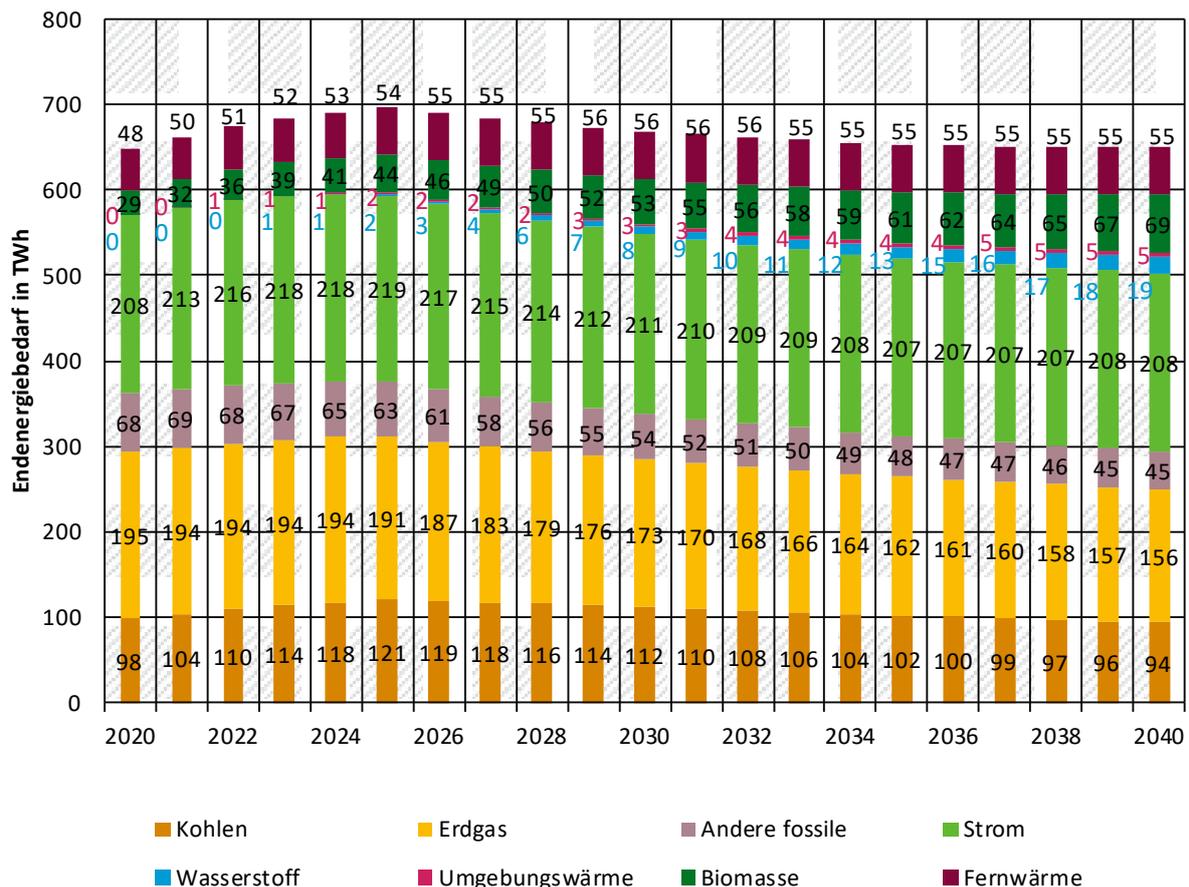
#### **7.2.3.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Aufgrund der geringen – und auf dem für die Beschreibung der KIS-2030-Ergebnisse verwendeten Detailebene nicht mehr darstellbaren – Wirkungen der BEHG-Sensitivität, werden hier keine weiteren Angaben dazu gemacht. Die Gesamtwirkung ist vergleichend in Abschnitt 7.2.3.4 angegeben.

#### **7.2.3.3 MMS**

Der Endenergiebedarf der Industrie im MMS des Projektionsberichts 2021 (Öko-Institut et al. 2021) wurde in einem anderen Bezugsrahmen und Basisjahr als in diesem Bericht angegeben. Auf den hier verwendeten bezogen (damit nicht mehr direkt mit den Angaben in Öko-Institut et al. (2021) – dafür aber mit jenen in diesem Bericht – vergleichbar) stellt sich die Entwicklung im MMS wie in Abbildung 45 gezeigt dar.

Es ist von einer (auch im KIS-2030 sichtbaren) Steigerung des Endenergiebedarfes bis 2025 und einer leichten Absenkung bis 2030 geprägt. Der Strombedarf sinkt ab 2025 leicht und bis 2030 entsteht ein Wasserstoffbedarf von 8 TWh. Beide Energieträger werden im MMS damit nur geringfügig über ihre historische Nutzung hinaus angewendet – insbesondere die Nutzung in neuen Anwendungen ist gering. Darüber hinaus wird im MMS ein relevantes Wachstum der Biomassenutzung errechnet (von 29 TWh 2020 auf 53 TWh 2030). Vor allem aber die Kohlenutzung steigt bis 2030 (aus der durch die Coronakrise bedingten Delle in 2020 kommend) an, die Erdgasnutzung sinkt etwas.

**Abbildung 45: Endenergiebedarf im MMS (umgerechnet auf Basis des KIS-2030)**

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI basierend auf (Öko-Institut et al. 2021)

#### 7.2.3.4 Vergleich der Szenarien

Die Beiträge der verschiedenen Gase zu den Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie (ohne Industriekraftwerke) sind in Tabelle 56 – MMS, KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) vergleichend – dargestellt. Die Darstellung umfasst nur eine Teilmenge der industriellen Treibhausgasemissionen und kann daher nicht zur Instrumentenbewertung herangezogen werden. Eine vergleichbar strukturierte Tabelle, die die gesamten industriellen Treibhausgasemissionen beinhaltet und dadurch mit den oben beschriebenen Instrumentenwirkungen kompatibel ist, ist in Abschnitt 7.6 (Tabelle 74) zu finden.

Die Variation der BEHG-Bepreisung ist in der Industrie nur von geringer Bedeutung, da die relevanten Emissionsquellen im EU ETS bepreist werden. Der von 208 €/t CO<sub>2</sub>-Äq auf 125 €/t CO<sub>2</sub>-Äq reduzierte Preis reduziert in den betroffenen industriellen Anwendungen den Anreiz zur Treibhausgasemissionsreduktion, insbesondere zum Brennstoffwechsel. Die verringerte Wirkung beläuft sich auf 0,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (siehe Tabelle 56). Der Hauptgrund dafür ist eine stärkere Nutzung von Erdgas (+4 TWh im Jahr 2030) und anderer fossiler Energieträger (+1 TWh), einer geringeren Nutzung von Strom, Fernwärme und anderen emissionsärmeren Energieträgern (-6 TWh) und einer insgesamt leicht steigenden Endenergienachfrage (+0,5 TWh)<sup>56</sup>.

<sup>56</sup> Unter Auslassung der Umgebungswärme. Wird diese mitgezählt, sinkt der Endenergiebedarf in der BEHG-Variante um knapp 1 TWh.

**Tabelle 56: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie (ohne Industriekraftwerke) nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	116,6	74,0	72,6				
MMS				69,3	63,2	58,1	54,2
KIS-2030				60,5	50,5	43,7	37,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				60,6	51,1	44,2	37,7
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,2	0,1	0,1				
MMS				0,1	0,1	0,1	0,1
KIS-2030				0,1	0,1	0,1	0,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,1	0,1	0,1	0,0
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,8	0,4	0,4				
MMS				0,5	0,4	0,4	0,4
KIS-2030				0,4	0,3	0,2	0,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,4	0,3	0,2	0,2
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	117,6	74,6	73,1				
MMS				69,9	63,7	58,6	54,7
KIS-2030				61,0	50,9	44,0	37,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				61,1	51,5	44,5	37,9
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>				<b>Veränderung ab 1990 in %</b>			
Entwicklung 1990 – 2018		-36,6	-37,8				
MMS				-40,6	-45,8	-50,2	-53,5
KIS-2030				-48,1	-56,7	-62,6	-68,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-48,1	-56,2	-62,2	-67,7
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>				<b>Veränderung ab 2005 in %</b>			
Entwicklung 1990 – 2018			-1,9				
MMS				-6,2	-14,5	-21,4	-26,6
KIS-2030				-18,2	-31,7	-40,9	-49,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-18,1	-30,9	-40,3	-49,1

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

## 7.3 Industriekraftwerke

### 7.3.1 Methodik

Bei den Industriekraftwerken (und somit im KSG-Sektor Industrie) werden diejenigen Brennstoffeinsätze und deren Emissionen bilanziert, die auf die Eigenerzeugung von Strom und KWK-Wärme im Verarbeitenden Gewerbe entfallen. Die Brennstoffeinsätze und Emissionen für von der Industrie fremdbezogenen Strom und Fernwärme werden in der Energiewirtschaft bilanziert.

Die Berechnung der Brennstoffeinsätze der Industriekraftwerke erfolgt für alle drei Szenarien der gleichen Methodik, wie sie bereits im Projektionsbericht 2021 (Abschnitt 6.2.1) beschrieben wurde (Öko-Institut et al. 2021).

### 7.3.2 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Die Parametrisierung der Industriekraftwerke hängt im Wesentlichen von Ergebnissen des Industriemodells FORECAST-Industry ab, wie bereits in Abschnitt 6.2.3 des Projektionsberichts 2021 beschrieben (Öko-Institut et al. 2021). In Tabelle 57 sind die entsprechenden Parameter für das Szenario KIS-2030 dargestellt. Die wesentlichen Änderungen gegenüber dem MMS ist eine im Jahr 2030 um 10 % niedrigere KWK-Wärmeerzeugung, eine wegen verringerter Oxygenstahlproduktion um 43 % niedrigere Gichtgasverstromung und höherer zusätzlicher Biomasseeinsatz zur Wärmeerzeugung. Der Abfallindex gibt an, wie sich der Abfalleinsatz in FORECAST-Industry verändert; diese relative Veränderung gegenüber dem Basisjahr wird dann auf die Industriekraftwerke übertragen.

**Tabelle 57: Parameter der Industriekraftwerke im KIS-2030, 2018-2040**

	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
KWK-Wärmeerzeugung in IKW	PJ	332	307	248	210	178
Gichtgaseinsatz in IKW	PJ	72	60	36	20	14
<i>Limit zusätzlicher Biomasseeinsatz Wärmescheibe KWK</i>	PJ	0	53	44	25	5
Abfallindex	%	100	92	79	67	57

Quelle: Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 58 stellt für die BEHG-Sensitivität des KIS-2030 entsprechend die wesentlichen Parameter der Industriekraftwerke dar. Lediglich bei der aus dem Modell FORECAST-Industry kommenden Begrenzung des maximal zulässigen Biomasseeinsatzes ergeben sich Unterschiede, da die Biomassenutzung in den Endverbrauchssektoren der Industrie anders ist.

**Tabelle 58: Parameter der Industriekraftwerke im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040**

	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
KWK-Wärmeerzeugung in IKW	PJ	332	307	248	210	178
Gichtgaseinsatz in IKW	PJ	72	60	36	20	14
<i>Limit zusätzlicher</i> Biomasseinsatz Wärmescheibe KWK	PJ	0	28	23	14	3
Abfallindex	%	100	92	79	67	57

Quelle: Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Die entsprechenden Werte des MMS sind in Tabelle 47 des Projektionsberichts 2021 dokumentiert (Öko-Institut et al. 2021).

### 7.3.3 Ergebnisse

#### 7.3.3.1 KIS-2030

Tabelle 59 stellt die Brennstoffeinsätze in Industriekraftwerken im KIS-2030 für den Zeitraum 2018 bis 2040 dar. Bis 2030 gehen die Brennstoffeinsätze um ein gutes Drittel zurück. Der wesentliche Grund hierfür ist der sinkende Bedarf an fossiler KWK-Wärme durch die steigenden CO<sub>2</sub>-Preise. Dies schlägt sich in einem generellen Rückgang aller Brennstoffe in Kraftwerken außer Biomasse nieder. Der Einsatz fester Biomasse erlebt kurzfristig bis etwa 2025 einen deutlichen Anstieg, sinkt dann aber wieder ab. Der Ausstieg aus der Kohleverstromung betrifft auch die Industriekraftwerke, daher ist der Einsatz von Braun- und Steinkohlen ab 2030 null. Der Rückgang der Oxygenstahlerzeugung aufgrund des Wechsels zu alternativen Stahlherstellungsverfahren führt zu einer Halbierung des Gichtgaseinsatzes zwischen 2018 und 2030. Auch der Einsatz von Erdgas, das 2018 den Brennstoffeinsatz der Industriekraftwerke mit einem Anteil von 46 % dominiert, ist mit einer Abnahme um 36 % zwischen 2018 und 2030 stark rückläufig. Insgesamt bewirkt der Trend zur Elektrifizierung der Prozesswärmeerzeugung in den Endverbrauchssektoren eine Reduktion des Brennstoffeinsatzes in den Industriekraftwerken.

**Tabelle 59: Brennstoffeinsatz in Industriekraftwerken im KIS-2030, 2018-2040**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Braunkohlen	27	10	0	0	0
Steinkohlen	52	21	0	0	0
Öl	33	10	4	3	2
Raffineriegas	11	9	7	4	3
Erdgas	379	312	241	132	44
Gichtgas	72	60	36	18	14
Kokerei-/Stadtgas	29	11	6	7	5
Sonstige Gase	10	10	10	10	10
Abfall (fossil)	50	46	39	32	28
Biogas	2	1	0	0	0
Feste Biomasse inkl. biogener Abfall	138	210	198	159	145
Flüssige Biomasse	1	0	0	0	0
Wasserstoff	0	0	0	74	174
<b>Industriekraftwerke gesamt</b>	<b>819</b>	<b>700</b>	<b>541</b>	<b>451</b>	<b>381</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-14,6 %</i>	<i>-33,9 %</i>	<i>-44,9 %</i>	<i>-53,5 %</i>

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

### 7.3.3.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Der niedrigere BEHG-Preis hat nur geringe Auswirkungen auf die Industriekraftwerke. Die deutlichsten Auswirkungen sind im Jahr 2035 mit etwas höheren fossilen Brennstoffeinsätzen zu sehen.

**Tabelle 60: Brennstoffeinsatz in Industriekraftwerken im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040**

Brennstoff	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Braunkohlen	27	10	0	0	0
Steinkohlen	52	21	0	0	0
Öl	33	10	4	3	1
Raffineriegas	11	9	7	5	3
Erdgas	379	312	241	153	0
Gichtgas	72	60	36	20	14
Kokerei-/Stadtgas	29	11	6	6	5
Sonstige Gase	10	10	10	10	10
Abfall (fossil)	50	46	39	33	28
Biogas	2	1	0	0	0
Feste Biomasse inkl. biogener Abfall	138	210	198	173	145
Flüssige Biomasse	1	0	0	0	0
Wasserstoff	0	0	0	0	0
<b>Industriekraftwerke gesamt</b>	<b>819</b>	<b>700</b>	<b>541</b>	<b>451</b>	<b>381</b>
Änderung ggü. 2018	0,0 %	-14,6 %	-33,9 %	-44,9 %	-53,5 %

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

### 7.3.3.3 MMS

„Die im Mit-Maßnahmen-Szenario projizierte Entwicklung der Brennstoffeinsätze der Industriekraftwerke ist in [Tabelle 61] dargestellt. Der Rückgang der Brennstoffeinsätze um [gut 20 %] bis 2030 und um [23 %] bis 2040 ist im Wesentlichen durch eine rückläufige KWK-Wärmeerzeugung determiniert“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Tabelle 61: Brennstoffeinsatz in Industriekraftwerken im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
			52		
Braunkohlen	27	18	9	7	0
Steinkohlen	52	34	23	0	0
Öl	33	22	15	12	13
Raffineriegas	11	10	9	8	6
Erdgas	379	339	302	303	349
Gichtgas	72	68	63	60	58
Kokerei-/Stadtgas	29	19	13	11	18
Sonstige Gase	10	10	10	10	10
Abfall (fossil)	50	47	41	36	32
Biogas	2	1	1	1	1
Feste Biomasse inkl. biogener Abfall	138	151	165	172	145
Flüssige Biomasse	1	1	0	0	0
<b>Industriekraftwerke gesamt</b>	<b>819</b>	<b>720</b>	<b>653</b>	<b>619</b>	<b>631</b>
Änderung ggü. 2018	0,0 %	-11,0 %	-20,2 %	-24,4 %	-23,0 %

Quelle: Brennstoffe: 2018: (UBA 2020c; 2020e), 2025-2040: Modellrechnungen des Öko-Institut. Tabelle übernommen aus Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021), Werte für 2018 und Änderung ggü. 2018 korrigiert.

„Der Kohleausstieg führt dazu, dass nach 2033 keine Steinkohle und nach 2038 keine Braunkohle mehr in Industriekraftwerken genutzt wird. Der Einsatz von Erdgas sinkt zunächst, erreicht aber Anfang der 2030er Jahre ein Plateau, um dann bis 2040 wieder deutlich anzusteigen. Der Einsatz fester Biomasse steigt bis 2035 an; 2040 liegt er knapp über dem Niveau von 2018. Ein wesentlicher Grund für den Anstieg bei Erdgas und Biomasse ist, dass der Rückgang von Kohlen, Sondergasen (Gichtgas, Kokereigas, sonstige Gase) und Abfall kompensiert werden muss. Biogas und flüssige Biomasse spielen nur eine sehr untergeordnete Rolle“ (Öko-Institut et al. 2021).

#### 7.3.3.4 Vergleich der Szenarien

Die Treibhausgasemissionen der Industriekraftwerke wurden zwischen 1990 und 2018 von gut 69 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um gut 17 % auf 57 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq reduziert. Im Vergleich der Szenarien unterscheiden sich die Emissionen im Jahr 2030 deutlich, wie Tabelle 62 zeigt. Während im MMS mit gut 43 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq die Emissionen um 38 % niedriger als 1990 liegen, betragen die Emissionen im KIS-2030 nur knapp 28 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und somit knapp 60 % niedriger als im Jahr 1990.

Die BEHG-Preissensitivität des KIS-2030 hat nur geringe Auswirkungen auf die Emissionen der Industriekraftwerke.

Wie bei den meisten Verbrennungsprozessen haben Methan- und Lachgasemissionen aus den Industriekraftwerken nur einen geringen Anteil.

**Tabelle 62: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Industriekraftwerke nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	68,5	40,3	56,4				
MMS				48,8	42,6	38,5	39,7
KIS-2030				41,9	27,4	17,5	7,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				41,9	27,4	17,7	6,9
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,1	0,1	0,2				
MMS				0,2	0,1	0,1	0,2
KIS-2030				0,2	0,1	0,1	0,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,2	0,1	0,1	0,0
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,5	0,3	0,4				
MMS				0,4	0,3	0,3	0,3
KIS-2030				0,4	0,3	0,2	0,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,4	0,3	0,2	0,1
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	69,1	40,8	57,0				
MMS				49,4	43,1	39,0	40,2
KIS-2030				42,5	27,8	17,8	7,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				42,5	27,8	18,0	7,1
<b>Veränderung ab 1990 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018		-41,0	-17,5				
MMS				-28,5	-37,6	-43,6	-41,8
KIS-2030				-38,5	-59,7	-74,3	-89,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-38,5	-59,7	-74,0	-89,7
<b>Veränderung ab 2005 in %</b>							
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Entwicklung 1990 – 2018			39,8				
MMS				21,1	5,7	-4,4	-1,5
KIS-2030				4,2	-31,7	-56,4	-82,5
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				4,2	-31,7	-55,9	-82,5

Quelle: (UBA 2020c), Öko-Institut et al. (2021) für das MMS, Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI für KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

## 7.4 Industrieprozesse und Produktverwendung (CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>-, und N<sub>2</sub>O-Emissionen)

### 7.4.1 Methodik

Im Subsektor Industrieprozesse und Produktverwendung werden Prozessemissionen u.a. aus der Zement- und der Stahlerzeugung modelliert. Analog zum Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) wurden zunächst die Produktionsmengen der relevanten Produkte im Modell FORECAST modelliert. Anschließend wurden mit Hilfe von stöchiometrischen oder literaturbasierten Emissionsfaktoren daraus die Emissionen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O berechnet; dies geschah zusätzlich zur Berechnung des Energieverbrauchs, die bereits in Abschnitt 7.1 behandelt wurde.

Wird CCS angewendet, so entstehen auch CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Pipelinetransport und bei der Einlagerung von CO<sub>2</sub>. Diese Emissionen werden nicht separat berechnet, sondern in der Abscheiderate berücksichtigt. Die Abscheiderate gibt jenen Anteil des CO<sub>2</sub> an, der abgeschieden und exportiert wird. CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Transport innerhalb Deutschlands sind damit berücksichtigt, und Emissionen bei Transport und Einlagerung außerhalb Deutschlands werden gemäß der Inventar-Abgrenzung nicht mit bilanziert.

### 7.4.2 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Die allgemeinen Annahmen und Parameter bleiben gegenüber dem Projektionsbericht 2021 unverändert und sind dort beschrieben (Öko-Institut et al. 2021).

### 7.4.3 Ergebnisse

#### 7.4.3.1 KIS-2030

Die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung ist in Tabelle 63 dargestellt. Von 1990 bis 2018 sanken diese Emissionen um rund 39 % von 81,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf 49,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2018. Bis 2030 werden sie im KIS-2030 auf 34,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und somit um rund 58 % gegenüber dem Jahr 1990 sinken. Im Jahr 2040 beträgt die Reduktion gegenüber dem Basisjahr rund 66 %.

Die CO<sub>2</sub>-Prozessemissionen der mineralischen Industrie sanken zwischen 1990 und 2018 um 17 % auf 19,6 Mio. t CO<sub>2</sub>. Im KIS-2030 werden sie von 2018 bis 2030 um rund 13 % auf 17,1 Mio. t reduziert. Die größte Abnahme der Emissionen findet in der Kalkproduktion statt. Der Rückgang bei Kalk ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund des Rückgangs der Kohleverstromung ein verringerter Bedarf für die Rauchgasreinigung besteht und dass aufgrund des Umstiegs auf Direktreduktion der Kalkeinsatz in Hochöfen zurückgeht. Bei Zement ist entsprechen der Produktionsmenge von Klinker nur ein geringfügiger Rückgang zu verzeichnen.

In der chemischen Industrie wurden die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 bis 2018 um 32 % von 8,1 auf 5,5 Mio. t CO<sub>2</sub> reduziert. Bis 2030 sinken diese um weitere 16 % auf 4,6 Mio. t. Die Ammoniakproduktion stellt die bedeutendste Kategorie dar; die Emissionen in dieser Kategorie reduzieren sich im KIS-2030 u.a. durch die Einführung der Wasserstoff-Ammoniaksynthese um rund 20 % zwischen 2018 und 2030.

In der Metallproduktion reduzierten sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1990 und 2018 um 15 % auf 21,2 Mio. t CO<sub>2</sub>. Im KIS-2030 ergibt sich jedoch zwischen 2018 und 2030 eine Abnahme um rund 55 % auf 9,5 Mio. CO<sub>2</sub>, die zum größten Teil in der Kategorie Eisen und Stahl stattfindet. Der wichtigste Treiber für diese Emissionsreduktion ist der Umstieg von der Hochofenroute auf die Eisenherstellung durch Direktreduktion, kombiniert mit Elektrostahlproduktion. Dies ist besonders bedingt durch das Instrumentenbündel zur Finanzierung CO<sub>2</sub>-armer Produktionsverfahren.

Die Treibhausgasemissionen weiterer Kategorie nahmen von 1990 und 2018 ebenfalls ab, insbesondere die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verwendung von Lösemitteln. Diese reduzieren sich zwischen 2018 und 2030 jedoch nur wenig.

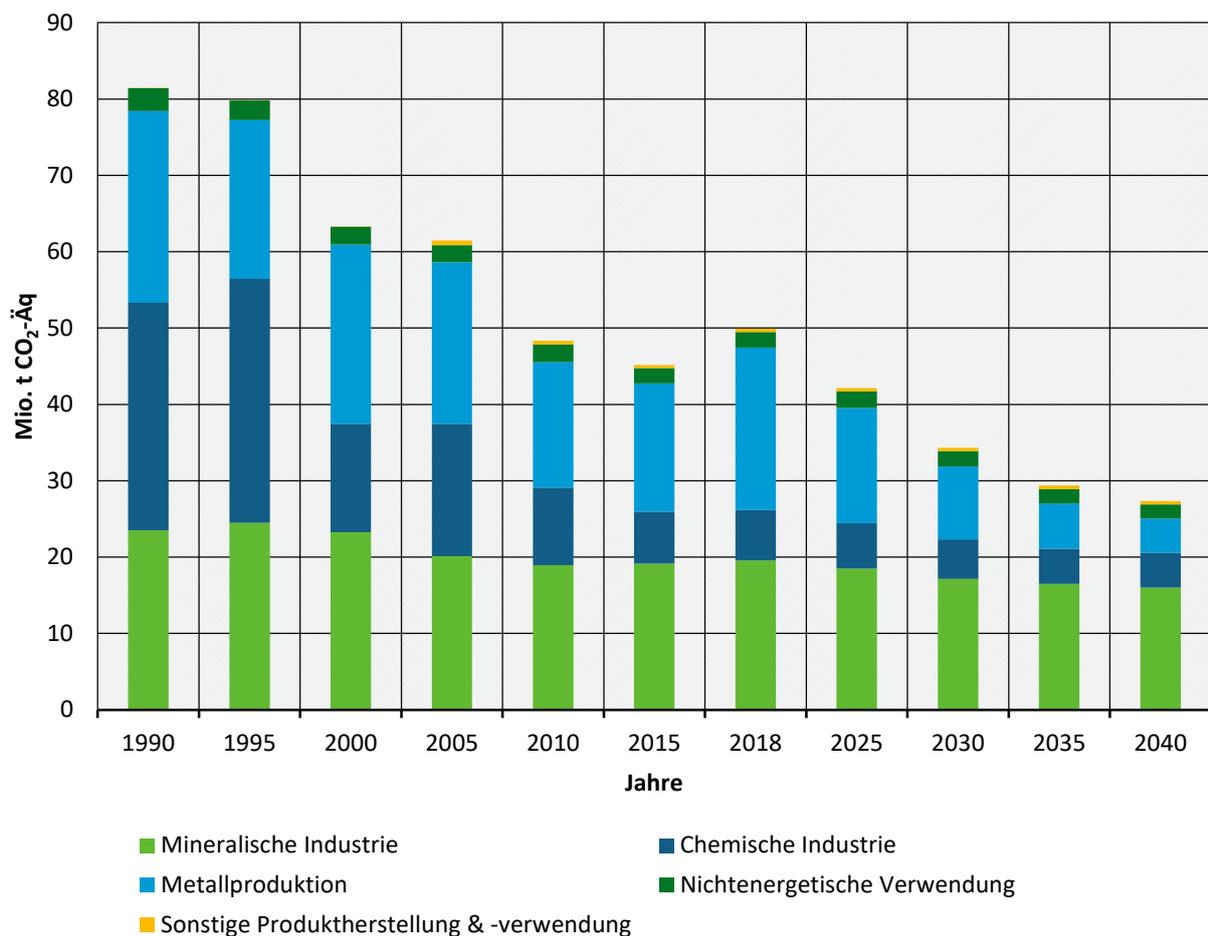
**Tabelle 63: Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Mineralische Industrie (2.A)	23,5	20,1	19,6	18,5	17,1	16,5	16,0
<i>Zement (2.A.1)</i>	15,3	13,0	13,2	13,3	12,7	12,3	11,9
<i>Kalk (2.A.2)</i>	6,0	5,3	4,8	3,7	3,0	2,8	2,7
<i>Glas (2.A.3)</i>	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
<i>Keramik (2.A.4.a)</i>	1,1	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<i>Sonstige Sodaverwendung (2.A.4.b)</i>	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Chemische Industrie (2.B)	8,1	8,7	5,5	5,2	4,6	4,1	4,1
<i>Ammoniak (2.B.1)</i>	6,0	7,2	4,2	3,9	3,3	2,9	2,9
<i>Carbid (2.B.5)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Soda (2.B.7)</i>	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
<i>Industrieruß (2.B.8)</i>	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
Metallproduktion (2.C)	25,1	21,1	21,2	15,1	9,5	5,9	4,5
<i>Eisen &amp; Stahl (2.C.1)</i>	22,8	19,6	20,1	14,0	8,4	4,8	3,4
<i>Ferrolegierungen (2.C.2)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Aluminium (2.C.3)</i>	1,0	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>Blei (2.C.5)</i>	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Zink (2.C.6)</i>	0,7	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Nichtenergetische Verwendung (2.D)	3,0	2,2	2,0	2,1	2,0	1,9	1,8
<i>Schmiermittel (2.D.1)</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Paraffinwachse (2.D.2)</i>	0,2	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>Lösemittel (2.D.3.a)</i>	2,6	1,6	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
<i>AdBlue (2.D.3.d.1)</i>	NA	0,0	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1
CO <sub>2</sub> -Emissionen gesamt	59,7	52,2	48,3	40,9	33,3	28,4	26,4
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
CH <sub>4</sub> -Emissionen gesamt	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Chemische Industrie (2.B)	21,3	8,0	0,6	0,3	0,1	0,0	0,0
<i>Salpetersäure (2.B.2)</i>	3,3	4,9	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0
<i>Adipinsäure (2.B.3)</i>	18,1	3,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
Metallproduktion (2.C)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nichtenergetische Verwendung (2.D)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sonstige Produktherstellung & -verwendung (2.G)	0,0	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
N <sub>2</sub> O-Emissionen gesamt	21,4	8,6	1,1	0,7	0,5	0,5	0,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
<b>Industrieprozesse gesamt</b>	<b>81,4</b>	<b>61,5</b>	<b>49,9</b>	<b>42,1</b>	<b>34,3</b>	<b>29,4</b>	<b>27,4</b>
<i>ggü. 2005</i>	32,4 %	0,0 %	-18,7 %	-31,4 %	-44,2 %	-52,2 %	-55,5 %
<i>ggü. 1990</i>	0,0 %	-24,5 %	-38,6 %	-48,2 %	-57,8 %	-63,9 %	-66,4 %

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

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

**Abbildung 46: Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

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

Abbildung 46 stellt diese Entwicklung der Prozessemissionen grafisch dar. Der größte Teil der historischen Minderung der CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen konnte in der chemischen Industrie, gefolgt von der Metallproduktion, erzielt werden. Bis zum Jahr 2030 kommt es insbesondere in der Eisen- und Stahlindustrie zu weiteren bedeutenden Emissionsreduktionen.

Die Zunahme der Emissionen zwischen 2015 und 2018 ist durch erhöhte Prozessemissionen der Eisen- und Stahlindustrie bedingt. Dabei ist zu beachten, dass im Treibhausgasinventar jährliche Schwankungen zwischen Prozessemissionen und energiebedingten Emissionen auftreten; die Gesamtsumme der Treibhausgasemissionen der Eisen- und Stahlindustrie wies in den vergangenen Jahren nur geringe Schwankungen auf (Umweltbundesamt 2021).

#### 7.4.3.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Die veränderten BEHG-Preise wirken sich nur marginal auf die Emissionen aus Industrieprozessen und Produktnutzung aus. Konkret kommt es zu etwas geringeren Emissionen in der Kategorie Eisen und Stahl (-0,015 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030) und zu etwas höheren Emissionen aus der Nutzung von AdBlue (+0,011 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030). Damit sind die Treibhausgasemissionen aus Industrieprozessen und Produktnutzung im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) annähernd identisch mit jenen im KIS-2030, die in Tabelle 63 dargestellt sind.

## 7.4.3.3 MMS

Tabelle 64 zeigt die Entwicklung der Industrieprozessemissionen nach Quellgruppen im MMS. Im Gegensatz zum KIS-2030 ändern sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der mineralischen Industrie zwischen 2018 und 2030 nur wenig, und die Emissionsreduktion in der Metallproduktion ist weniger ausgeprägt. Insgesamt wird im Jahr 2030 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um rund 47 % gegenüber 1990 erreicht, und damit um 11 Prozentpunkte weniger als im KIS-2030.

**Tabelle 64: Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im MMS**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Mineralische Industrie (2.A)	23,5	20,1	19,6	19,4	18,7	18,1	17,9
<i>Zement (2.A.1)</i>	15,3	13,0	13,2	13,4	12,9	12,5	12,3
<i>Kalk (2.A.2)</i>	6,0	5,3	4,8	4,5	4,4	4,2	4,2
<i>Glas (2.A.3)</i>	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
<i>Keramik (2.A.4.a)</i>	1,1	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<i>Sonstige Sodaverwendung (2.A.4.b)</i>	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Chemische Industrie (2.B)	8,1	8,7	5,5	5,3	5,3	5,3	5,4
<i>Ammoniak (2.B.1)</i>	6,0	7,2	4,2	4,0	4,0	4,1	4,2
<i>Carbid (2.B.5)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Soda (2.B.7)</i>	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
<i>Industrieruß (2.B.8)</i>	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
Metallproduktion (2.C)	25,1	21,1	21,2	17,3	15,9	14,8	14,1
<i>Eisen &amp; Stahl (2.C.1)</i>	22,8	19,6	20,1	16,2	14,8	13,7	12,9
<i>Ferrolegerungen (2.C.2)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Aluminium (2.C.3)</i>	1,0	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>Blei (2.C.5)</i>	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Zink (2.C.6)</i>	0,7	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nichtenergetische Verwendung (2.D)	3,0	2,2	2,0	2,1	2,1	2,0	2,0
<i>Schmiermittel (2.D.1)</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Paraffinwachse (2.D.2)</i>	0,2	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>Lösemittel (2.D.3.a)</i>	2,6	1,6	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
<i>AdBlue (2.D.3.d.1)</i>	NA	0,0	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2
CO <sub>2</sub> -Emissionen gesamt	59,7	52,2	48,3	44,1	42,0	40,3	39,3

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
CH <sub>4</sub> -Emissionen gesamt	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Chemische Industrie (2.B)	21,3	8,0	0,6	0,3	0,1	0,0	0,0
Salpetersäure (2.B.2)	3,3	4,9	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0
Adipinsäure (2.B.3)	18,1	3,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
Metallproduktion (2.C)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nichtenergetische Verwendung (2.D)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sonstige Produktherstellung & -verwendung (2.G)	0,0	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
N <sub>2</sub> O-Emissionen gesamt	21,4	8,6	1,1	0,7	0,6	0,5	0,5
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
<b>Industrieprozesse gesamt</b>	<b>81,4</b>	<b>61,5</b>	<b>49,9</b>	<b>45,3</b>	<b>43,1</b>	<b>41,3</b>	<b>40,3</b>
ggü. 2005	32,4 %	0,0 %	-18,7 %	-26,2 %	-30,0 %	-32,8 %	-34,5 %
ggü. 1990	0,0 %	-24,5 %	-38,6 %	-44,3 %	-47,1 %	-49,3 %	-50,5 %

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

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

#### 7.4.3.4 Vergleich der Szenarien

Tabelle 65 zeigt die Entwicklung der Industrieprozessemissionen in den Szenarien MMS, KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).

**Tabelle 65: Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	59,7	52,2	48,3				
MMS				44,1	42,0	40,3	39,3
KIS-2030				40,9	33,3	28,4	26,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				40,9	33,3	28,5	26,5
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,4	0,6	0,5				
MMS				0,5	0,5	0,5	0,5
KIS-2030				0,5	0,5	0,5	0,5
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,5	0,5	0,5	0,5

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	21,4	8,6	1,1				
MMS				0,7	0,6	0,5	0,5
KIS-2030				0,7	0,5	0,5	0,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,7	0,5	0,5	0,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	81,4	61,5	49,9				
MMS				45,3	43,1	41,3	40,3
KIS-2030				42,1	34,3	29,4	27,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				42,1	34,3	29,4	27,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 1990 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018		-24,5	-38,6				
MMS				-44,3	-47,1	-49,3	-50,5
KIS-2030				-48,2	-57,8	-63,9	-66,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-48,3	-57,8	-63,9	-66,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 2005 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018			-18,7				
MMS				-26,2	-30,0	-32,8	-34,5
KIS-2030				-31,4	-44,2	-52,2	-55,5
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-31,5	-44,2	-52,2	-55,4

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030

Im Jahr 2030 sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen im KIS-2030 um 8,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (rund 21 %) geringer als im MMS. Die weitaus größte Differenz zwischen den beiden Szenarien tritt in der Eisen- und Stahlindustrie auf, durch den beschleunigten Umstieg der Eisen- und Stahlproduktion auf Direktreduktion kombiniert mit Elektro Stahl.

Die Emissionen von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O ändern sich nur wenig zwischen 2018 und 2030 und zwischen den Szenarien. Im Jahr 2030 sind die N<sub>2</sub>O-Emissionen im KIS-2030 um 0,02 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq geringer als im MMS.

Zwischen KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) bestehen nur sehr geringe Unterschiede, da sich veränderte BEHG-Preise nur marginal auf die Prozessemissionen auswirken (vgl. Abschnitt 7.4.3.2).

## 7.5 Industrieprozesse und Produktverwendung (Fluorierte Treibhausgase)

### 7.5.1 Methodik

Die für das KIS-2030 benutzte Methodik zur Modellierung der F-Gas-Emissionen baut stark auf der für den Projektionsbericht 2021 genutzten und in Öko-Institut et al. (2021) dokumentierten Methodik auf:

*„Die gemäß der 2006 IPCC Guidelines (IPCC 2006b) zu berücksichtigenden fluorierten Treibhausgase umfassen*

- a) *teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW, 19 verschiedene Substanzen);*
- b) *perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW, 9 verschiedene Substanzen);*
- c) *Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) sowie*
- d) *Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>).*

*Um vertrauliche Daten zu schützen, kann in den Inventaren gemäß den IPCC Guidelines auch eine „nicht spezifizierte Mischung von HFKW und FKW“ berichtet werden<sup>57</sup>. Für die Umrechnung der Emissionen der verschiedenen Substanzen in CO<sub>2</sub>-Äquivalente werden Treibhausgaspotenziale (GWPs) aus dem 4. IPCC Assessment Report (AR4) verwendet (IPCC 2007)“ (Öko-Institut et al. 2021).*

Für die Anpassung/Verschärfung des EU HFKW-Phase-down (gemäß EU-F-Gas-Verordnung 517/2014) nach 2030 zur Einhaltung der EU-Ziele unter dem Montrealer Protokoll wird zur Modellierung der Emissionen nach 2030 angenommen, dass der im Projektionsbericht 2021 im MMS für die Jahre nach 2030 beschriebene Abwärtstrend der HFKW-Emissionen aus den vom Phase-down betroffenen Sektoren proportional zur Entwicklung der für die EU gültigen Reduktionsstufen<sup>58</sup> im HFKW-Verbrauch gemäß Montrealer Protokoll verstärkt wird.

Die zukünftigen SF<sub>6</sub>-Emissionen aus elektrischen Schaltanlagen waren im Projektionsbericht 2021 über eine konstante Fortschreibung des Basisjahres abgeschätzt worden. In einem neu entwickelten Modul des F-Gas-Projektionsmodells des Öko-Instituts können die SF<sub>6</sub>-Emissionen aus Schaltanlagen über ein Bestandsänderungsmodell und Emissionsfaktoren für Befüllung und Entsorgung berechnet werden. Angesichts der ab den 2020er Jahren in verstärktem Maße zu entsorgenden Altanlagen (Nutzungsdauer ~40 Jahre) sind demnach ohne weitere Maßnahmen steigende SF<sub>6</sub>-Emissionen aus der Entsorgung zu erwarten. Verbote für den Einsatz von SF<sub>6</sub> in Neuanlagen wirken in naher Zukunft nur minimal durch die Vermeidung von ohnehin geringen Emissionen aus der Befüllung und Undichtigkeiten, sondern insbesondere durch niedrigere Entsorgungsemissionen in der ferneren Zukunft. Um für SF<sub>6</sub> aus Schaltanlagen die Konsistenz des KIS-2030 mit der konstanten Extrapolation im MMS sicherzustellen, wird für das KIS-2030 über das MMS hinaus die Differenz der Emissionen zwischen dem SF<sub>6</sub>-Verbotsszenario und dem Referenzszenario im Schaltanlagen-Modul des F-Gas-Projektionsmodells berücksichtigt.

### 7.5.2 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Für sonstige allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung wird auf den Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) verwiesen.

<sup>57</sup> Im Fall des dieser Projektion zu Grunde liegenden deutschen Inventars von 2018 sind in dieser „nicht spezifizierten Mischung“ auch vertrauliche SF<sub>6</sub>-Emissionen enthalten.

<sup>58</sup> Unter dem Montrealer Protokoll ist für die EU und die anderen Industriestaaten der Verbrauch an HFKW ab 2019 auf 90 % der Baseline beschränkt, ab 2024 auf 60 %, ab 2029 auf 30 %, ab 2034 auf 20 % und ab 2036 auf 15 %.

### 7.5.3 Ergebnisse

#### 7.5.3.1 KIS-2030

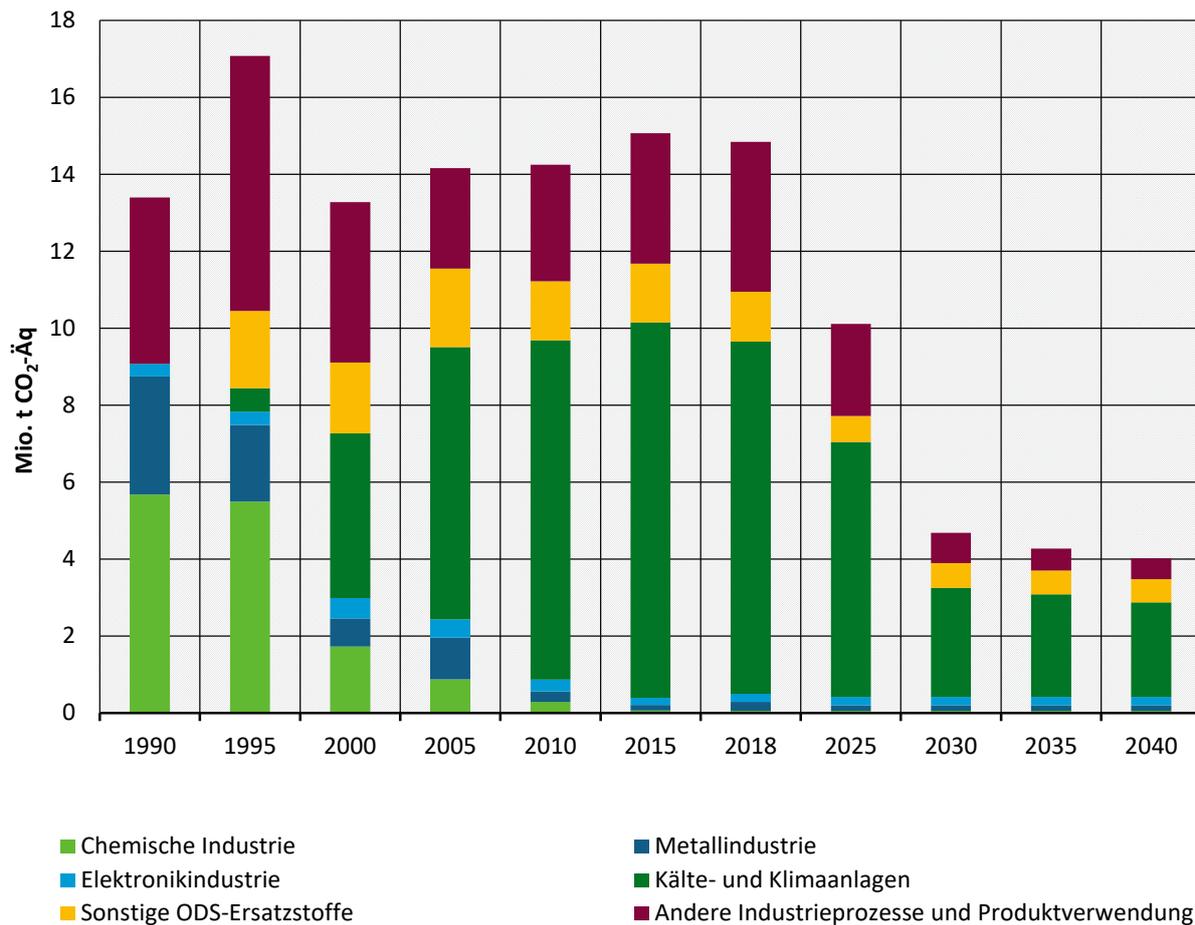
Die F-Gas-Emissionen im KIS-2030 unterscheiden sich bis 2030 nur geringfügig von denen im MMS: für 2030 liegt das KIS-2030 um 1 % unter dem MMS, absolut 0,02 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Bis 2040 liegt das KIS-2030 um 5 % unter dem MMS, absolut 0,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (Tabelle 70).

Diese niedrigen Minderungsraten gegenüber dem MMS sind im Wesentlichen dadurch begründet, dass

- a) angesichts der Nutzungs- und Emissionsmuster der meisten F-Gas-Anwendungen ein großer Zeitverzug zwischen dem Einsetzen von Instrumenten und Maßnahmen und der Wirkung auf die Emissionen zu berücksichtigen ist und
- b) stärker wirksame mögliche über das MMS hinausgehende Instrumente zu wesentlichen Teilen im unmittelbarer Regelungskompetenz der EU verortet sind und somit aus dem national ausgerichteten Rahmen des KIS-2030 herausfallen.

Zusätzlich zur Wirkung der in Tabelle 66 bewerteten Instrumente zur Minderung von F-Gas-Emissionen werden die F-Gas-Emissionen im KIS-2030 im Vergleich zum MMS noch geringfügig von einer gesteigerten Materialeffizienz beeinflusst, welche sich in einem leichten Rückgang der Produktionsmengen an Primäraluminium und der damit zusammenhängenden Emissionen an FKW zeigt.

Die Entwicklung der Emissionen an fluorierten Treibhausgasen im KIS-2030 wird in Abbildung 47 in der Differenzierung nach Quellgruppen und in Abbildung 48 in der Differenzierung nach fluorierten Gasen bzw. Gasgruppen gezeigt. Entsprechende tabellarische Übersichten finden sich in Tabelle 66 (nach Quellgruppen) und in Tabelle 67 (nach Gasen/Gasgruppen).

**Abbildung 47: Entwicklung der Emissionen von F-Gasen nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

Anmerkungen: ODS: unter dem Montrealer Protokoll adressierte ozonabbauende Stoffe (ozone depleting substances)  
 Quelle: 1990-2018: (UBA 2020c), 2025 – 2040: Modellrechnungen Öko-Institut

Die Entwicklung der F-Gas-Emissionen seit 1990 wurde im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) beschrieben:

„Die Summe der Emissionen der fluorierten Treibhausgase (F-Gase) ist seit 1990 nach einer zwischenzeitlichen Steigerung Mitte der 1990er Jahre bis 2017 auf 15 % über das Niveau von 1990 gestiegen, das entspricht 8 % über dem Niveau von 2005 [(UBA 2020c)]. Ursache waren stetig steigende HFKW-Emissionen von Kälte- und Klimaanlage sowie SF<sub>6</sub>-Emissionen aus alten Schallschutzfenstern<sup>59</sup> bei sinkenden SF<sub>6</sub>- und FKW-Emissionen aus der Produktion von fluorierten Chemikalien und der Metallindustrie (Magnesium und Aluminium) sowie sinkenden HFKW-Emissionen aus der Schaumproduktion<sup>60</sup>. Von 2017 nach 2018 wurde zum ersten Mal seit Ende der 1990er Jahre ein Rückgang der F-Gas-Emissionen beobachtet, auf 5 % über das Niveau von 2005“ (Öko-Institut et al. 2021).

Im KIS-2030 fallen nach 2018 die F-Gas-Emissionen bis 2030 deutlich auf 33 % des Niveaus von 2005, bis 2040 wird eine weitere leichte Emissionsreduktion bis auf 28 % des Niveaus von 2005 erwartet. Ursachen dieser Emissionsreduktion sind wie im MMS vor allem angesichts MAC-

<sup>59</sup> SF<sub>6</sub>-Emissionen aus Schallschutzfenstern sind bis 2025 der größte Anteil der [...], anderen Industrieerzeuge und Produktverwendung.

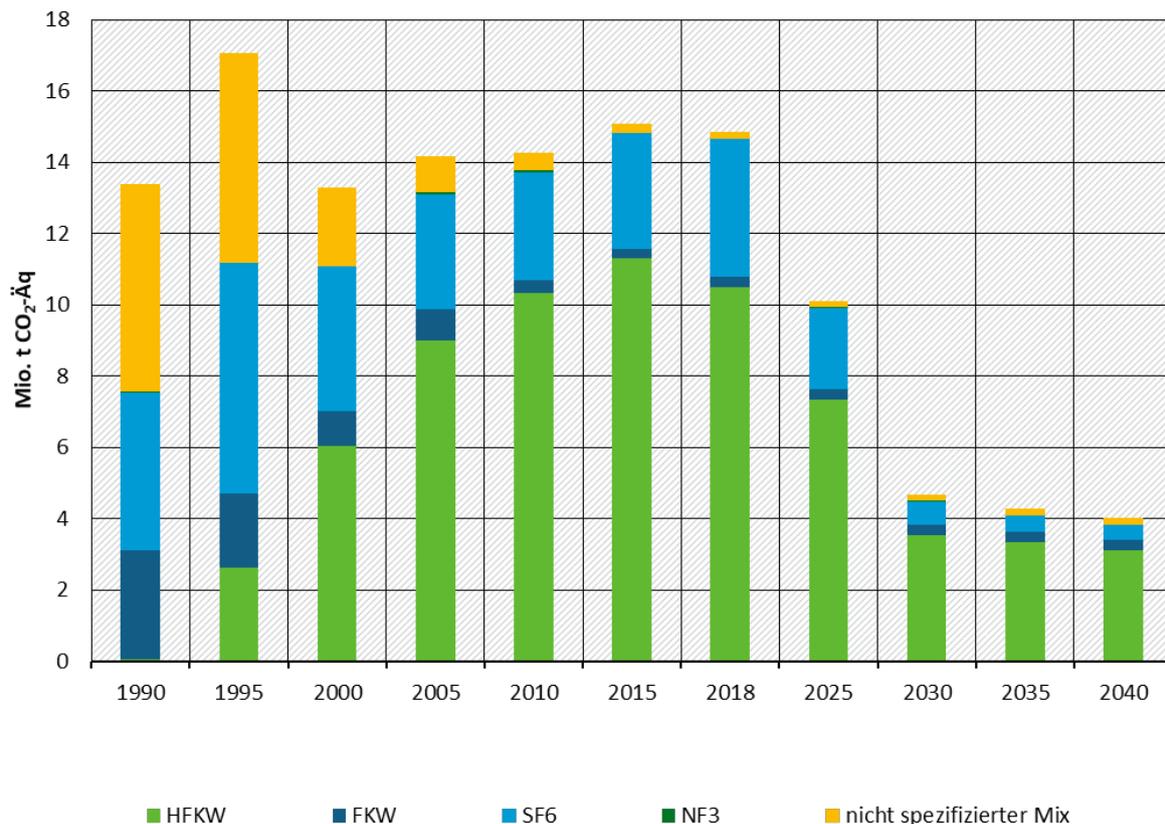
<sup>60</sup> Schaumproduktion ist [...] neben Feuerlöschanlagen, medizinische Inhalationssprays und anderen Aerosolen bei den ‚sonstigen ODS-Ersatzstoffen‘ erfasst.

Richtlinie und EU HFKW-Phase-down stark sinkende HFKW-Emissionen aus Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie das Auslaufen der SF<sub>6</sub>-Emissionen aus in der Vergangenheit verbauten Schallschutzfenstern, deren Neuinstallation seit 2008 verboten ist. Die Instrumente des KIS-2030 spielen dabei nur in der Minderung der Emissionen nach 2030 eine nennenswerte Rolle.

**Tabelle 66: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen (fluorierte Treibhausgase) im KIS-2030, 1990-2040 nach Quellgruppen**

Quellgruppe und Gase		1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
		Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Chemische Industrie	HFKW, FKW und SF <sub>6</sub> aus fluorchemischer Produktion	5,7	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Metallindustrie	FKW aus Primär-Aluminium-Produktion, Einsatz von HFKW und SF <sub>6</sub> in Aluminium- und Magnesium-Gießereien	3,1	1,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Elektronikindustrie	FKW, SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub> und HFKW aus Halbleiter- und Photovoltaikproduktion	0,3	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Kälte- und Klimaanlageanlagen	HFKW und geringe Mengen FKW aus stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlageanlagen, inklusive Wärmepumpen	-	7,1	9,2	6,6	2,8	2,7	2,5
Sonstige ODS-Ersatzstoffe	HFKW aus Schaumherstellung, Feuerlöschern, Aerosolen und medizinischen Dosiersprays	-	2,0	1,3	0,7	0,6	0,6	0,6
Andere Industrieprozesse und Produktverwendung	SF <sub>6</sub> , HFKW und FKW aus Schallschutzfenstern, Teilchenbeschleunigern, Produktion optischer Glasfasern, Spürgas, Reifenbefüllung, Radaranlagen, ORC-Anlagen, Schweißen, Sportschuhen, Lösemittelanwendungen und sonstigen medizinischen und kosmetischen Anwendungen	4,3	2,6	3,9	2,4	0,8	0,6	0,5
<b>Summe fluorierte Treibhausgase</b>		<b>13,4</b>	<b>14,2</b>	<b>14,8</b>	<b>10,1</b>	<b>4,7</b>	<b>4,3</b>	<b>4,0</b>

Quelle: 1990 - 2018: (UBA 2020c); 2025 - 2040: Modellrechnungen Öko-Institut

**Abbildung 48: Entwicklung der Emissionen von F-Gasen nach Gasgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

Quelle: 1990-2018: (UBA 2020c); 2025 - 2040: Modellrechnungen Öko-Institut

Bezogen auf die verschiedenen Gase bzw. Gasgruppen der F-Gase war „die Zeit zwischen 1990 und 2017 [...] von einer starken Zunahme der HFKW-Verwendung und HFKW-Emissionen bei gleichzeitigem Rückgang der Emissionen and FKW und SF<sub>6</sub> geprägt. Die in den 1990er Jahren in relevanten Mengen ausgewiesenen Emissionen des ‚nicht spezifizierten Mixes‘ waren laut UBA (2018a) im Wesentlichen HFKW-Emissionen aus der fluorchemischen Industrie, die aus Vertraulichkeitsgründen nicht auf die einzelnen HFKW aufgeschlüsselt werden. [...] NF<sub>3</sub>-Emissionen spielen im Vergleich zu den anderen fluorierten Treibhausgasen quantitativ keine Rolle“ (Öko-Institut et al. 2021).

Bis 2040 sind im KIS-2030 genau wie im MMS vor allem für HFKW und SF<sub>6</sub> deutliche Emissionsreduktionen zu erwarten. Die HFKW-Emissionen machen seit Anfang der 2000er Jahre den Großteil an den Gesamtemissionen aus, 2018 lag der Anteil bei 71 %, im Jahr 2040 liegt ihr Anteil im KIS-2030 (wie auch im MMS) bei 77 %.

Haupttreiber für die zukünftige Entwicklung der F-Gas-Emissionen in Deutschland sind im KIS-2030 wie auch schon im MMS zum einen die EU-weite Mengenbeschränkung im Einsatz von HFKW und zum anderen die fortlaufende Wirkung des ebenfalls EU-weiten Verbotes, SF<sub>6</sub> in Schallschutzfenstern einzusetzen.

**Tabelle 67: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluorierte Treibhausgase) aus Industrieprozessen und Produktverwendung im KIS-2030 zwischen 1990 und 2040 nach Gasgruppen**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
HFKW	0,1	9,0	10,5	7,4	3,5	3,3	3,1
FKW	3,1	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
SF <sub>6</sub>	4,4	3,3	3,9	2,3	0,7	0,4	0,4
NF <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nicht spezifizierter Mix	5,8	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Summe F-Gase</b>	<b>13,4</b>	<b>14,2</b>	<b>14,8</b>	<b>10,1</b>	<b>4,3</b>	<b>4,0</b>	<b>4,2</b>
Veränderung ab 1990 in %							
Summe F-Gase		5,7	10,8	-24,5	-65,0	-68,1	-70,0
Veränderung ab 2005 in %							
Summe F-Gase			4,8	-28,6	-66,9	-69,8	-71,7

Quelle: 1990 - 2018: (UBA 2020c), (UBA 2018b)(UBA 2018a)(UBA 2018a)(UBA 2018a)(UBA 2018a)(UBA 2018a)(UBA 2018a)(UBA 2018b)(UBA 2018b)(UBA 2018b)(UBA 2018b)(UBA 2018b)(UBA 2018b)(UBA 2018a)(UBA 2018b)(UBA 2018b)(UBA 2018b)(UBA 2018b), (UBA 2018a); 2025 - 2040: Modellrechnungen Öko-Institut

### 7.5.3.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Für F-Gase wurde keine BEHG-Sensitivität des KIS-2030 berechnet.

### 7.5.3.3 MMS

Die Entwicklung der Emissionen an fluorierten Treibhausgasen im MMS wird in Tabelle 68 in der Differenzierung nach Quellgruppen und in Tabelle 69 in der Differenzierung nach fluorierten Gasen bzw. Gasgruppen gezeigt. Für eine Interpretation der Trends wird auf Abschnitt 7.5.3.1 zum MMS verwiesen.

**Tabelle 68: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluorierte Treibhausgase) im MMS zwischen 1990 und 2040 nach Quellgruppen**

Quellgruppe und Gase		1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq								
Chemische Industrie	HFKW, FKW und SF <sub>6</sub> aus fluorchemischer Produktion	5,7	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Metallindustrie	FKW aus Primär-Aluminium-Produktion, Einsatz von HFKW und SF <sub>6</sub> in Aluminium- und Magnesium-Gießereien	3,1	1,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
Elektronikindustrie	FKW, SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub> und HFKW aus Halbleiter- und Photovoltaikproduktion	0,3	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Quellgruppe und Gase		1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Kälte- und Klimaanlage	HFKW und geringe Mengen FKW aus stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlage, inklusive Wärmepumpen	-	7,1	9,2	6,6	2,8	2,7	2,6
Sonstige ODS-Ersatzstoffe	HFKW aus Schaumherstellung, Feuerlöschern, Aerosolen und medizinischen Dosiersprays	-	2,0	1,3	0,7	0,6	0,6	0,6
Andere Industrieprozesse und Produktverwendung	SF <sub>6</sub> , HFKW und FKW aus Schallschutzfenstern, Teilchenbeschleunigern, Produktion optischer Glasfasern, Spürgas, Reifenbefüllung, Radaranlagen, ORC-Anlagen, Schweißen, Sportschuhen, Lösemittelanwendungen und sonstigen medizinischen und kosmetischen Anwendungen	4,3	2,6	3,9	2,4	0,8	0,6	0,6
<b>Summe fluoridierte Treibhausgase</b>		<b>13,4</b>	<b>14,2</b>	<b>14,8</b>	<b>10,1</b>	<b>4,7</b>	<b>4,4</b>	<b>4,2</b>

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

**Tabelle 69: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluoridierte Treibhausgase) aus Industrieprozessen und Produktverwendung im MMS zwischen 1990 und 2040 nach Gasgruppen**

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

Quelle: (Öko-Institut, et al. 2021)

#### 7.5.3.4 Vergleich der Szenarien

Tabelle 70 zeigt zusammenfassend die Entwicklung der F-Gas-Emissionen von 1990 bis 2040 im Vergleich der Szenarien. Die Emissionsverläufe im KIS-2030 und MMS sind sehr ähnlich. Für 2030 liegt das KIS-2030 um gerundet 0,02 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq unter dem MMS (-1 %). Bis 2040 liegt das KIS-2030 um 0,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq unter dem MMS (-5 %).

**Tabelle 70: Entwicklung der Emissionen an fluoridierte Treibhausgasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>F-Gas-Emissionen (HFKW, FKW, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub> und nicht spezifizierter Mix)</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	13,4	14,2	14,8				
MMS				10,1	4,7	4,4	4,2
KIS-2030				10,1	4,7	4,3	4,0

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021), Modellrechnungen Öko-Institut

## 7.6 Gesamtergebnisse Industrie

### 7.6.1 KIS-2030

Im Folgenden werden die gesamten Emissionen des Industriesektors betrachtet, d.h. die Summe der verbrennungs- und prozessbedingten Emissionen und der Emissionen aus der Produktnutzung.

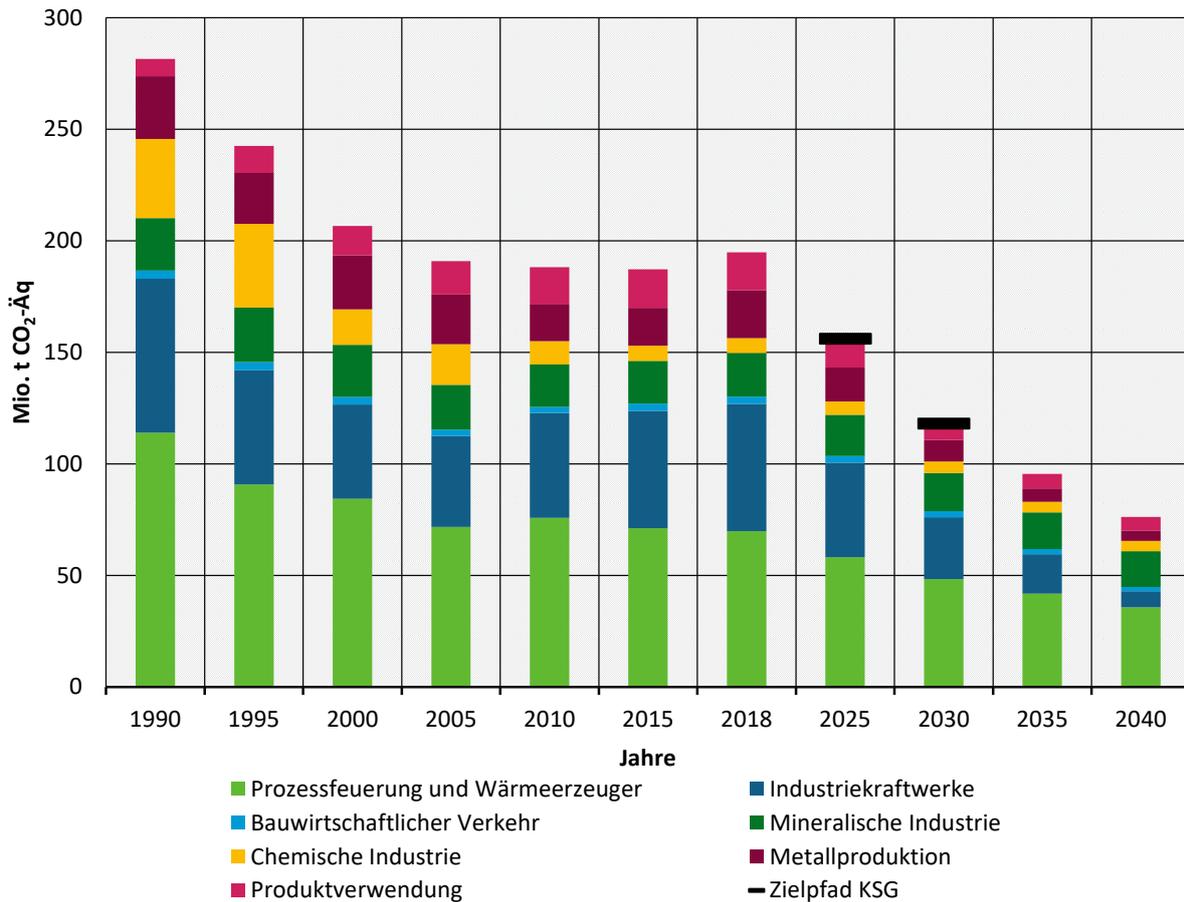
Nachdem die Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie zwischen 1990 und 2018 bereits um rund 31 % auf 194,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq abnahmen, reduzieren sie sich im KIS-2030 bis 2030 um weitere 40 % auf 117,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (Tabelle 71). Damit wird das Sektorziel 2030 des KSG 2021 von 118 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq eingehalten (Tabelle 71 und Abbildung 49). Ebenso wird es für das Jahr 2025 eingehalten, in dem die Emissionen bei 155,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq liegen, während das Sektorziel 157 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq verlangt.

Zwischen 2018 und 2030 ergeben sich im KIS-2030 Emissionsreduktionen in allen Quellgruppen. Die größten absoluten Reduktionen treten bei den Industriekraftwerken (-29,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) und bei den Wärmeerzeugern und Prozessfeuerungen (-21,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) auf. Die Emissionen der Metallproduktion, der Anwendung von fluoridierten Gasen als Kältemittel und der sonstigen Produktherstellung und -verwendung reduzieren sich im KIS-2030 zwischen 2018 und 2030 jeweils um mehr als die Hälfte.

Insgesamt zeigt sich, dass die Nutzung neuer Produktionsverfahren maßgeblichen Einfluss auf das KIS-2030 hat. Diese werden hier unter der Bezeichnung „CO<sub>2</sub>-arme und -freie Technologien“ zusammengefasst. Darunter fallen die Direktreduktion von Roheisen, die wasserstoffbasierte Herstellung von Grundstoffchemikalien, CCU und CCS sowie hybride Elektrifizierung von Industrieöfen und Dampferzeugung. Während ein starkes Instrumentenbündel diese Technologien direkt fördert, so hat auch der EU-Emissionshandel eine hohe Wirkung, indem die konventionellen CO<sub>2</sub>-intensiven Verfahren verteuert werden und die CO<sub>2</sub>-armen Techniken damit wirtschaftlicher werden.

Wenngleich mit dem KIS-2030 das Sektorziel der Industrie erreicht wird, so ist zu berücksichtigen, dass diese Entwicklung großen Unsicherheiten unterliegt. Diese reichen von den Energiepreisen über die konkrete Instrumentenausgestaltung bis hin zur zukünftigen Entwicklung von Industrieproduktion und -struktur. Dennoch zeigt das Szenario einen möglichen Weg, auf dem das Sektorziel erreicht werden kann.

**Abbildung 49: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**



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

**Tabelle 71: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen	69,9	60,4	61,0	61,1	61,0	58,1	55,2	53,0	51,3	49,8	48,3	41,8	35,7
Industriekraftwerke	57,0	49,8	48,6	47,2	45,7	42,5	39,1	36,1	32,8	30,0	27,8	17,8	7,1
Bauwirtschaftlicher Verkehr	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7	2,6	2,3	2,0
Mineralische Industrie	19,6	18,4	18,5	18,5	18,4	18,5	18,1	17,8	17,6	17,3	17,1	16,5	16,0
Chemische Industrie	6,7	5,8	5,8	5,9	6,0	6,0	5,9	5,7	5,6	5,4	5,3	4,7	4,6
Metallproduktion	21,5	16,2	16,3	16,3	16,2	15,2	14,1	13,0	11,8	10,7	9,7	6,1	4,6
Verwendung von nichtenergetischen	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,8

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln													
Elektronik-Industrie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anwendung als ODS-Ersatzstoff	10,4	9,1	8,7	8,2	7,8	7,3	6,5	5,8	5,0	4,2	3,5	3,3	3,1
Sonstige Produktherstellung und -Verwendung	4,2	4,0	3,7	3,3	3,0	2,7	2,4	2,1	1,8	1,4	1,1	0,9	0,9
Andere Bereiche	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Gesamt</b>	<b>194,9</b>	<b>169,2</b>	<b>168,1</b>	<b>166,1</b>	<b>163,5</b>	<b>155,7</b>	<b>146,7</b>	<b>138,7</b>	<b>131,0</b>	<b>123,9</b>	<b>117,7</b>	<b>95,5</b>	<b>76,2</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		182	177	172	165	157	149	140	132	125	118		
Abweichung vom Sektorziel		-12,8	-8,9	-5,9	-1,5	-1,3	-2,3	-1,3	-1,0	-1,1	-0,3		

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

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

## 7.6.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) sind die Emissionen aufgrund niedrigerer Energiepreise höher als im KIS-2030. Wie in Tabelle 72 zu sehen ist, sind im Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen der Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen mit 48,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um 0,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq höher als im KIS-2030.

Die gesamten Emissionen des Sektors sind im Jahr 2030 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) um 0,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq höher als im KIS-2030; dadurch wird das Sektorziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes um 0,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq überschritten.

**Tabelle 72: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen	69,9	60,1	60,8	60,9	60,9	58,2	55,5	53,5	51,8	50,3	48,9	42,3	36,0
Industriekraftwerke	57,0	49,8	48,6	47,2	45,7	42,5	39,1	36,1	32,8	30,0	27,8	18,0	7,1
Bauwirtschaftlicher Verkehr	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7	2,6	2,3	2,0
Mineralische Industrie	19,6	18,4	18,5	18,5	18,4	18,5	18,1	17,8	17,6	17,3	17,1	16,5	16,0
Chemische Industrie	6,7	5,8	5,8	5,9	6,0	6,0	5,9	5,7	5,6	5,4	5,3	4,7	4,6
Metallproduktion	21,5	16,2	16,2	16,3	16,2	15,2	14,1	13,0	11,8	10,7	9,6	6,1	4,6

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9
Elektronik-Industrie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anwendung als ODS-Ersatzstoff	10,4	9,1	8,7	8,2	7,8	7,3	6,5	5,8	5,0	4,2	3,5	3,3	3,1
Sonstige Produktherstellung und -Verwendung	4,2	4,0	3,7	3,3	3,0	2,7	2,4	2,1	1,8	1,4	1,1	0,9	0,9
Andere Bereiche	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Gesamt</b>	<b>194,9</b>	<b>168,9</b>	<b>167,8</b>	<b>165,9</b>	<b>163,5</b>	<b>155,7</b>	<b>147,0</b>	<b>139,2</b>	<b>131,5</b>	<b>124,4</b>	<b>118,4</b>	<b>96,2</b>	<b>76,5</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		182	177	172	165	157	149	140	132	125	118		
Abweichung vom Sektorziel		-13,1	-9,2	-6,1	-1,5	-1,3	-2,0	-0,8	-0,5	-0,6	0,4		

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

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

### 7.6.3 MMS

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie im MMS ist in Tabelle 73 dargestellt. Im Vergleich zum KIS-2030 kommt es bei den Wärmeerzeugern und Prozessfeuerungen und bei den Industriekraftwerken zu einer weniger ausgeprägten Emissionsreduktion. In der ersten Quellgruppe beträgt diese Reduktion zwischen 2018 und 2030 -8,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, in der zweiten Quellgruppe -13,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Das Sektorziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes von 118 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq wird im MMS deutlich verfehlt.

**Tabelle 73: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen	69,9	62,9	65,1	66,2	66,7	67,0	65,8	64,6	63,5	62,3	61,2	56,3	52,7
Industriekraftwerke	57,0	49,8	50,3	50,5	50,4	49,4	47,8	46,5	45,3	44,2	43,1	39,0	40,2
Bauwirtschaftlicher Verkehr	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7	2,6	2,3	2,0
Mineralische Industrie	19,6	18,7	19,0	19,2	19,3	19,4	19,2	19,1	19,0	18,8	18,7	18,1	17,9
Chemische Industrie	6,7	5,8	5,9	5,9	6,0	6,1	6,1	6,0	6,0	6,0	5,9	5,9	6,0
Metallproduktion	21,5	16,4	16,6	16,9	17,2	17,4	17,1	16,9	16,6	16,3	16,1	15,0	14,2

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0
Elektronik-Industrie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anwendung als ODS-Ersatzstoff	10,4	9,1	8,7	8,2	7,8	7,3	6,5	5,8	5,0	4,2	3,5	3,3	3,2
Sonstige Produktherstellung und -Verwendung	4,2	4,0	3,7	3,4	3,0	2,7	2,4	2,1	1,8	1,5	1,1	0,9	0,9
Andere Bereiche	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Gesamt</b>	<b>194,9</b>	<b>172,2</b>	<b>174,6</b>	<b>175,7</b>	<b>176,0</b>	<b>174,8</b>	<b>170,4</b>	<b>166,2</b>	<b>162,2</b>	<b>158,4</b>	<b>154,6</b>	<b>143,2</b>	<b>139,4</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		182	177	172	165	157	149	140	132	125	118		
Abweichung vom Sektorziel		-9,8	-2,4	3,7	11,0	17,8	21,4	26,2	30,2	33,4	36,6		

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021)

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

#### 7.6.4 Vergleich der Szenarien

Tabelle 74 zeigt die Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie im Vergleich der Szenarien. Die größten Unterschiede treten bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen auf: Die Emissionen im Jahr 2030 sind im KIS-2030 um 36,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (25 %) geringer als im MMS.

Bei den Emissionen der restlichen Treibhausgase bestehen geringe Unterschiede zwischen den Szenarien. Insgesamt wird im MMS im Jahr 2030 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um -45,1 % gegenüber 1990 erreicht; im KIS-2030 beträgt diese Reduktion -58,2 %.

**Tabelle 74: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	244,8	166,6	177,3				
MMS				162,3	147,8	136,9	133,3
KIS-2030				143,4	111,2	89,6	70,8
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				143,4	111,8	90,4	71,1
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,6	0,8	0,8				
MMS				0,8	0,8	0,7	0,8

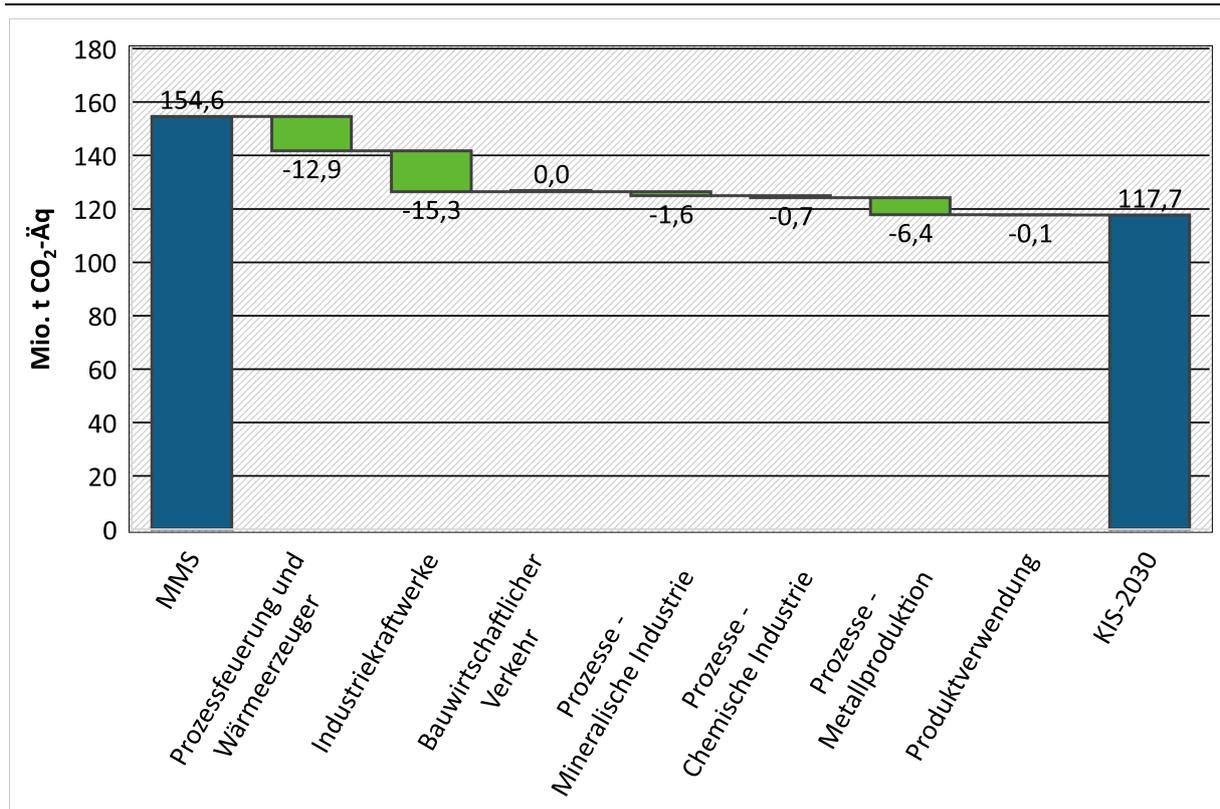
	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
KIS-2030				0,8	0,7	0,6	0,6
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,8	0,7	0,6	0,6
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	22,7	9,3	2,0				
MMS				1,6	1,3	1,2	1,1
KIS-2030				1,5	1,1	0,9	0,8
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				1,5	1,1	0,9	0,8
<b>HFKW-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,1	9,0	10,5				
MMS				7,4	3,5	3,4	3,2
KIS-2030				7,4	3,5	3,3	3,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				7,4	3,5	3,3	3,1
<b>FKW-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	3,1	0,9	0,3				
MMS				0,3	0,3	0,3	0,3
KIS-2030				0,3	0,3	0,3	0,3
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,3	0,3	0,3	0,3
<b>SF<sub>6</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	4,4	3,3	3,9				
MMS				2,3	0,7	0,5	0,5
KIS-2030				2,3	0,7	0,4	0,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				2,3	0,7	0,4	0,4
<b>NF<sub>3</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,0	0,0	0,0				
MMS				0,0	0,0	0,0	0,0
KIS-2030				0,0	0,0	0,0	0,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Nicht spezifizierter Mix</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	5,8	1,0	0,2				
MMS				0,2	0,2	0,2	0,2
KIS-2030				0,2	0,2	0,2	0,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,2	0,2	0,2	0,2

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	281,5	191,0	194,9				
MMS				174,8	154,6	143,2	139,4
KIS-2030				155,7	117,7	95,5	76,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				155,7	118,4	96,2	76,5
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 1990 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018		-32,2	-30,8				
MMS				-37,9	-45,1	-49,1	-50,5
KIS-2030				-44,7	-58,2	-66,1	-72,9
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-44,7	-58,0	-65,8	-72,8
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 2005 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018			2,1				
MMS				-8,5	-19,0	-25,0	-27,0
KIS-2030				-18,4	-38,3	-50,0	-60,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-18,4	-38,0	-49,6	-60,0

Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021), Modellrechnungen Öko-Institut

Die wichtigsten Treiber für die Abnahme der Treibhausgasemissionen im KIS-2030 im Vergleich zum MMS sind in Abbildung 50 dargestellt. Im Jahr 2030 reduzieren sich die Treibhausgasemissionen der Prozessfeuerungen um 12,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, die Emissionen der Industriekraftwerke um 15,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und die Emissionen der Metallproduktion um 6,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq gegenüber dem MMS.

**Abbildung 50: Veränderung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2030**

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

Wie in Tabelle 74 zu sehen ist, wird im KIS-2030 das Sektorziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 von 118 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 eingehalten, während es im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) knapp und im MMS deutlich verfehlt wird. Tabelle 75 zeigt die kumulierte Zielabweichung des Sektors Industrie über den Zeitraum 2020 bis 2030.

**Tabelle 75: Kumulierte Zielabweichung (2020-2030) im Sektor Industrie**

Sektor	KIS-2030	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	MMS
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq		
Industrie	-50,5	-48,9	154,0

Anmerkung: Negativer Wert: Die kumulierten Emissionen 2020-2030 sind geringer als die Summe der Jahresemissionsmengen für 2020-2030 gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021. Positiver Wert: Die kumulierten Emissionen in diesem Zeitraum sind höher als die Summe dieser Jahresemissionsmengen.

Anmerkung: Die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 wurden nicht modelliert, sondern dem deutschen Treibhausgasinventar, Stand 14.1.2022, entnommen.

Quelle: (UBA 2022) für Treibhausgasemissionen im Jahr 2020, (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut für KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität).

Es ist zu sehen, dass im KIS-2030 sowie im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) die Gesamtemissionen im Zeitraum 2020-2030 geringer als die Summe der Jahresemissionsmengen gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 sind. Insbesondere in den Jahren 2020 bis 2023 liegen die Emissionen des Industriesektors deutlich unter den entsprechenden Jahresemissionsmengen (Tabelle 71 und

Tabelle 72). In späteren Jahren unterschreiten die Emissionen hingegen die Jahresemissionsmengen nur knapp (im Jahr 2030 beträgt z. B. die Unterschreitung im KIS-2030 nur 0,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, siehe Tabelle 71). Im Gegensatz zum KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) wird im MMS die Summe der Jahresemissionsmengen für 2020-2030 gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 deutlich überschritten.

## 8 Gebäude

Der KSG-Sektor Gebäude umfasst die CRF-Quellgruppen 1.A.4.a Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, 1.A.4.b Private Haushalte und 1.A.5 Andere Bereiche (Militär), siehe Abschnitt 3.2 und insbesondere dortige Tabelle 7. Die Modellierung des Gebäudesektors erfolgt in einer anderen Struktur, und zwar in folgenden drei Teilsektoren:

- ▶ Wärmebedarf im Gebäudebereich (Abschnitt 8.3).
- ▶ Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung (Abschnitt 8.4).
- ▶ Geräte und Prozesse im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (Abschnitt 8.5).

Die Bilanzierung der resultierenden Verbräuche erfolgt dann entsprechend der sektoralen Zuordnung im KSG, so dass beispielsweise aus der Modellierung resultierenden Stromverbräuche und Fernwärme im Umwandlungssektor bilanziert werden.

### 8.1 Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick

Nachfolgend sind die Treibhausgasreduzierungen bzw. strombedingte Minderungswirkungen der bewerteten Instrumente und Instrumentenbündel für die oben genannten Teilsektoren dargestellt. Genauere Beschreibungen können den nachfolgenden Abschnitten entnommen werden.

#### Wärmebedarf im Gebäudebereich

**Tabelle 76: Treibhausgasreduzierungsbeitrag der Instrumente des KIS-2030 im Sektor Gebäude über das MMS hinaus (Raumwärme und Warmwasser), 2021-2030**

Szenario/Instrument	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq										
<b>MMS (nur Raumwärme und Warmwasser)</b>	<b>108,4</b>	<b>106,9</b>	<b>105,1</b>	<b>103,0</b>	<b>100,8</b>	<b>98,1</b>	<b>95,0</b>	<b>91,7</b>	<b>88,0</b>	<b>84,1</b>
BEHG (Preispfad KIS-2030)	0	0	-0,2	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-0,9	-1,1	-1,2
Bundesförderung effiziente Gebäude - Weiterentwicklung	0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4
Förderung - 1 Mio. Wärmepumpenprogramm	0	-0,5	-1,1	-2,0	-3,1	-4,4	-4,9	-4,9	-4,9	-4,9
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG) - Schärfung Neubau und Bestandsanforderungen	0	-0,1	-0,1	-0,9	-1,4	-1,8	-2,3	-2,5	-2,7	-2,8
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG) - Öl- und Gaskesselverbot	0	0	-0,1	-0,2	-1,3	-2,3	-3,3	-4,3	-5,2	-6,2
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG) - MEPS	0	0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,4	-1,7	-3,0	-3,8
<b>KIS-2030</b>	<b>108,3</b>	<b>106,2</b>	<b>103,4</b>	<b>99,3</b>	<b>94,1</b>	<b>88,3</b>	<b>83,1</b>	<b>77,1</b>	<b>70,9</b>	<b>64,8</b>

Quelle: eigene Berechnungen, des Öko-Instituts

Zu den Allokationsgrundsätzen, nach denen die Einsparwirkung einer Sanierungsmaßnahme auf die verschiedenen Instrumente, die die Maßnahme im Zusammenspiel gemeinsam ausgelöst haben, aufgeteilt wird, siehe Abschnitt 8.3.4.1.4.

### Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung

**Tabelle 77: Strombedingte Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 für einzelne Jahre bis 2030 für Haushaltsgeräte**

Szenario/Instrument	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
TWh										
<b>MMS</b>	<b>95,5</b>	<b>98,1</b>	<b>97,6</b>	<b>96,1</b>	<b>97,0</b>	<b>96,3</b>	<b>96,0</b>	<b>95,4</b>	<b>95,3</b>	<b>94,8</b>
Reform der Energie- und CO <sub>2</sub> -Besteuerung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Verschärfte MEPS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-1,0	-1,3	-1,6
<b>KIS-2030</b>	<b>98,5</b>	<b>98,1</b>	<b>97,6</b>	<b>97,1</b>	<b>97,1</b>	<b>96,1</b>	<b>95,5</b>	<b>94,6</b>	<b>94,1</b>	<b>93,3</b>

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Stromeinsparungen durch Haushaltsgeräte werden emissionsseitig in der Energiewirtschaft (öffentliche Kraftwerke) und der Industrie (Industriekraftwerke) wirksam und deshalb nicht im Gebäudesektor ausgewiesen.

**Tabelle 78: Emissionsminderungswirkung des Umstieges von Erd- auf Biogas im KIS-2030 für einzelne Jahre bis 2030 für Haushaltsgeräte**

Szenario/Instrument	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq										
<b>MMS</b>	<b>0,75</b>	<b>0,72</b>	<b>0,68</b>	<b>0,64</b>	<b>0,61</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>
Wechsel Erd- zu Biogas	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,05	-0,10	-0,21	-0,31	-0,41	-0,51
<b>KIS-2030</b>	<b>0,75</b>	<b>0,72</b>	<b>0,68</b>	<b>0,64</b>	<b>0,56</b>	<b>0,50</b>	<b>0,40</b>	<b>0,29</b>	<b>0,19</b>	<b>0,09</b>

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

## Geräte und Prozesse im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

**Tabelle 79: Wirkung der Instrumente im Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) im KIS-2030 – Emissionsminderung in den Jahren 2021-2030**

Szenario/Instrument	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Mio t. CO <sub>2</sub> -Äq										
<b>MMS</b>	5,5	5,5	5,4	5,3	5,3	5,2	5,1	5,0	5,0	4,9
Instrumentenbündel "Energieeffizienz"	-0,1	-0,2	-0,6	-1,0	-1,4	-1,6	-2,0	-2,3	-2,6	-2,9
<b>KIS-2030</b>	5,4	5,2	4,8	4,4	3,9	4,5	3,2	2,8	2,4	2,0

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Die gesamten Stromeinsparungen im KIS-2030 gegenüber dem MMS belaufen sich im Jahr 2030 in der Netto-Messung auf weniger als 1 TWh und werden daher hier nicht gesondert ausgewiesen.

## 8.2 Übergreifende Rahmendaten

### 8.2.1 Anzahl privater Haushalte

Die Anzahl der privaten Haushalte wird auf Basis von Annahmen zur Entwicklung der Haushaltsgröße (Anzahl der Personen pro Haushalt) und aus den verwendeten Rahmendaten zur Bevölkerungsentwicklung berechnet (siehe Öko-Institut et al. (2021)). Diese Annahmen sind identisch zu den Annahmen im MMS und in Tabelle 80 dargestellt.

**Tabelle 80: Vergleich der Anzahl privater Haushalte verschiedener Quellen**

	Quelle	2020	2025	2030	2035	2040
Bevölkerung (Mio.)	(Öko-Institut et al. 2021)	83,2	83,6	83,8	83,8	83,5
Haushaltsgröße	Basierend auf nationalen Prognosen (StBA 2017)	1,97	1,95	1,93	1,90	1,87
Anzahl Haushalte (Mio.)	Eigene Berechnung	42,2	42,9	43,4	44,1	44,6

Quelle: (EC 2020; StBA 2017), (Öko-Institut et al. 2021)

### 8.2.2 Wohnfläche und Entwicklung der Nutzfläche in Nichtwohngebäuden

Die Annahmen zur Wohnfläche und Entwicklung der Nutzfläche in Nichtwohngebäuden sind identisch zu den Annahmen im MMS. Tabelle 81 „zeigt die Bevölkerungsentwicklung sowie die Veränderung der absoluten und relativen spezifischen Wohnfläche. Seit 2002 ist die Wohnfläche pro Kopf von 41,4 m<sup>2</sup> auf 46,7 m<sup>2</sup> pro Person im Jahr 2018 angestiegen (Destatis 2019). Nach den jetzigen Prognosen wird die Pro-Kopf-Wohnfläche zumindest bis 2030 weiter zunehmen. Bis zum Jahr 2030 entspricht die Entwicklung in Abbildung 91 der Wohnungsmarktprognose des BBSR

(BBSR 2015). Ab 2030 wird angenommen, dass zwar die spezifische Wohnfläche steigt, sich allerdings die Entwicklung verlangsamt. Weiterhin wird angenommen, dass die spezifische Wohnfläche bis 2050 ausgehend von 2018 um 7 Quadratmeter auf insgesamt 52 Quadratmeter pro Kopf steigt. Die Nutzfläche in Nichtwohngebäuden ist an die Wohnfläche gekoppelt und folgt deshalb dem relativen Zuwachs der spezifischen Wohnfläche" (Öko-Institut et al. 2021).

**Tabelle 81: 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 <sup>2</sup> /Einwohner*in]	45	45,6	47,2	48,5	50	51	51,5	52
Relativer Zuwachs der spezifischen Wohnfläche		1,33 %	3,51 %	2,75 %	3,09 %	2,00 %	0,98 %	0,97 %

Quelle: (Destatis 2019; BBSR 2015), (Öko-Institut et al. 2021)

## 8.3 Wärmebedarf im Gebäudebereich

### 8.3.1 Methodik

Die verwendete Methodik zur Berechnung des Bilanzraums Raumwärme und Warmwasser entspricht der des Projektionsberichts 2021 (Öko-Institut et al. 2021). Gleiches gilt für die Methodik zur Abschätzung der Minderungswirkung für die einzelnen Instrumente (Einzelinstrumentenbewertung).

### 8.3.2 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

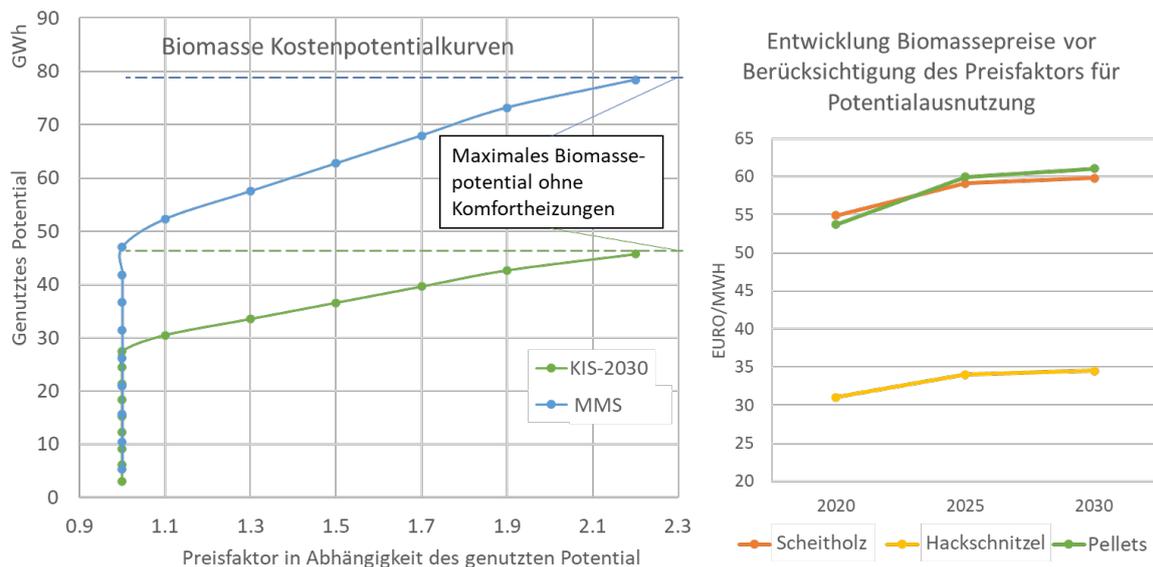
Allgemeine Annahmen und weitere Parameter entsprechen denen des Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021).

Im Vergleich zum Projektionsbericht 2021 wird für KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) das verfügbare Potenzial fester Biomasse für den Gebäudesektor reduziert. Für den Vergleich des MMS mit KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) müssen relevante Annahmen berücksichtigt werden. Erstens werden bei der Modellierung Zusatzheizsysteme, die als Einzelraumfeuerungen hauptsächlich für die Komfortheizung verwendet werden (Kaminöfen), nicht implizit modelliert. Im Projektionsbericht 2021 wird davon ausgegangen, dass der Biomasseverbrauch in Öfen, die nicht als primäres Heizsystem genutzt werden, bis 2050 konstant bleibt. Da im KIS-2030 und im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) ein geringeres Biomassepotenzial für den Gebäudesektor zur Verfügung steht, welches deutlich unter der derzeitigen Nutzung liegt, wird angenommen, dass eine gewisse Steuerung vorhanden ist, durch die Biomasse möglichst effizient innerhalb des Gebäudesektors eingesetzt wird und der Einsatz in Komfortheizungen zurückgeht. Im Projektionsbericht 2021 wird die derzeitige Nutzung von Biomasse-Komfortheizungen von 45 TWh konstant gehalten. Im KIS-2030 und im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) wird hingegen ein Rückgang auf 30 TWh bis 2030 und 25 TWh bis 2040 angenommen.

Das restliche Biomassepotenzial kann für Zentralheizungskessel wie bspw. Pelletkessel eingesetzt werden, deren Zu- und Rückbau in Modell Invert/ee-lab modelliert wird. Für dieses Potenzial sind im Modell Kostenpotenzialkurven hinterlegt. Abbildung 51 vergleicht die zugrundelie-

genden Kosten-Potenzial-Kurven in beiden Szenarien (links) und zeigt die angenommene Entwicklung der Biomassepreise (rechts). Innerhalb des Simulationszeitraums werden die Biomassepreise in Abhängigkeit vom genutzten Potenzial in jedem Jahr endogen angepasst. Das heißt, der festgelegte Preis wird mit dem auf der x-Achse dargestellten Biomassepreisfaktor multipliziert, wenn das jeweilige Potenzial überschritten wird. Das maximale Biomaspotenzial für 2030 im Projektionsbericht 2021 beträgt 78 TWh (mit Komfortheizung 123 TWh). Im KIS-2030 und im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) beträgt das Biomaspotential 46 TWh (mit Komfortheizungen 76 TWh) im Jahr 2030.

**Abbildung 51: Kostenpotenzialkurven von Biomasse in MMS und KIS-2030**



Quelle: eigene Darstellung, IREES

### 8.3.3 Instrumente und deren Parametrisierung

#### 8.3.3.1 KIS-2030

##### 8.3.3.1.1 Langfristige Garantie über staatliche Förderung

Seit Januar 2020 ist die Inanspruchnahme von Förderprogrammen im Gebäudebereich stark gestiegen. Die Antragstellungen für Heizungs austausche haben sich verdreifacht, die für Sanierungsmaßnahmen mehr als verdoppelt. Aufgrund der Bedeutung der Förderprogramme zur Erreichung der Klimaschutzziele sollte es deshalb eine langfristige Garantie über staatliche Förderung geben. Durch die Garantie einer staatlichen Förderung wird die Planungssicherheit für Investoren\*Investorinnen erhöht.

##### 8.3.3.1.2 Sofortprogramm für den Gebäudesektor

2020 wurde die im KSG festgelegte Jahresemissionsmenge für den Gebäudesektor leicht überschritten, weshalb im September 2021 ein Sofortprogramm beschlossen wurde. Im Zuge dessen wurden ab 2021 die Fördervolumina der BEG erhöht, um zusätzliche Förderanträge zu ermöglichen.

#### Parametrisierung

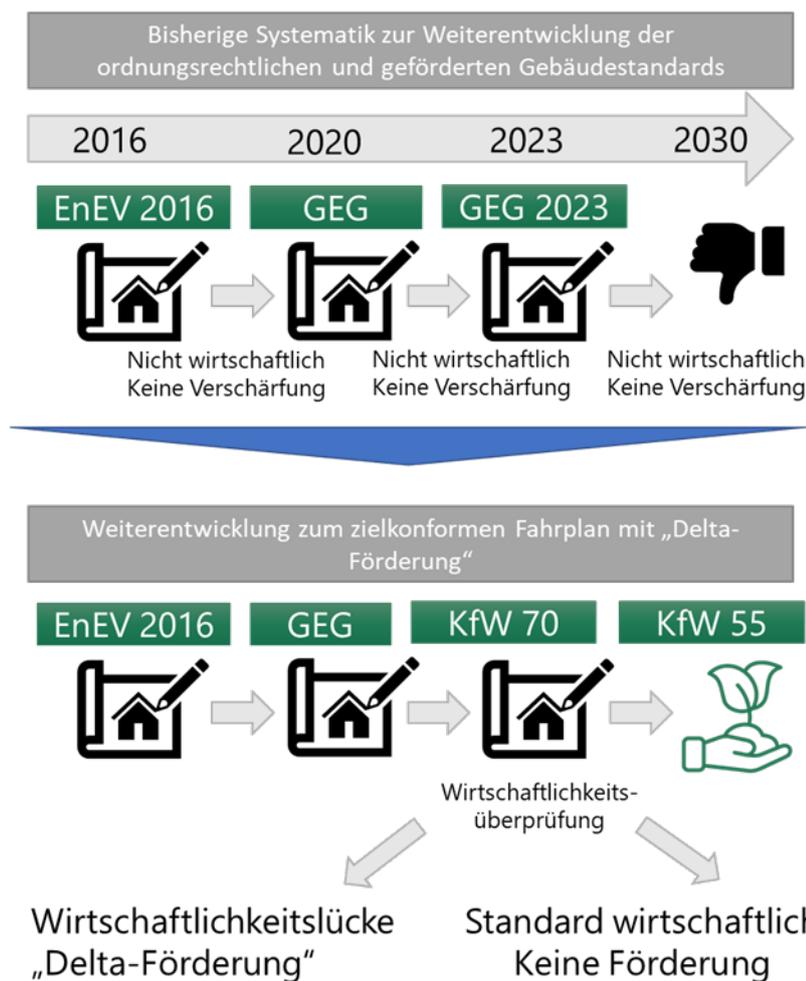
Für die Modellierung wird die Entwicklung des Fördervolumen in der gutachterlichen Bewertung einer Anpassung des BEG von Prognos verwendet (Prognos 2021). Das Förderbudget er-

hört sich 2021 auf rund 12 Mrd. €, im Jahr 2022 werden 11 Mrd. € bereitgestellt, ab 2023 stehen jährlich 9 Mrd. € zur Verfügung. Über die Jahre 2020 und 2021 wurden davon im Mittel 32 % für den Austausch von Wärmeversorgungssystemen, rund 45 % für Neubauten und rund 22 % für die energetische Gebäudesanierung bereitgestellt. Diese Verteilung wird bis 2030 übernommen. Ab 2030 wird ein jährliches Budget von 4 Mrd. € angenommen. Dies entspricht einer deutlichen Reduktion und muss deshalb in folgenden Abschätzungen angepasst werden.

### **8.3.3.1.3 Weiterentwicklung der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) in Bezug auf KfW-Standards und Einführung einer „Delta-Förderung“**

Die bestehenden Förderinstrumente im Rahmen des BEG sollten so angepasst werden, dass eine konsequente Ausrichtung auf ambitionierte und zielkonforme Standards ermöglicht wird. Gleichzeitig sollten durch Kombination von Fördern und Fordern verschärfte ordnungsrechtliche Standards politisch und gesellschaftlich ermöglicht werden, indem mögliche Wirtschaftlichkeitslücken in Abhängigkeit der jeweiligen Marktgegebenheiten durch eine „Delta-Förderung“ adressiert werden (vgl. Steinbach (2021)).

Die bisherige Systematik bei der Weiterentwicklung der ordnungsrechtlichen und daraus abgeleiteten geförderten Standards wird maßgeblich durch das Wirtschaftlichkeitsgebot des GEG (§ 5) beschränkt, das im jeweiligen Jahr der Novellierung der EnEV bzw. des GEG, gestützt auf Annahmen zu Preisentwicklungen bewertet wird (Abbildung 52). D.h. wenn der Standard zum Zeitpunkt der Novellierung gerade nicht wirtschaftlich ist bzw. erscheint, z. B. aufgrund von niedrigem Energiepreinsniveau oder hohen Baukosten, wird eine Verschärfung nicht umgesetzt, auch wenn dieser Standard für die Klimazielerreichung eigentlich notwendig wäre. Diese Systematik besteht im Gebäudebestand seit etwa 20 Jahren. Die letzte signifikante Verschärfung der energetischen Anforderungen für Bestandsgebäude hat im Rahmen der Novellierung der EnEV stattgefunden, die im Jahr 2009 in Kraft getreten ist. Aus der Perspektive der Zielerreichung im Klimaschutz ist hingegen ein Fahrplan notwendig, der die gesetzlichen Standards bereits heute für die nächsten Jahrzehnte festlegt und es erlaubt diese in Investitionsentscheidungen entsprechend vorausschauend zu berücksichtigen. Damit wird nicht nur die Akzeptanz erhöht, sondern auch mögliches Zurückhalten von Investitionen durch GEG-Verschärfung reduziert. Auch die Marktakteure (Bauträger\*Bauträgerinnen, Architekten\*Architektinnen, Herstellungs- und Handwerksbetriebe, etc.) könnten sich rechtzeitig auf die Standards einstellen, so dass Investitionen in Innovationen und Kommunikation an die Gebäudeeigentümer\*innen rechtzeitig stattfindet. Die Höhe der Delta-Förderung mit Blick auf die festgelegten Standards im Fahrplan würden dann laufend im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen überprüft – in vergleichbarer Weise, wie dies bisher im Rahmen von Gutachten zur Novellierung von EnEV/GEG passierte. Ist der Standard dann im Jahr der Verschärfung gerade nicht wirtschaftlich, qualifizieren sich die Gebäudeeigentümer\*innen für die Delta-Förderung. Diese soll gerade die Wirtschaftlichkeitslücke abdecken und liegt damit unter der Förderung ambitionierter Gebäudestandards (KfW 100, KfW 55, etc.).

**Abbildung 52: Bisherige Systematik bei der Entwicklung von Gebäudestandards und vorgeschlagene Weiterentwicklung mit „Delta-Förderung“**

Quelle: (Steinbach 2021)

Ökologische Baustoffe und Nachhaltigkeitsklassen: Bislang liegt der Fokus von Klimaschutzmaßnahmen auf dem Endenergieverbrauch des Gebäudes während der Nutzungsphase. Der Rechts- und Förderrahmen fokussiert auf einen effizienten Betrieb von Gebäuden durch Anreizwirkungen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle und den Einbau effizienter Wärmeversorgungssysteme auf Basis erneuerbarer Energien. Die Betrachtung des Lebenszyklus von Gebäuden und somit der Produktion und Entsorgung von Baustoffen und Dämmstoffen sowie Heiztechnologien wird in den zentralen Politikinstrumenten oder den Förderprogrammen bislang nicht adressiert. Zur Erreichung der Klimaschutzziele ist jedoch auch die Wahl der Bauweise und Baustoffe entscheidend. Für ressourcenschonendes Bauen ist allerdings eine ganzheitliche Betrachtung der Gebäude über den Lebenszyklus erforderlich.

In Zusammenhang mit der Berechnung eines Carbon Footprint von Gebäuden bzw. Baustoffen und der Produktkennzeichnung sollten deshalb bestehende Fördermöglichkeiten differenziert werden. Darin sollten die ökologische Qualität von Baustoffen, der Ressourcenschutz und eine möglichst hohe Zirkularität bevorteilt werden, ohne gegen Energieeffizienzanforderungen an Gebäude und Technische Gebäudeausrüstung (TGA) ausgespielt zu werden. Erste Berücksichtigung finden ökologische Baustoffe ab 1. Juli 2021 im Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) innerhalb der BEG. Das QNG bewertet die ökologische, soziokulturelle und ökonomische

Qualität von Gebäuden und unterscheidet in „Plus“ und „Premium“. Das QNG bewertet unter anderem die Flächen- und Ressourceninanspruchnahme, die nachhaltige Beschaffung sowie die Recyclingfreundlichkeit von verwendeten Materialien und den Konstruktionen (BMI 2021). Einige Voraussetzungen für Zertifizierungen als QNG-Plus und QNG-Premium finden sich in Tabelle 82. In Bezug auf die Treibhausgasemissionen und den Primärenergiebedarf wird der Aufwand über den gesamten Lebenszyklus erfasst. Das heißt, dass sowohl der Primärenergieaufwand und die Treibhausgasemissionen für den Bau als auch den Betrieb des Gebäudes erfasst und im Anschluss pro Jahr auf die Gebäudenutzfläche bezogen werden.

**Tabelle 82: Ausgewählte Voraussetzungen für das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude**

	QNG-Plus	QNG-Premium
Treibhausgasemissionen im Gebäudelebenszyklus	28 kg CO <sub>2</sub> -Äq/m <sup>2</sup> a	20 kg CO <sub>2</sub> Äq/m <sup>2</sup> a
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar im Gebäudelebenszyklus	96 kWh/m <sup>2</sup> a	64 kWh/m <sup>2</sup> a
Materialgewinnung	Mind. 50 % der verbauten Hölzer aus nachhaltiger Forstwirtschaft	Mind. 80 % der verbauten Hölzer aus nachhaltiger Forstwirtschaft

Quelle: (BMI 2021)

CO<sub>2</sub>-arme Produkte werden darüber hinaus auch in der Maßnahme „Grüne Leitmärkte“ (siehe Abschnitt 7.1.2.1.4) adressiert.

### Parametrisierung

Insgesamt werden die Fördersätze für die energetische Sanierung erhöht. Für die energetische Sanierung der Gebäudehülle werden 10 Prozentpunkte mehr veranschlagt.

Mit Bezug auf die Weiterentwicklung zielkonformer BEG-Standards wird die Fokussierung auf folgende Standards vorgenommen. Die Förderung im Bestand gilt, wenn durch Sanierung der Standard EH-55 oder besser erreicht wird, bezogen auf Ht' und Bauteilanforderung mit Bezug auf den jeweilig geltenden GEG-Standard. Dabei ist zu beachten, dass sich die KfW-Standards immer an den jeweils geltenden ordnungsrechtlichen Anforderungen des GEG bzw. früher der EnEV orientieren. Die Effizienzstandards heißen zwar immer gleich, haben aber bei einem verschärften ordnungsrechtlichen Standard, ein höheres Ambitionsniveau. Beispielsweise hat ein KfW-Effizienzhaus 55 nach EnEV 2007 geringere Anforderungen an den Wärmeschutz als ein KfW-Effizienzhaus nach EnEV 2009/2016. Mit Weiterentwicklung der Anforderungen des GEG wird dies dann ebenfalls so sein. Für die vorgeschlagene Parametrisierung und die daraus resultierenden Anforderungen wird auf Abschnitt 8.3.3.1.8 verwiesen. Die Systematik der Anforderungen der derzeitigen KfW-Effizienzhäuser wird dabei beibehalten. Mit Bezug auf die Delta-Förderung ist die vorgegebene Entwicklung der ordnungsrechtlichen Standards maßgeblich (siehe Abschnitt 8.3.3.1.8).

#### 8.3.3.1.4 Fokussierung auf Förderung von EE-Wärme in der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)

In der Modellierung wird angenommen, dass die Förderung im Rahmen der BEG ab 2022 nur noch zielkonforme Wärmeversorgungssysteme umfasst. Dazu gehören Wärmepumpen, effiziente und schadstoffemissionsarme Biomasse-Zentralheizkessel und Wärmenetzanschlüsse. Die In-

Installation von Renewable-Ready-Gas-Brennwertheizungen und Gas-Hybridheizungen wird demnach nicht mehr gefördert. Solarthermie wird ebenfalls nur noch in Kombination mit den genannten EE-Wärme-Technologien gefördert.

Zur Erreichung der Ziele im Gebäudesektor für 2030 ist eine schnelle Umstellung der Wärmeversorgungssysteme auf Zielkonformität notwendig. Aus diesem Grund sollte die Installation von fossil betriebenen Wärmeerzeugern nicht weiter finanziell unterstützt und stattdessen der Ausbau von Systemen auf Basis erneuerbarer Energien forciert werden. Selbst wenn „renewable ready“/Hybrid Gas-Brennwertheizungen den Einsatz synthetischer bzw. biogener Brennstoffe ermöglichen, stellen diese, aufgrund der Verfügbarkeit und hohen Kosten, keine Option für die Zielerreichung im Jahr 2030 und darüber hinaus dar. Der Fokus der Fördermaßnahmen sollte deshalb auf denjenigen Versorgungstechnologien liegen, die zur Zielerreichung 2030 beitragen.

Für dieses Instrument ergibt sich eine sehr gute Passbarkeit im Instrumentenmix, da durch den Wegfall der Förderung der Umstieg auf erneuerbare Wärme verstärkt angereizt wird. Durch das Instrument wird die derzeitige Fehlallokation von Fördermitteln aufgelöst und gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit von EE-Wärme erhöht.

### **Parametrisierung**

Im Modell wird keine Förderung für renewable-ready-Gasheizungen und Gas-Hybridheizungen hinterlegt. Die Fördersätze für Biomasse-Systeme werden im Vergleich zum MMS aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit von Biomasse deutlich nach unten korrigiert. Für die Fraktionen gelten folgenden Fördersätze ab 2021:

- ▶ Scheitholz 10 %
- ▶ Hackschnitzel 4 %
- ▶ Holzpellets 18 %

Wärmenetzanschlüsse werden weiterhin gefördert. Aufgrund des benötigten schnellen Ausbaus von Wärmenetzen ist die Einstufung als EE-Wärme durch das Erstellen eines Dekarbonisierungsfahrplans im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung ausreichend. Für Wärmepumpen wird ein erhöhter Fördersatz festgelegt, der in Abschnitt 8.3.3.1.5 beschrieben wird.

#### **8.3.3.1.5 1 Mio. Wärmepumpenprogramm**

Attraktives, zeitlich eng befristetes Förderprogramm, für den Einbau von mindestens 1 Mio. Wärmepumpen in Bestandsgebäuden. Die alleinige Voraussetzung ist ein individueller Sanierungsfahrplan (iSFP) mit einer konkret benannten Zeitplanung (bis max. 2045) des Komplettumstiegs auf EE-Betriebsenergie und energetischer Ertüchtigungsmaßnahmen des Gebäudes (Verteiltechnik, Hülle). Für die Umsetzung in größeren MFH sind Sonderkonditionen denkbar, die jedoch einen Erfahrungsaustausch bedingen. Die Förderung beschränkt sich auf Geräte mit natürlichem Kältemittel.

Durch die Maßnahme können die Wirkungen, unter anderem Treibhausgaseinsparungen, einer großen Anzahl von neuinstallierten Wärmepumpen bewertet werden. Neben dem Klimaschutzaspekt könnte dieses Programm zum notwendigen Kapazitätsaufbau in der Herstellerindustrie und im umsetzenden Handwerk beitragen (siehe auch Aus- und Weiterbildung von Fachkräften in Abschnitt 8.3.3.1.14).

### **Parametrisierung**

Im Modell wird für den Zeitraum 2022 bis einschließlich 2025 ein Fördersatz in Höhe von 50 % der Investitionskosten angenommen. Zudem wird eine Reduktion der Lebensdauer bestehender

Wärmeversorgungssysteme um 5 % ab 2025 unterstellt, da davon ausgegangen wird, dass die Höhe der Förderung auch Einfluss auf die Austauschrate der Wärmeversorgungssysteme hat.

#### **8.3.3.1.6 Vorziehen des Installationsverbots von neuen Ölkesseln auf 2023**

Das in § 72 GEG für 2026 vorgesehene Verbot, neue monovalente Heizöl- und fossile Feststoffkessel zu installieren, wird auf das Jahr 2023 vorgezogen und auf alle monovalenten Kessel zur Verbrennung flüssiger Brennstoffe ausgeweitet. Zudem wird die Zulässigkeit der Installation von Hybridanwendungen, also die Kombination von Öl-/Feststoffkessel und erneuerbaren Wärmetechniken, eingeengt. Hybridanwendungen sind dann nur noch zulässig, wenn die Wärmeversorgung des Ölkessels über das Jahr hinweg bei weniger als 50 % liegt. Ab 2030 wird dann auch die Installation von Hybridanwendungen komplett verboten. Mit der Regelung sollen Gebäudeeigentümer davor geschützt werden, Investitionen in die Wärmeversorgung zu tätigen, die mit den langfristigen Zielen der Gebäudetransformation nicht vereinbar sind. Bei Hybridanwendungen soll ein möglichst hoher EE-Anteil sichergestellt werden (EE soll dabei das primäre Heizsystem darstellen). Die Umsetzung der Maßnahme erfolgt über eine entsprechende Anpassung im GEG.

#### **Parametrisierung**

In Bezug auf die Szenarioberechnung wird im Modell die Installation von Ölkesseln ab dem Jahr 2023 ausgeschlossen. Hinsichtlich der Einzelmaßnahmenabschätzung wird angenommen, dass das Verbot ab 2023 pro Jahr rund 45.000 Ölkessel betrifft, ein Großteil davon in EZFH. Es wird ferner unterstellt, dass bei EZFH bei 10 % der Fälle und bei MFH und NWG bei 20 % der Fälle, die dem Ölkesselverbot unterliegen, eine anteilige Deckung des Wärme- und Kältebedarfs durch erneuerbare Energien technisch nicht möglich ist oder zu einer unbilligen Härte führen würde (und deswegen aufgrund der bestehenden Ausnahmeregelung wieder ein monovalenter Ölkessel zum Einsatz kommt). Die Berechnung der Einsparwirkung erfolgt unter Zugrundelegung gebäudetypspezifischer Substitutionsmixe (Verteilung der Fälle auf zulässige Alternativen wie (übergangsweise) Erdgas, Fernwärme, EE- und (bis 2030) Hybridanlagen. Bei den Hybridanlagen kommt Heizöl nur noch zur Spitzenlastabdeckung zum Einsatz).

#### **8.3.3.1.7 Installationsverbot von neuen Gaskesseln ab 2025 bzw. EE-Nutzungspflicht im Gebäudebestand**

Das Installationsverbot für neue monovalente Ölkessel wird auf neue monovalente Gaskessel (also Kessel zur Verbrennung gasförmiger Brennstoffe) ausgeweitet. Das Verbot tritt im Jahr 2025 in Kraft. Ab 2030 wird dann auch die Installation von Hybridanwendungen, d. h. die Kombination eines Gaskessels mit erneuerbaren Energien, verboten. Dies ist notwendig, da eine Hybridanlage auch langfristig mit Erdgas versorgt werden müsste. Da davon auszugehen ist, dass Wasserstoff in der Gebäudewärme keine bedeutende Rolle spielen wird, würde der Gasumsatz in den Gasverteilnetzen allerdings signifikant sinken und die Investition in eine Hybridanlagen zwangsläufig in einen Lock-in führen. Die Regelung schützt also Gebäudeeigentümer vor signifikant steigenden Gaspreisen. Auch diese Regelung würde über eine Anpassung des GEG umgesetzt.<sup>61</sup>

#### **Parametrisierung**

Im Modell wird aufgrund der besseren Umsetzbarkeit in der Modell-Systematik für die Szenarioberechnung ab 2025 eine Nutzungspflicht für erneuerbare Energien bzw. Wärmenetze unter-

<sup>61</sup> Im Vergleich zur 65 %-Anforderung, die nach Beschluss der Bundesregierung vom 23.03.2022 ab dem 01. 01.2024 in Kraft treten soll, wirkt die hier angenommene Regelung im Falle von Gaskesseln erst ein Jahr später. Ab 2030 wird die hier unterstellte Regelung aber zu einer 100 %-Anforderung (100 % EE bei Installation einer neuen Heizanlage).

stellt. Diese schließt sowohl die Nutzung monovalenter Öl- als auch Gaskesseln aus. Die Abschätzung der Maßnahmenwirkung erfolgt nach der gleichen Methode wie beim Ölkessel-Verbot unter Annahme einer jährlichen Austauschrate und eines gebäudetypspezifischen Substitutionsmixes.

### **8.3.3.1.8 Weiterentwicklung der energetischen Standards (Revision des Gebäudeenergiegesetzes (GEG))**

Die energetischen Mindestanforderungen an neue Wohn- und Nichtwohngebäuden und Sanierungsmaßnahmen bei bestehenden Wohn- und Nichtwohngebäuden werden sofort (2021) und nicht erst im Jahr 2023 überprüft und geändert. Anders als aktuell vom § 5 GEG vorgegeben, sollten die Standards gleichermaßen und zudem wirtschaftlich in Bezug auf die volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten sein. Dies vermeidet Fehlinvestitionen durch die Gebäudeeigentümer\*innen in den kommenden Jahren. Eine mögliche Verschärfung erfolgt unter Wahrung des Grundsatzes der Technologieoffenheit. Die Maßnahme erfasst sowohl die energetischen Mindeststandards für Neubau und Sanierung (MEPS einschließlich Nachrüstpflichten).

Das GEG wird hinsichtlich seiner Anforderungssystematik grundlegend weiterentwickelt und auf die zentralen Anforderungsgrößen „Treibhausgasemissionen“ und „Endenergieverbrauch“ ausgerichtet. Für die Gebäudeeigentümer\*innen würden die Kennwerte deutlich lesbarer. Andere Instrumente (z. B. Gebäudeklimaabgabe) ließen sich mit der neuen Anforderungssystematik leichter umsetzen.

Das GEG wird ergänzt um Vorgaben zum verpflichtenden Einbau von geeigneter Messtechnik für das Monitoring und die Qualitätssicherung. Dabei geht es vor allem um Mess- und Anzeigetechnik, die es den Anlagenbetreibenden/Laien erlaubt, ohne großen Aufwand zu sehen, ob die Heizanlage ordnungsgemäß läuft, z. B. in Form einer „Effizienzampel“ (entsprechende Systeme ließen sich auch über die Ökodesign-Anforderungen implementieren).

Zudem sind auch Anpassungen beim vorbeugenden sommerlichen Wärmeschutz erforderlich (auch für grundlegende Sanierungen, nicht nur für Neubau, ohne „Konformitätsvermutung“ für unkritische Räume und auf der Grundlage von Zukunftswetterdaten).

#### **Parametrisierung**

Für die energetischen Mindestanforderungen für Neubauten (WG und NWG) werden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Festlegung des Mindeststandards auf das Niveau Effizienzhaus EH-55 (2023) und EH-40 (2025). Dies entspricht den Beschlüssen der Bundesregierung vom 23. März 2022 (Maßnahmenpaket des Bundes zum Umgang mit den hohen Energiekosten<sup>62</sup>.

Bei Sanierungsmaßnahmen gilt:

- ▶ Bei Vollsanierungen (§ 50 GEG) gelten die Anforderungen als erfüllt, wenn der Jahres-Primärenergiebedarf sowie der Höchstwert des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlusts das jeweils aktuelle Anforderungsniveau für Neubauten um nicht mehr als 40 % überschreiten.<sup>63</sup>

<sup>62</sup> Ergebnis des Koalitionsausschusses vom 23. März 2022 - Maßnahmenpaket des Bundes zum Umgang mit den hohen Energiekosten (<https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/publikationen/massnahmenpaket-des-bundes-zum-umgang-mit-den-hohen-energiekosten-2020522>)

<sup>63</sup> Nach aktueller Rechtslage werden die Anforderungen erfüllt, wenn der Jahres-Primärenergiebedarf sowie der Höchstwert des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlusts das Anforderungsniveau des GEG-Referenzgebäudes für Neubauten um nicht mehr als 40 % überschreiten. Die Referenz entspricht dem Anforderungsniveau für Neubauten der EnEV 2009.

- ▶ Das Anforderungsniveau für die Sanierung einzelner Bauteile (§ 48 in Verbindung mit Anlage 7 GEG) orientiert sich am neuen Leitstandard Effizienzhaus EH-70.
- ▶ Ausweitung der Auslösetatbestände für bedingte Sanierungsmaßnahmen (z. B. eine Dämmpflicht auch dann, wenn der Außenputz einer Wand nur ausgebessert wird)
- ▶ Ausweitung der bedingten Sanierungsanforderungen auf Gebäude mit Baujahr ab 1984
- ▶ Streichung der umfangreichen Ausnahmen bei den Nachrüstpflichten (z. B. Dämmung der obersten Geschoßdecke)

Die Nachrüstpflicht für alte Heizkessel (Paragraf 72 GEG) wird auf Niedertemperatur- und Brennwertkessel ausgeweitet. Gleichzeitig werden die Ausnahmen im Bereich der eigengenutzten Ein- und Zweifamilienhäuser ersatzlos gestrichen.

Für NWG werden in das GEG folgende weitere Anforderungen aufgenommen:

- ▶ Verpflichtende Einführung von Energiemanagementsystemen
- ▶ Verbesserung des Vollzugs der bereits bestehenden Inspektionspflichten von Klima- und Kälteanlagen

#### 8.3.3.1.9 Sanierung der Worst Performing Buildings

Im Rahmen ihrer langfristigen Renovierungsstrategie definiert die Bundesregierung Gebäude ab einer bedarfsorientierten Effizienzklasse G (also Gebäude mit einem Endenergiebedarf von mehr als 200 kWh/m<sup>2</sup>\*a) als Gebäude mit schlechtester Leistung (worst performing buildings). Gleichzeitig stuft die Langfriststrategie rund 30 % aller Wohngebäude diesem Segment zu. Angesichts der sehr heterogenen Eigentümerstruktur im Gebäudebestand sowie der vielen nicht-finanziellen Hemmnisse, die der Gebäudesanierung entgegenstehen, ist es fraglich, ob es gelingen kann, die für die Zielerreichung notwendige Sanierungsaktivität allein durch öffentliche Fördermittel sowie informatorische Ansätze auszulösen. Dies gilt insbesondere auch für das Segment der worst performing buildings, bei denen aufgrund ihres hohen Ausgangsbedarfs die größten spezifischen Einsparungen erreicht werden können.

Aus diesem Grund wird im Instrumentenmix die ordnungsrechtliche Komponente gestärkt. Im Zusammenspiel mit den Förderprogrammen käme dem Ordnungsrecht die Rolle zu, mehr Sanierungsfälle auszulösen. Gleichzeitig wird die Förderkulisse so ausgestaltet, dass die Gebäudeeigentümer\*innen ökonomische Rahmenbedingungen vorfinden, die so attraktiv sind, dass die Sanierungsmaßnahmen mehrheitlich auch auf das geforderte Mindestniveau erfolgen.

Als Auslöser für mehr Sanierungsaktivität werden nachfolgend zwei Instrumentenoptionen dargestellt, Mindesteffizienzstandards und die Gebäude-Klimaabgabe. Die Wirkungsabschätzung auf Einzelinstrumentenebene erfolgt für die Mindesteffizienzstandards.

#### MEPS: Mindesteffizienzstandards für „worst performing buildings“ (MEPS)

Um die Sanierungsaktivitäten bei den Gebäuden mit der „schlechtesten Leistung“ (worst performing buildings) zu steigern, wird für dieses Gebäudesegment ein Mindesteffizienz-Standard eingeführt.<sup>64</sup>

<sup>64</sup> In ihrer Renovation Wave kündigte die EU-Kommission an, im Rahmen der Novelle der Gebäuderichtlinie EPBD verbindliche Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz vorzuschlagen. Gleichzeitig lenkt die Kommission in ihrer Renovation Wave das Augenmerk auf die Sanierung besonders ineffizienter Gebäude (tackling energy poverty and worst-performing buildings). Auch in diesem Zusammenhang identifiziert die Renovation Wave Mindesteffizienzstandards als geeignete Maßnahmen, die Sanierungsaktivitäten in diesem besonderen Gebäudesegment voranzubringen.

Alle Wohn- und Nichtwohngebäude der Effizienzklassen G und H müssen im Falle der Eigentumsübertragung innerhalb einer Periode von fünf Jahren energetisch so saniert werden, dass sie Effizienzklasse C oder besser erreichen. Die Regelung gilt nicht, wenn in einem Mehrfamilienhaus nur einzelne Wohnungen den Eigentümer wechseln. Zur Vereinfachung könnte erwogen werden, den Nachweis der Pflichterfüllung in Form vordefinierter Maßnahmenpakete zuzulassen. Die Nachweisführung erfolgt über den Energieausweis. Grundlage ist ein Bedarfsausweis (ggf. auch ein iSFP), der auch für größere Mehrfamilienhäuser verpflichtend wird. Der Effizienzklassenansatz wird sinngemäß auch auf Nichtwohngebäude übertragen.

Das Instrument erfordert die rechtssichere Feststellung des aktuellen energetischen Standards der betroffenen Gebäude. Hierzu ist eine grundlegende Überarbeitung der Regelungen für Energieausweise notwendig. Analog dem Vorschlag beim GEG könnte dabei die Metrik des Energieausweises auf die Bezugsgröße „Treibhausgasemissionen“ umgestellt werden. Mit Blick auf den Vollzug erscheint auch die Einrichtung eines Gebäuderegisters bzw. einer Energieausweisdatenbank notwendig und sinnvoll.

### **Parametrisierung**

In Deutschland gehören rund 40 % aller EZFH und rund 16 % aller MFH den Effizienzklassen G und H an. Dies entspricht knapp 7 Millionen Wohngebäuden. Ferner wechseln pro Jahr rund 280.000 der bestehenden Wohngebäude den Eigentümer.<sup>65</sup> Daraus ergibt sich die Anzahl der Gebäude, die pro Jahr in Folge der Maßnahme energetisch saniert werden müssten. Die Einsparwirkung pro Sanierungsfall folgt aus der Differenz der Effizienzklasse des Ausgangszustands (G oder H) sowie der Zielklasse (C).

### **Einführung einer Gebäude-Klimaabgabe**

Das Instrument der Gebäude-Klimaabgabe besteht im Kern aus einer Zahlungsverpflichtung. Gebäudeeigentümer\*innen nicht oder unzureichend sanierter Gebäude zahlen eine Klimaabgabe, deren Höhe sich an der Differenz zwischen dem energetischen Standard/der aktuellen Klimaklasse des Gebäudes und den Zielwerten des Fahrplans bis 2045 (Benchmark) bemisst. Der Fahrplan orientiert sich am Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045. Die Zielwerte (Stufen) sinken also im Zeitverlauf auf das Zielniveau eines klimaneutralen Gebäudebestands. Die Metrik des Instruments sollte auf Treibhausgasemissionen und Endenergie basieren.

Darüber hinaus erhalten Gebäudeeigentümer\*innen, die auf ein ambitionierteres energetisches als das jeweils aktuell gültige Anforderungsniveau sanieren, einen Rechtsanspruch auf Förderung. Die Förderung steigt mit dem Ambitionsgrad der Sanierung an. Die Gebäudeeigentümer\*innen kennen dabei den Fahrplan der weiteren Zielwertverschärfung bis 2045 bereits und können demnach Einzelmaßnahmen und systemische Sanierungen ganzheitlich planen und umsetzen lassen.

Die Gebäude-Klimaabgabe ist ein preisbasiertes Instrument zur Anreizung der Gebäudesanierung. Durch die Klimaabgabe, die Eigentümer\*innen für den Effizienzstandard ihres Gebäudes entrichten, entsteht ein finanzieller Anreiz, Sanierungsmaßnahmen zu ergreifen und mindestens bis zum aktuell gültigen Zielwert zu sanieren. Durch die Definition eines Fahrplans zielkonformer Standards (Stufen) bis zur Klimaneutralität und die Aussicht auf eine rechtssichere Förderung ergibt sich für die Eigentümer\*innen Planungssicherheit und auch eine bessere Realisierbarkeit von Sanierungsmaßnahmen. Gleichzeitig wird durch die Entrichtung der Klimaabgabe die Refinanzierung der Förderprogramme gesichert.

<sup>65</sup> Für den Bereich der NWG fehlen leider entsprechende Daten. Hier müsste auf die Datenstruktur der Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude zurückgegriffen werden.

Das Instrument entfaltet eine ähnliche Wirkung wie der voran beschriebene Mindesteffizienzstandard. Anstelle einer materiellen Sanierungsverpflichtung besteht hier die Primärverpflichtung allerdings in einer Zahlungsverpflichtung.

#### **Parametrisierung**

Eine bottom-up Wirkungsabschätzung des Einzelinstruments ist schwierig, da Annahmen zur zeitlichen Entwicklung des Verhältnisses zwischen Sanierung vs. Zahlung der Klimaabgabe benötigt werden. Bezogen auf den Energieausweis sind ähnliche Weiterentwicklungen notwendig, wie beim Instrument des Mindesteffizienzstandards.

#### **8.3.3.1.10 Begrenzte Umlage des CO<sub>2</sub>-Preises auf Mieter**

Der CO<sub>2</sub>-Preis auf die Brennstoffe Erdgas und Heizöl wird aktuell allein von Mietern getragen, der Vermieter wird nicht an den Kosten beteiligt. Durch die begrenzte Umlage können Vermieter nur die Hälfte des CO<sub>2</sub>-Preises, der auf die Brennstoffe Erdgas und Heizöl anfällt, auf die Mieter umlegen. Die andere Hälfte müssen sie selbst tragen.

Die Umlagebegrenzung führt zu einer gerechteren Verteilung der Kosten für den Ausstoß von Treibhausgasemissionen. Normalerweise haben Vermieter keinen Einfluss auf den Energieverbrauch von Mietenden und diese wiederum keinen Einfluss auf das installierte Wärmeversorgungssystem und die energetische Qualität der Gebäudehülle. Durch die hälftige Aufteilung des CO<sub>2</sub>-Preises ergibt sich deswegen eine doppelte Anreizwirkung. Durch die anteilige Last haben Mieter einen Anreiz, sich energieeffizient zu verhalten. Vermieter werden dagegen angereizt, in klimaschonende Heizungssysteme bzw. energetische Sanierungen zu investieren.

#### **Parametrisierung**

Die begrenzte Umlage des CO<sub>2</sub>-Preises ist ein Instrument, das die Wirkungsentfaltung des BEHG sicherstellt. Die Abschätzung des Effekts auf einen Austausch des Wärmeversorgungssystems ist allerdings schwierig.

#### **8.3.3.1.11 Modernisierungsumlage für sozial-ökologische Gebäudemodernisierung**

Zur Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudesektor ist neben der Installation zielkonformer Wärmeversorgungssysteme auch eine Steigerung der Sanierungsrate notwendig. Bei Modernisierungen von Gebäuden können Vermietende derzeit 8 % der Kosten auf die Jahresmiete umlegen.

Für einen weiteren Anreiz zur Gebäudesanierung wird durch die Maßnahme die Modernisierungsumlage von aktuell 8 % auf 4 % gesenkt, jedoch gleichzeitig der Verbleib von Fördermitteln beim Vermietenden ermöglicht. Die Fördermittel müssen durch sanierende Vermietende nicht mit der Modernisierungsumlage verrechnet werden. Hierdurch entstehen auf Seiten der Vermietenden Anreize zur Modernisierung, gleichzeitig muss ein Rahmen geschaffen werden, um unzumutbare Härten mieterseitig abzufedern.

#### **Parametrisierung**

Die Maßnahme dient als Instrument zur Steigerung der Akzeptanz und Realisierbarkeit von Sanierungsmaßnahmen im vermieteten Gebäudebestand und wird nicht explizit quantifiziert.

#### **8.3.3.1.12 Kommunale Wärmeplanung**

Verbindliche Einführung der kommunalen Wärmeplanung, siehe Ausführungen in Abschnitt 6.1.4.1.2.

### 8.3.3.1.13 Aufbau, Stärkung und Förderung von regionalen Beratungsnetzwerken

Mithilfe dieser Maßnahme sollen regionale Beratungsnetzwerke von gewerkeübergreifenden Akteuren aus dem Bereich der Gebäudesanierung aufgebaut und bei ihren Aktivitäten unterstützt und gefördert werden – „13 Thesen für einen treibhausgasneutralen Gebäudestand“ (UBA 2020)<sup>66</sup>

Neben den ordnungsrechtlichen und fiskalischen Instrumenten sollen mithilfe dieses Instruments informatorische Hemmnisse bei Gebäudeeigentümer\*innen behoben und die Qualität energetischer Sanierungen verbessert werden. Regionale Beratungsnetzwerke bestehen aus planenden und ausführenden Gewerken aus dem Bereich der energetischen Gebäudesanierung, darunter Handwerker, Ingenieure, Energieberater, Energieversorgungsunternehmen, aber auch Banken und Vertreter von Kommunen. Das Ziel ist die Bündelung und Koordination von Informationen sowie die Bereitstellung dieser Informationen für Gebäudeeigentümer\*innen. Zentrales Element der regionalen Beratungsnetzwerke ist jedoch, dass neben der Beratung auch die Umsetzung angeboten wird.

Durch die Netzwerke wird die regionale Kompetenz der Akteure gestärkt und die Expertise gewerkeübergreifend gebündelt. Die Bündelung ermöglicht die Abdeckung der gesamten Beratungskette für Verbraucher von der Erstansprache über die Durchführung bis zur Ergebniskontrolle. Dadurch, dass Gebäudeeigentümer\*innen die nötigen Informationen und Leistungen aus einer Hand bekommen (one-stop-shop), wird die Sanierungsrate gesteigert. Durch das vorhandene Fachwissen der Akteure wird darüber hinaus auch die Sanierungstiefe erhöht. Mitglieder der regionalen Beratungsnetzwerke bilden sich regelmäßig produktneutral und unabhängig weiter.

Darüber hinaus besteht ein Vorteil der Beratungsnetzwerke darin, dass sich nicht nur die unterschiedlichen Akteure, sondern auch die Handwerker\*innen unterschiedlicher Gewerke austauschen. Das Instrument ist in Teilen überlappend mit bestehenden Beratungsangeboten der kommunalen Klimaagenturen/ Verbraucherschutzzentralen und Stadtwerken.

Mit dem Beratungszentrum soll nicht nur ein breiter Roll-out niederschwelliger Heizungschecks 3.0 erreicht werden, sondern auch umfangreiche Beratung mit individuellen Sanierungsfahrplänen (iSFP). Für Verbraucher sind jedoch nicht nur die informativen, sondern auch umsetzungsfördernde Maßnahmen relevant, wie die Förderung einer Baubegleitung.

Die regionalen Beratungszentren und die geförderten Beratungen sollen dabei konsequent nur auf Maßnahmen beraten, die kurz-, mittel- oder langfristig zu Klimaneutralität der Gebäude führen. Auch eine verpflichtende Ausstellung von iSFP könnte über die regionalen Beratungs- und Umsetzungszentren gefördert werden.

#### Parametrisierung

Die Maßnahme dient sowohl der Erhöhung der Sanierungsaktivität und der Qualitätssicherung als auch der Installation zielkonformer EE-Wärmeversorgungssysteme. Im Modell wird die Maßnahme in Form einer erhöhten Sanierungsrate erfasst. Durch eine Erhöhung der Anzahl aktiver Beratenden und passender Unterstützungsmaßnahmen wird angenommen, dass sich die Umsetzungsquote von Maßnahmen und somit auch die Sanierungsrate<sup>67</sup> erhöht.

Weiterhin wird unterstellt, dass die Energieberatungszentren bei der Beratung von Verbrauchern den steigenden CO<sub>2</sub>-Preis berücksichtigen. Aus diesem Grund wird in der Modellierung

<sup>66</sup> [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/pp\\_13thesen\\_treibhausgasneutraler\\_gebaeudestand\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/pp_13thesen_treibhausgasneutraler_gebaeudestand_bf.pdf)

<sup>67</sup> Die Berechnung basiert auf der Maßnahme Energieberatungszentrum des Gutachtens zur Bewertung des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials ausgewählter Maßnahmen im Bereich Gebäude & Wohnen für das Land Bremen (siehe IREES (2021)).

berücksichtigt, dass die zukünftigen CO<sub>2</sub>-Preise bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt werden<sup>68</sup>.

#### 8.3.3.1.14 Aus- und Weiterbildung der Wärmewende-Fachkräfte

Bisherige Maßnahmen setzen alle bei den Gebäudeeigentümer\*innen an mit der Zielsetzung, Sanierungsaktivitäten und Sanierungstiefe sowie die Installation zielkonformer Wärmeversorgungssysteme signifikant zu steigern. Um dies zu ermöglichen, sind jedoch auch Diffusionshemmnisse auf der Angebotsseite bzw. bei den Intermediären (planende und ausführende Expert\*innen) abzubauen, die in Szenarienuntersuchungen in der Regel nicht direkt Berücksichtigung finden. Um die für die Zielerreichung notwendige Sanierungsraten und Heizungstauschraten zu erreichen, müssen mehr Fachkräfte mit entsprechenden Kompetenzen zur Verfügung stehen. Die höchste Diskrepanz besteht derzeit im Bereich der Heizungsinstallateur\*innen, die bisher nur sehr wenige Marktsignale haben, ihr Technologieportfolio von fossilen Heizkesseln auf erneuerbare Wärmeerzeuger umzustellen (90 % der Neuinstallationen sind fossile Kessel, fossile Heizsysteme werden als „Renewable Ready“ und Hybridheizungen gefördert). Die vorgeschlagene Maßnahme setzt sowohl an der Ausbildung neuer Fachkräfte als auch an der Förderung von Weiterbildungen der bestehenden Installateure an.

Im Bereich der Ausbildung werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen:

- ▶ Trennung von Heizung und Sanitär in der Ausbildung und Schaffung des/der Wärmewende-Installateur\*in anstelle des/der Gas-Wasser-Installateur\*in
- ▶ Stärkung vorhandener dualer Studiengänge und Ausbildungen zur Energie- und Gebäudetechnik und Ausbau des Angebotes durch zusätzliche Ausbildungsvergütung, Kampagnen und finanzielle Unterstützung für Ausbildungsstätten

Während die Ausbildung eher mittelfristig entsprechende Voraussetzungen schafft, müssen kurzfristig Maßnahmen zur Weiterbildung geschaffen werden, mit denen eine hohe Diffusion von EE-Wärmesystemen überhaupt erst ermöglicht wird. Hierbei wird eine finanzielle Förderung der Weiterbildung für Heizungsinstallateur\*innen zur Fachkraft Erneuerbarer Energien bzw. Fachkraft Wärmepumpenanlagen und Fachkraft Solaranlagen vorgeschlagen. Ein wichtiges Hemmnis ist jedoch, dass Handwerksbetriebe mit vollen Auftragsbüchern es sich nicht leisten können, einzelne Mitarbeitenden in Weiterbildungen zu schicken, da diese dann für die Zeit der Weiterbildung nicht zur Verfügung stehen und für den betroffenen Betrieb keine Erlöse erwirtschaften. Daher wird vorgeschlagen, nicht nur die anfallenden Kursgebühren vollständig zu finanzieren, sondern den Unternehmen auch die Arbeitszeit zu vergüten, in denen die Mitarbeiter\*innen an der Weiterbildung teilgenommen haben. Der iSFP könnte hier ebenfalls integrierter Bestandteil der Weiterbildung sein.

#### Parametrisierung

Dies ist ein ergänzendes Instrument, welches die Voraussetzung schafft, dass die beschriebenen Förderinstrumente und ordnungsrechtlichen Maßnahmen die beabsichtigte Wirkung erzielen können. Die Einsparwirkung kann im Modell nicht quantifiziert werden. Mit Bezug auf die notwendigen Fördermittel kann hier eine überschlägige Berechnung gemacht werden:

- ▶ Unter der Annahme, dass von den rund 48.600 Heizungsunternehmen mit rund 395 600<sup>69</sup> in Deutschland die Hälfte die Förderung in Anspruch nimmt und pro Unternehmen eine Person

<sup>68</sup> Damit wird ein sogenanntes Perfect Foresight der Gebäudeeigentümer\*innen unterstellt mit Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Preise unterstellt. Bei der Simulation der Investitionsentscheidung werden die angenommene Steigerung der CO<sub>2</sub>-Preise über den Zeitraum von 10 Jahren in der Zukunft berücksichtigt.

<sup>69</sup> <https://www.zvshk.de/presse/medien-center/daten-fakten/>

umgeschult wird, sind es 24.500 „Förderfälle“- rund 6 % aller Beschäftigten im SHK Handwerk.

- ▶ Rund 1.500 Euro Förderung für die Weiterbildung und 1.500 € (50 h \* 30 €) für die Heizungsunternehmen, die ihre Mitarbeitenden zur Schulung schickt. Insgesamt sind das 3.000 € Förderung pro Förderfall – eventuell sind es 5.000 €.
- ▶ Notwendiges Fördervolumen: 73,5 Millionen €.

#### **8.3.3.1.15 Stärkung der seriellen Sanierung**

Diese Maßnahme findet keine weitere Betrachtung im KIS-2030, da momentan nur erste Pilotprojekte nach dem Energiesprung-Prinzip in Deutschland umgesetzt werden. Aufgrund des innovativen Charakters der Maßnahmen kann die Wirkung nicht abgeschätzt werden.

Ein erster Volumendeal mit Absichtserklärung ist von der Wohnungs- und Bauwirtschaft über 10.000 Wohnungen geschlossen worden. Die dena schätzt das Marktpotenzial auf 500.000 Gebäude im Bereich der mittleren Mehrfamilienhäuser der 50er und 70er Jahre.<sup>70</sup>

Darüber hinaus gibt es in Baden-Württemberg seit 2019 das Förderprogramm „Serielle Sanierung“. In der kumulativen Förderung in Verbindung mit einer KfW-Förderung wird die energetische Sanierung unter Verwendung industriell vorgefertigter Gebäudeelemente gefördert.

#### **8.3.3.1.16 Zielvorgaben für kumulierten Energieaufwand (KEA) und Treibhausgasemissionen für den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden**

Die Maßnahme findet Anwendung im Industriesektor im Maßnahmenbündel der Grünen Leitmärkte, da die Einsparungen gemäß Emissionsbilanzierung dort anfallen.

#### **8.3.3.2 MMS**

Im zuvor veröffentlichten MMS des Projektionsberichts 2021 wurden die folgenden Instrumente berücksichtigt:

- a) CO<sub>2</sub>-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr
- b) Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)
- c) CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm und Anreizprogramm Energieeffizienz
- d) Steuerliche Förderung Gebäudesanierung
- e) Marktanzreizprogramm (MAP)
- f) Mini-KWK-RL (NKI)\*
- g) Zuschuss Brennstoffzelle
- h) Förderprogramm Heizungsoptimierung
- i) Förderung der seriellen Sanierung
- j) Änderungen beim Wohngeld und bei Mietnebenkosten
- k) Gebäudeenergiegesetz (GEG)
- l) Mietrecht
- m) Umsetzung Ökodesign-RL und Energieverbrauchskennzeichnungs-VO für energieverbrauchsrelevante Produktgruppen

<sup>70</sup> <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/hoehere-foerderung-macht-serielle-gebaeudesanierungen-attraktiv>

- n) Vorbildfunktion Bundesgebäude
- o) Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen
- p) Energieausweis
- q) Diverse Informationsdienste wie „Deutschland macht's effizient“, der Deutschen Energie-Agentur (dena) oder dem Informationszentrum für zukunftsgerechtes Bauen
- r) Bundesförderung für Energieberatung
- s) KfW Energetische Stadtsanierung – Programmnummern 432/201/202
- t) Forschung, Entwicklung und Demonstration für energieeffiziente Gebäude und Quartiere
- u) Bildungsinitiative für Gebäudeeffizienz II - Programmbeitrag ESF
- v) Weiterentwicklung der Städtebauförderung (StBauF)

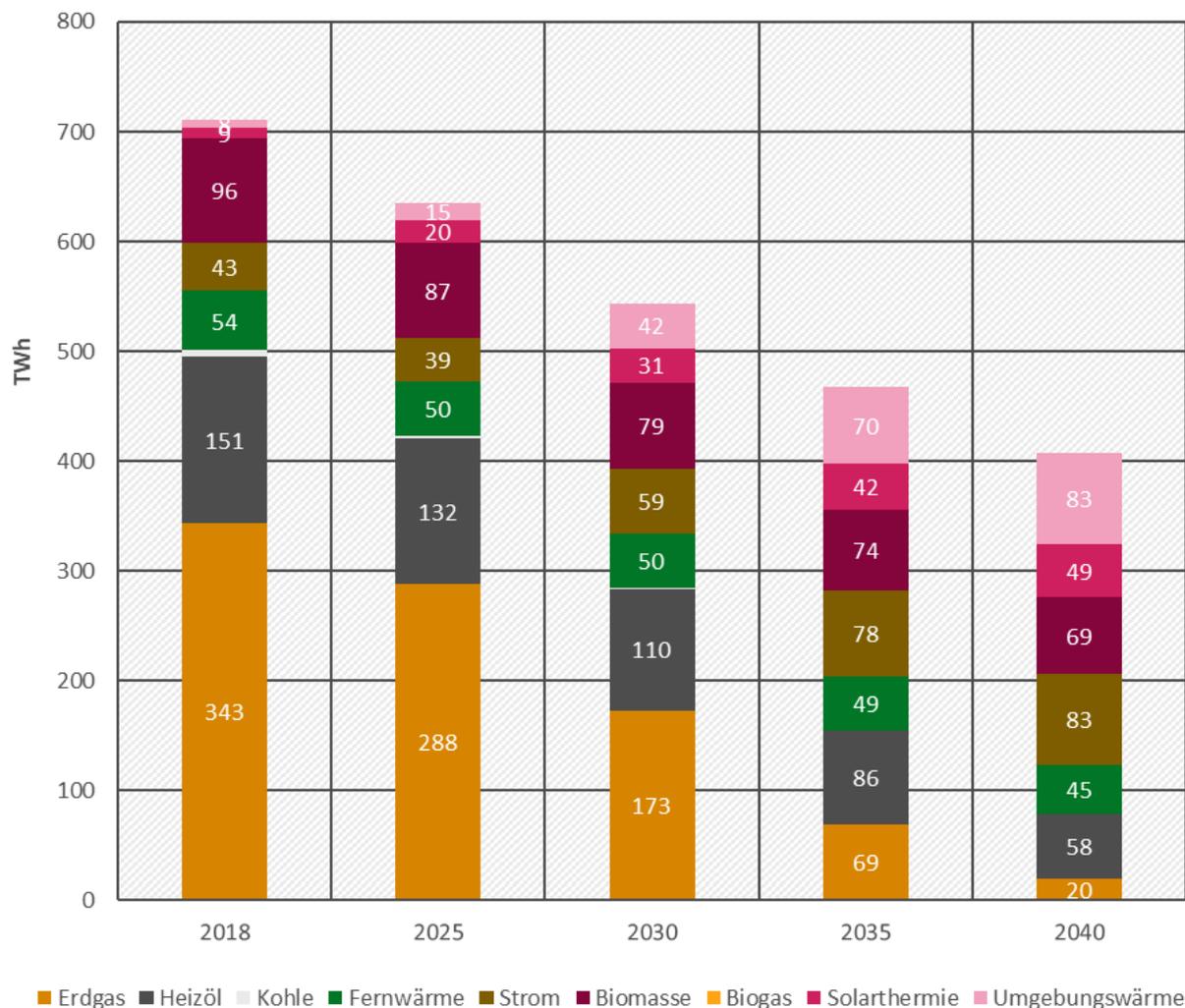
Eine Beschreibung der Instrumente und Maßnahmen sowie deren Parametrisierung kann Öko-Institut et al. (2021) entnommen werden.

### **8.3.4 Ergebnisse**

#### **8.3.4.1 KIS-2030**

##### **8.3.4.1.1 Entwicklung des Endenergiebedarfs**

Abbildung 53 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern. Der Endenergiebedarf reduziert sich im Zeitraum von 2018 bis 2030 um 24 % auf 545 TWh. Der Endenergiebedarf ist damit 74 TWh niedriger als im MMS im Jahr 2030.

**Abbildung 53: Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im KIS-2030**

Quelle: eigene Darstellung, IREES GmbH, Werte für 2018 auf Basis von AGEb (2020)

Mit Bezug auf die eingesetzten Energieträger führen die simulierten Investitionsentscheidungen unter Berücksichtigung der Instrumente und der angenommenen Rahmenbedingungen zu einer Verschiebung von Erdgas zu Wärmepumpen (Umgebungswärme und Strom<sup>71</sup>). Wärmepumpen haben im Jahr 2030 mit 73 TWh einen Anteil von rund 14 Prozent, dieser steigt bis 2040 auf 142 TWh und damit auf rund 35 %. Wärmepumpen stellen somit die wichtigste EE-Wärme-Technologie dar. In Summe erreicht die dezentrale EE-Wärme (Biomasse, Solarthermie und Umgebungswärme) bis 2030 einen Anteil von rund 28 % und bis 2040 einen Anteil von rund 49 % an der Wärmebereitstellung. Unter der Annahme, dass Strom in 2030 überwiegend aus erneuerbaren Quellen stammt, erreicht die dezentrale EE-Wärme in 2030 einen Anteil von 39 %. 2040 würden bereits rund 70 % erreicht.

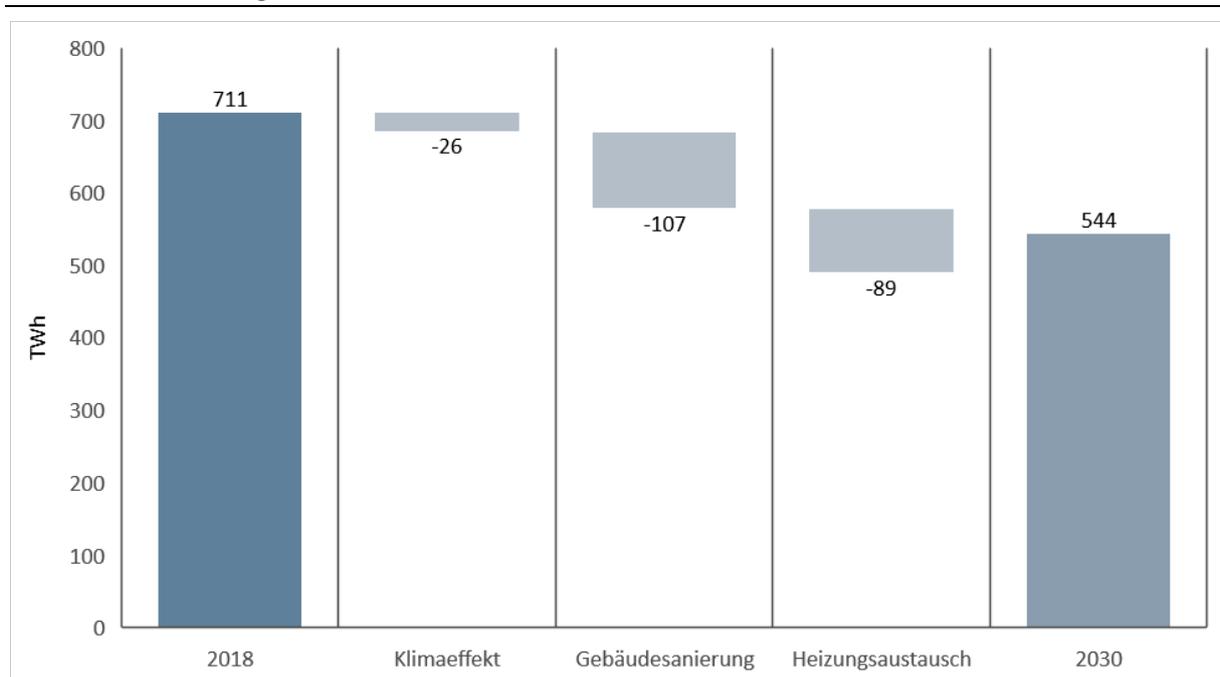
Aufgrund der Begrenzung des Einsatzes von Biomasse im Gebäudesektor ist der Zubau der Biomasse-Zentralheizungen nur gering. Da darüber hinaus angenommen wird, dass die Nutzung von Komfortheizungen bis 2030 rückläufig ist, reduziert sich der Einsatz von Biomasse für Raumwärme und Warmwasser.

<sup>71</sup> In Strom sind sowohl direktelektrische Anwendungen als auch Strom für Wärmepumpen enthalten, wobei Letzteres den größeren Anteil hat

Neben den Wärmepumpen wächst der Anteil der mit Solarthermie kombinierten Anlagen deutlich. Der Anteil von Fernwärme steigt dagegen nur leicht. Im Jahr 2030 trägt Fernwärme mit rund 50 TWh zu rund 9 % zum Endenergiebedarf bei. Der Anteil fossiler Heizkessel mit Erdgas und Heizöl an der Wärmeerzeugung liegt im Jahr 2030 mit 283 TWh noch bei 60 % und sinkt bis 2040 auf 78 TWh und erreicht einen Anteil von 19 %.

Die Dekomposition der Endenergiebedarfsreduktion zwischen 2018 und 2030 ist in Abbildung 54 dargestellt. Eine nähere Betrachtung der Modellergebnisse zeigt, dass allein durch höhere durchschnittliche Temperaturen durch die Klimaerwärmung eine Einsparung von 26 TWh pro Jahr bis zum Jahr 2030 erreicht wird. Den größten Effekt erzielen jedoch die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle, die zu 107 TWh Einsparungen pro Jahr führen. Daneben wird auch durch den Wechsel der Wärmeversorgungssysteme mit 89 TWh eine hohe Wirkung erzielt. Dabei ist vor allem der Zubau von Wärmepumpen durch die Nutzung von Umweltwärme für den Rückgang des Endenergiebedarfs verantwortlich, dabei ist zu beachten, dass der Zubau von Wärmepumpen maßgeblich für den Rückgang verantwortlich ist. Der Rest entfällt auf die Nutzung effizienterer Heizkessel bei Neuinstallation.

**Abbildung 54: Einfluss von Klimateffekt, Gebäudesanierung und Heizungsaustausch auf den Endenergiebedarf im KIS-2030**



Quelle: eigene Berechnung IREES

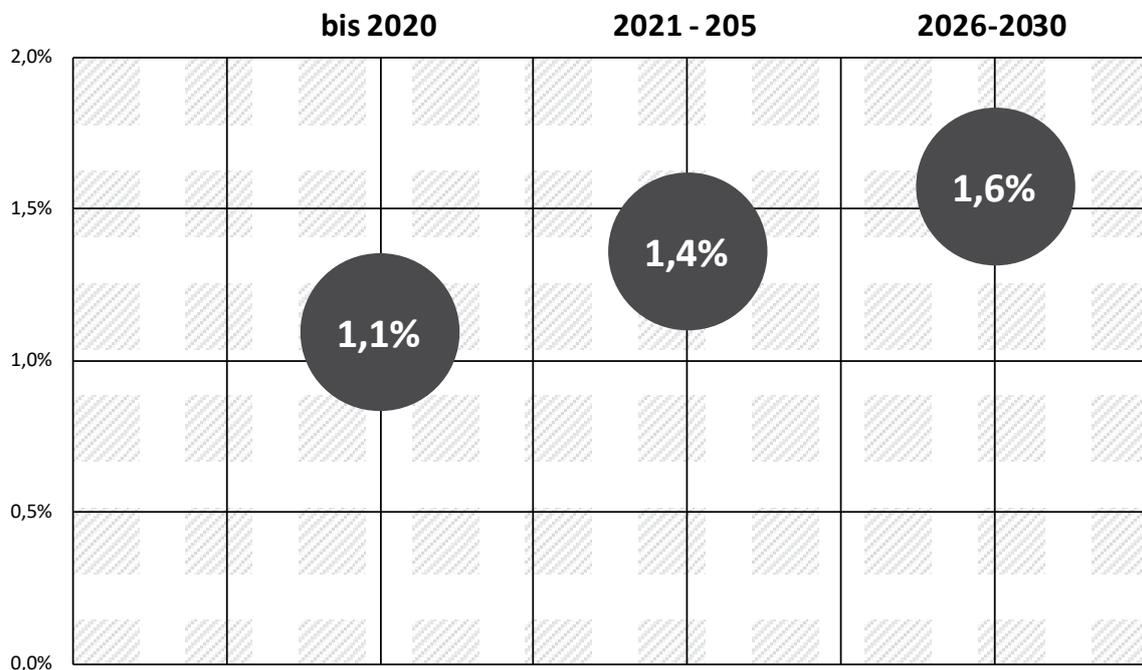
#### 8.3.4.1.2 Entwicklung der energetischen Sanierungsrate

Ein wichtiger Indikator zur Beurteilung der Aktivität im Gebäudebereich stellt die energetische Sanierungsrate dar. Für den Vergleich zu anderen Szenarien und empirischen Erhebungen ist dabei zu berücksichtigen, wie diese berechnet wird bzw. welche Sanierungsrate gemeint ist. Die hier dargestellte Sanierungsrate zeigt basierend auf den Modellergebnissen die Wohn- bzw. Nutzflächen-gewichtete Anzahl der sanierten Gebäude im Verhältnis zur flächengewichteten Gesamtzahl aller Gebäude in dem jeweiligen Simulationsjahr auf. Im Modell sind Sanierungsmaßnahmen jeweils Sanierungspakete aus Maßnahmen mit denen ein bestimmter Energiestandard –

verschiedenen Sanierungstiefen – erreicht wird. D.h. die modellierte Sanierungsrate entspricht am ehesten der Vollsanierungsrate<sup>72</sup>.

Abbildung 55 zeigt Entwicklung der Sanierungsrate im Gebäudesektor bis 2030. Bis zum Jahr 2020 (Modellierungszeitraum 2019 bis 2020) beträgt die Sanierungsrate 1,1 % und steigt anschließend im Zeitraum 2021 bis 2025 auf 1,4 % an. Im Zeitraum 2026 bis 2030 steigt die Sanierungsrate nochmals auf 1,6 % an.

**Abbildung 55: Entwicklung der energetischen Sanierungsrate im Gebäudesektor bis 2030**



Quelle: eigene Berechnungen, IREES

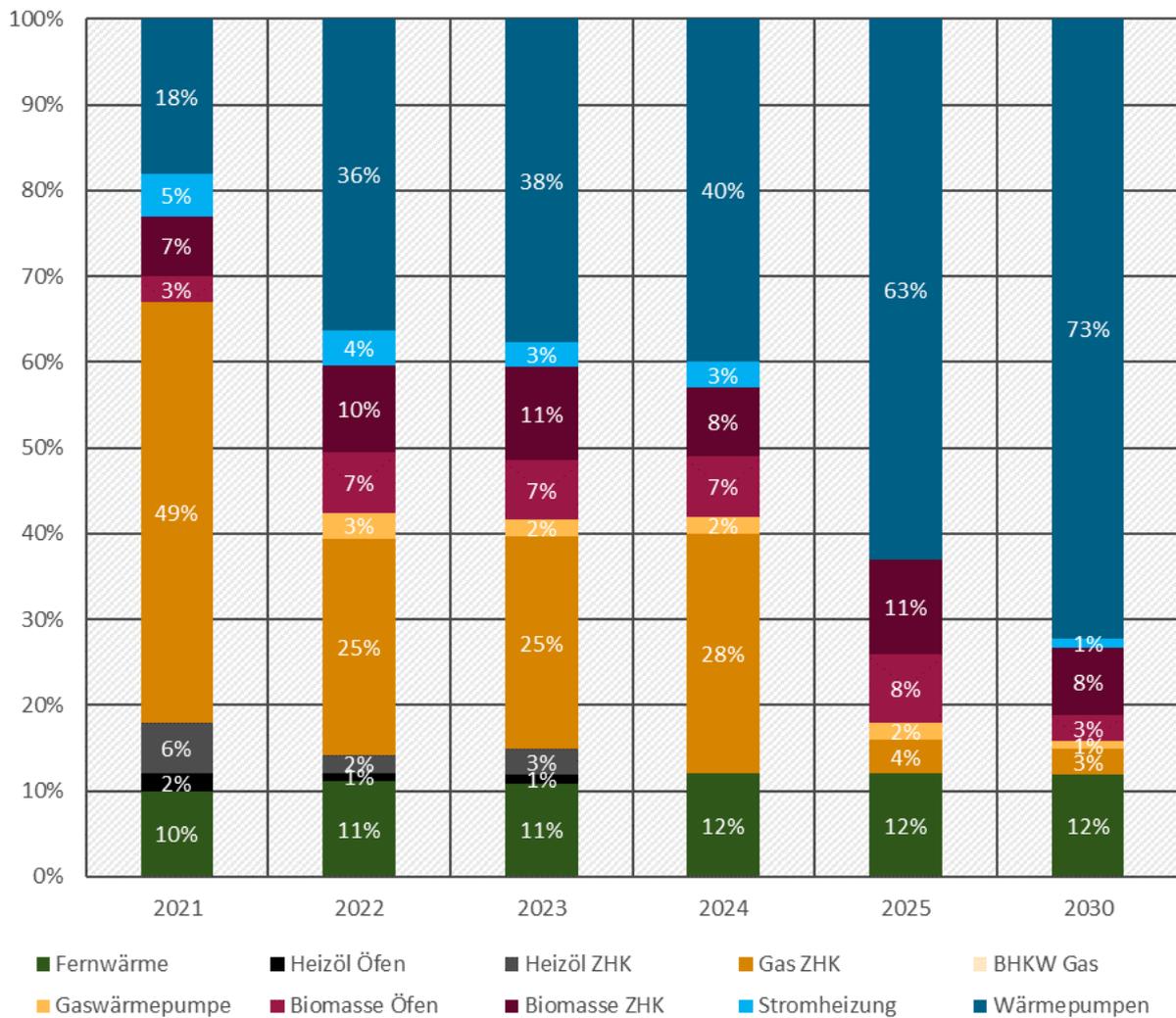
#### 8.3.4.1.3 Entwicklung der Marktanteile der installierten Wärmeversorgungssysteme

Abbildung 56 zeigt die Marktanteile der installierten Wärmeversorgungssysteme. Die Abbildung unterstreicht die Erkenntnisse aus der Betrachtung der Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern in Abbildung 53. Die Neuinstallationen von Gas-Zentralheizkessel (Gas-ZHK) sind bereits ab dem Jahr 2022 deutlich rückläufig, während der Zubau von Wärmepumpen deutlich steigt.

Ab dem Jahr 2025 ist ein weiterer Sprung im Zubau von Wärmepumpen zu sehen, der sich durch die Anforderung Wärmeversorgungssysteme mit einem Anteil von 65 Prozent EE-Wärme zu installieren (siehe Abschnitt 8.3.3.1.7), ergibt. Im Zuge dessen gehen die Neuinstallationen von Gas ZHK ab 2025 auf 4 Prozent zurück. Zudem erhöht sich der Zubau von Biomasse im Jahr 2025 nochmals.

<sup>72</sup> Eine offizielle Definition der Vollsanierungsrate gibt es nicht. Allerdings wird sich mit Bezug auf die derzeitige Sanierungsrate auf die Erhebung des Instituts für Wohnen und Umwelt zum Wohngebäudebestand bezogen. Dabei wird die ermittelte Vollsanierungsrate anhand aller durchgeführten Sanierungsmaßnahmen einzelnen Gewerke und gewichten diese zu einer äquivalenten Vollsanierungsrate für Deutschland. Siehe Cischinsky und Diefenbach (2018).

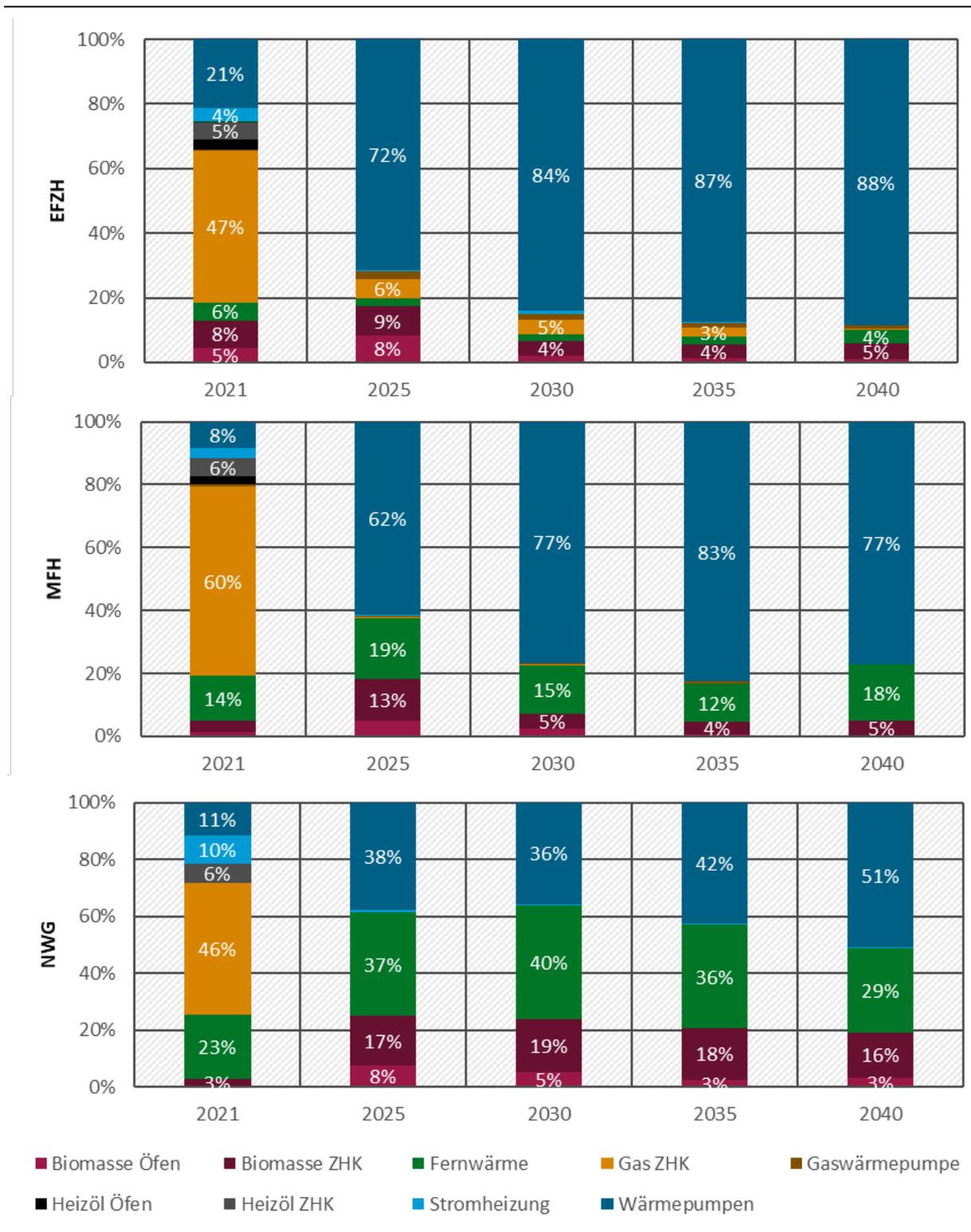
**Abbildung 56: Marktanteile der installierten Wärmeversorgungssysteme im KIS-2030, 2021-2030**



Quelle: eigene Berechnungen, IREES GmbH

Abbildung 57 zeigt darüber hinaus die Marktanteile nach Gebäudetypen. Es wird deutlich, dass Wärmepumpen vor allem in Ein- und Zweifamilienhäusern (EFZH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) zugebaut werden. In MFH und Nichtwohngebäuden (NWG) findet ab 2025 ein nahezu vollständiger Fuel-Switch von Erdgas hin zu Wärmepumpen und Fernwärme statt. In EFZH werden ab 2025 noch geringe Anteile von Gas-ZHK zugebaut. In NWG ist ab 2025 ein deutlicher Ausbau der Wärmenetzversorgung zu beobachten. Zudem ist der Anteil von Biomasse-Heizungen in NWG im Vergleich zu EFZH und MFH am höchsten.

**Abbildung 57: Marktanteile der installierten Wärmeversorgungssysteme nach Gebäudetypen, 2021-2040**



Quelle: eigene Berechnungen, IREES GmbH

#### 8.3.4.1.4 Bewertung der Einzelinstrumente

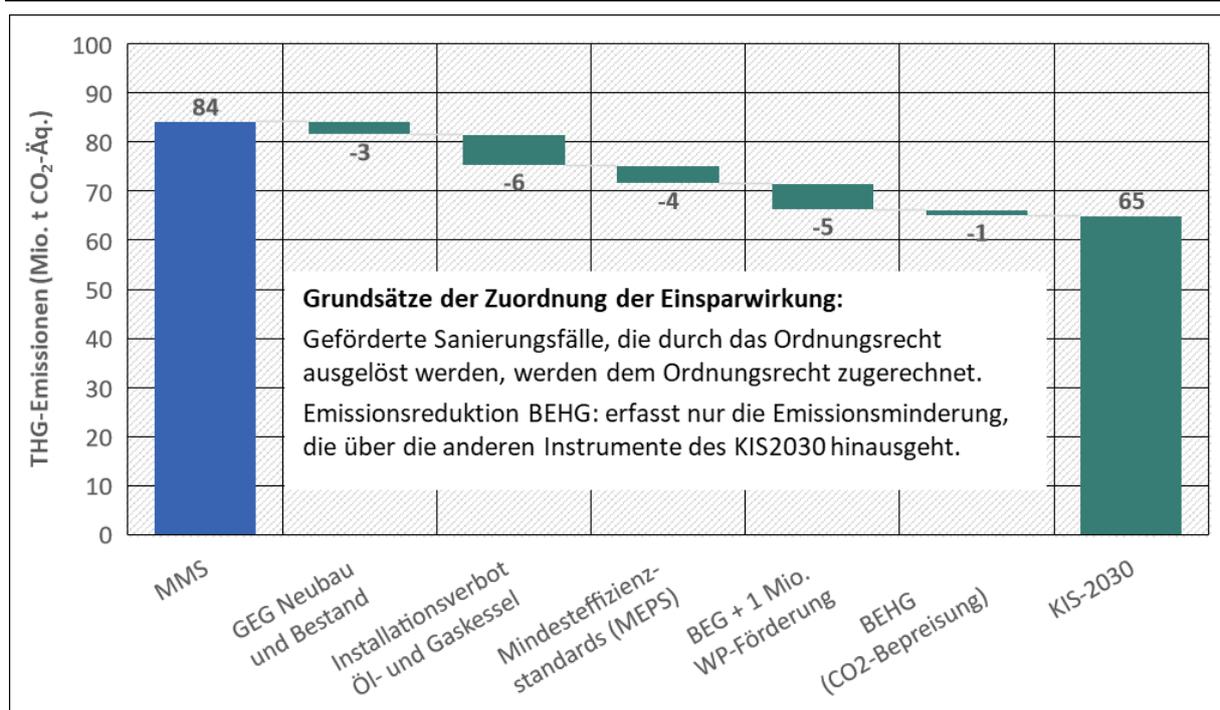
Abbildung 58 zeigt die Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 für das Jahr 2030 im Vergleich zum MMS. Dargestellt ist die Wirkung für den Bilanzraum der Raumwärme und Warmwasserversorgung. Dieser Bilanzraum ist ein Teilbereich des Gebäudesektors im Zuschnitt

des KSG. Die Bilanzierung erfolgt im Sinne der Quellenbilanz. Dies bedeutet, dass die Emissions-effekte, die aus einer Verschiebung des Endenergieträgermixes in Richtung Strom (Wärmepumpen) und Fernwärme folgen, im Umwandlungssektor (Energiewirtschaft) bilanziert werden. Der Klimateffekte ist in den Instrumentenwirkungen inkludiert.

Die Minderungswirkung einer Wärmeschutzmaßnahme an der Gebäudehülle oder des Austauschs eines fossilen Heizkessels zu Gunsten erneuerbarer Wärmetechnologie resultiert in der Regel aus einem Zusammenspiel verschiedener Instrumente. Eine einfache Aufsummierung der Bruttowirkungen einzelner Instrumente würde also zu einer Überschätzung der Gesamtwirkung des unterstellten Instrumentenbündels führen. Vielmehr muss die Bündelwirkung um Überschneidungseffekte „bereinigt“ werden. Darüber hinaus bedarf es eindeutiger Allokationsgrundsätze, wie die Einsparwirkung einer Sanierungsmaßnahme auf die verschiedenen Instrumente, die die Maßnahme im Zusammenspiel gemeinsam ausgelöst haben, aufgeteilt wird. Dies gilt insbesondere für das Zusammenspiel von Ordnungsrecht und Förderung. In der hier gewählten Methodik wird bei der Einzelinstrumentenbewertung die Einsparwirkung geförderter Sanierungsfälle, die durch das Ordnungsrecht ausgelöst werden, dem Ordnungsrecht zugerechnet. Die in Abbildung 58 ausgewiesene Minderungswirkung des BEG erfasst demnach nur Einsparmaßnahmen, die über die Wirkung der ordnungsrechtlichen Instrumente (v.a. Kesselverbote, MEPS) hinausgehen.

Vergleichbares gilt für die CO<sub>2</sub>-Bepreisung des BEHG. Im Sinne des Verständnisses, dass die CO<sub>2</sub>-Bepreisung in Form des damit verbundenen Preissignals vor allem als Türöffner für die anderen Instrumente dient, erfasst die in Abbildung 58 ausgewiesene Minderungswirkung des BEHG „nur“ die Emissionsminderung, die über die anderen Instrumente des KIS-2030 hinausgeht.

**Abbildung 58: Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 im Jahr 2030 im Vergleich zum MMS (Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser)**

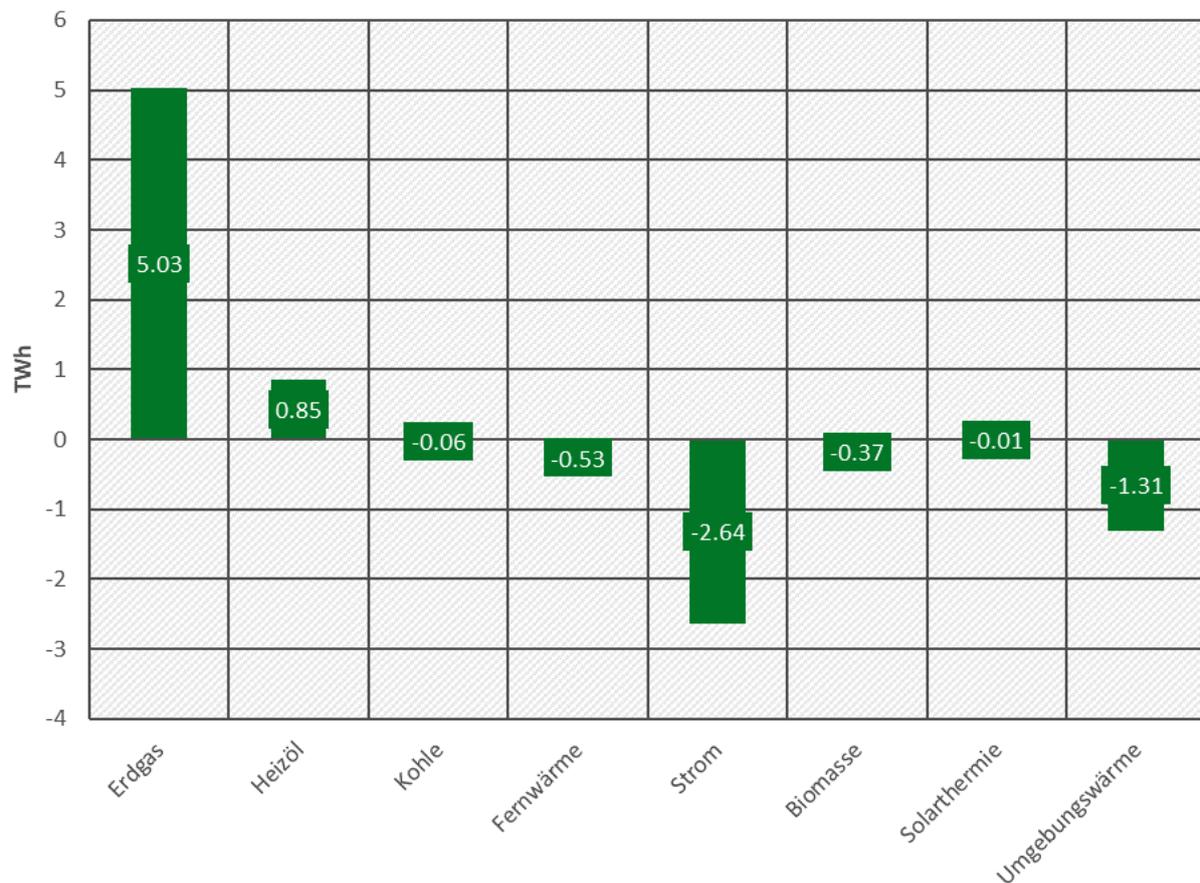


Quelle: eigene Berechnungen, des Öko-Instituts

### 8.3.4.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Abbildung 53 die Differenz des Endenergieverbrauchs zwischen der BEHG-Sensitivität und des KIS-2030 im Jahr 2030. Es wird deutlich, dass sich durch die niedrigeren CO<sub>2</sub>-Preise der Ausbau von Wärmepumpen verlangsamt. Im Jahr 2030 verbleibt mehr Erdgas zur Deckung des Endenergiebedarfs, während weniger Wärmepumpen (Strom und Umgebungswärme) zur Deckung eingesetzt werden.

**Abbildung 59: Differenz des Endenergieverbrauchs zwischen der BEHG-Sensitivität und des KIS-2030 im Jahr 2030**



Quelle: eigene Berechnungen, IREES GmbH

Aufgrund des langsameren Ausbaus der Wärmepumpen bis 2030 ergeben sich in der BEHG-Sensitivität höhere Treibhausgasemissionen von 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (siehe auch Abschnitt 8.6.2.).

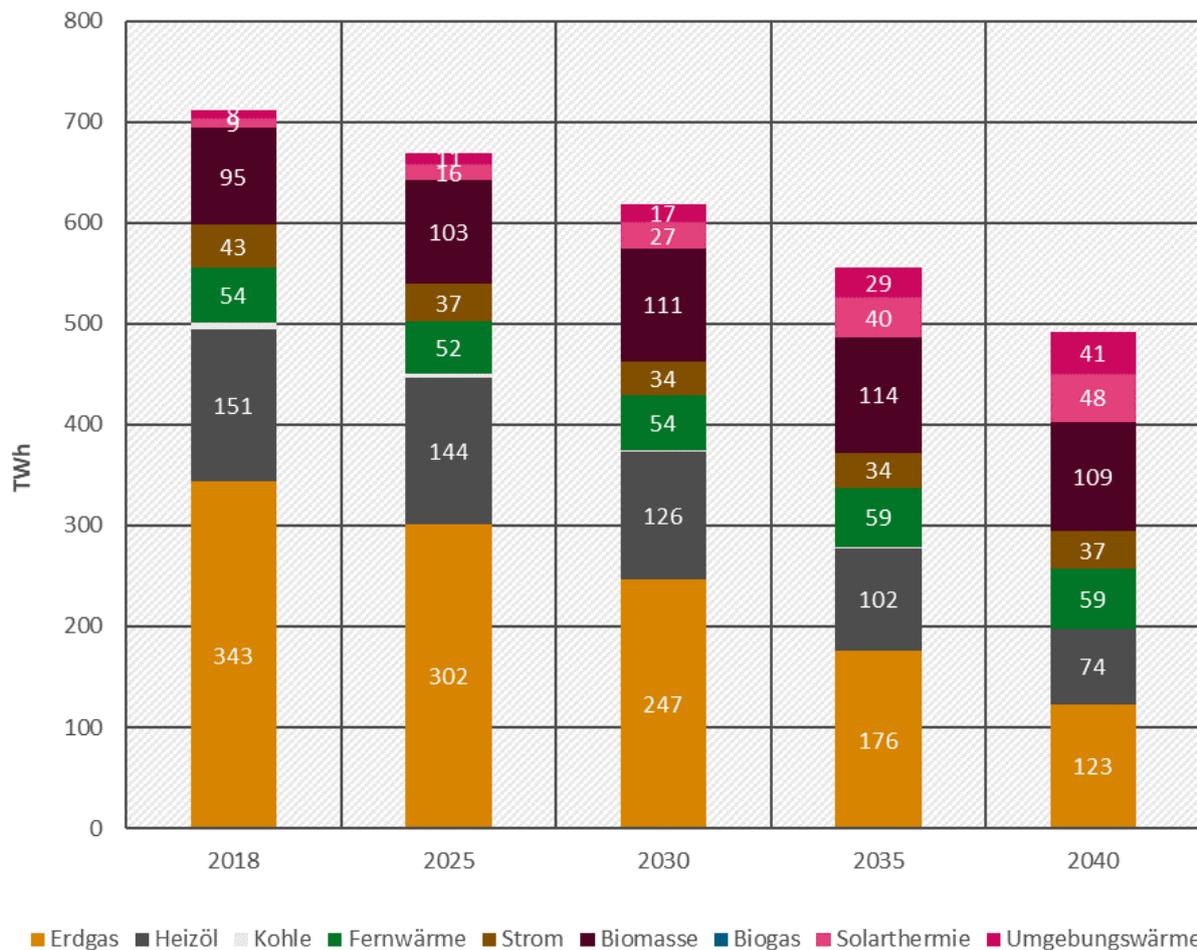
Die Dynamik in der Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2040 ist auf die Angleichung der CO<sub>2</sub>-Preise in der BEHG-Sensitivität und im KIS-2030 ab dem Jahr 2030 zurückzuführen. Aufgrund höherer CO<sub>2</sub>-Preise steigt die Wirtschaftlichkeit für erneuerbare Wärmeversorgungstechnologien sowie die Sanierungsaktivität.

### 8.3.4.3 MMS

Abbildung 60 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern für Raumwärme und Warmwasser im MMS, wie im Projektionsbericht 2021 dargestellt. Mit Bezug auf die eingesetzten Energieträger führen die simulierten Investitionsentscheidungen zu einem Ausbau

von Wärmepumpen (Strom<sup>73</sup> und Umgebungswärme) und Biomasse. Bis 2030 erreicht EE-Wärme einen Anteil von 25 Prozent an der Wärmebereitstellung. Bis 2040 kann dieser mit den bestehenden Instrumenten auf 40 Prozent erhöht werden. Dagegen ist der Anteil von Heizöl und Erdgas am Endenergieverbrauch über den simulierten Zeitraum rückläufig. Im Jahr 2030 haben fossile Brennstoffe jedoch noch einen Anteil von 60 Prozent am gesamten Energieverbrauch.

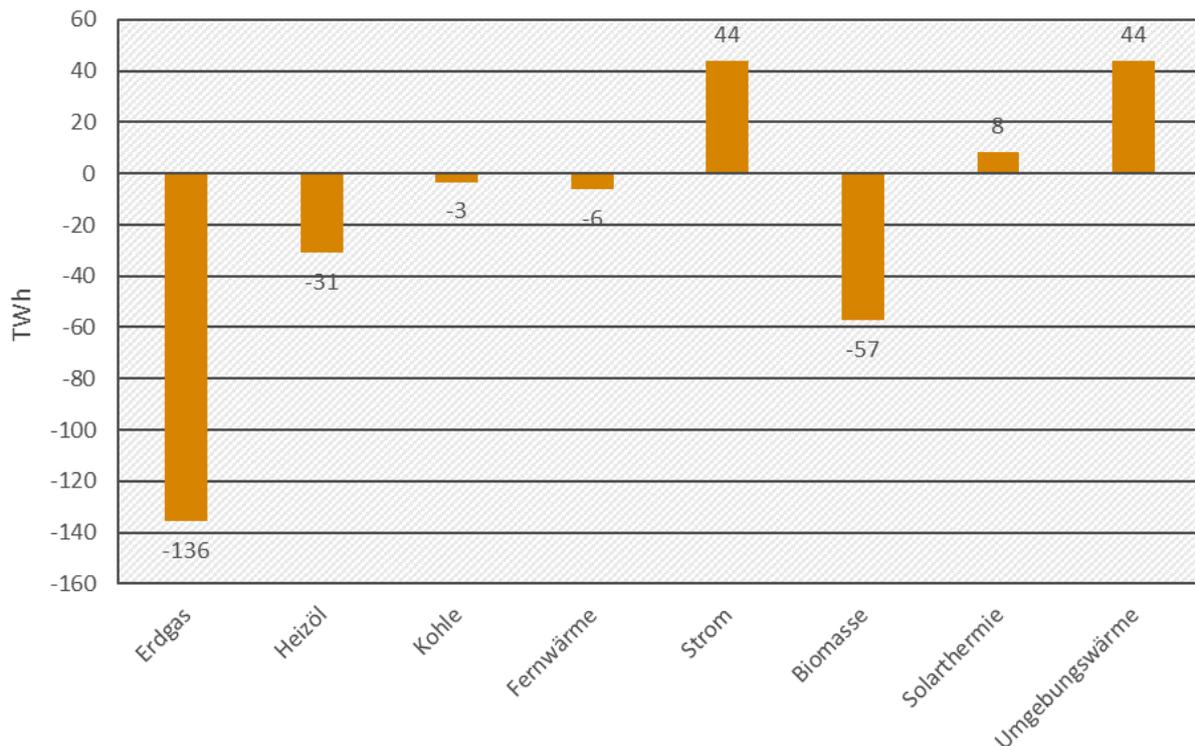
**Abbildung 60: Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im MMS, 2018-2040**



Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

Abbildung 61 zeigt die kumulierte Differenz des Endenergiebedarfs im KIS-2030 im Vergleich zum MMS bis zum Jahr 2030. Es wird deutlich, dass mit den zusätzlichen Instrumenten (siehe Abschnitt 8.3.3.1) ein deutlich schnellerer Umbau der Wärmeversorgung stattfindet. Bis 2030 ist der Einsatz fossiler Brennstoffe um rund 170 TWh geringer als im MMS.

<sup>73</sup> In Strom sind sowohl direktelektrische Anwendungen als auch Strom für Wärmepumpen enthalten, wobei Letzteres den größeren Anteil hat.

**Abbildung 61: Differenz des kumulierten Endenergiebedarfs im KIS-2030 zum MMS bis zum Jahr 2030**

Quelle: eigene Berechnung, IREES GmbH

#### 8.3.4.4 Vergleich der Szenarien

Tabelle 83 zeigt einen Vergleich der Szenarien nach verschiedenen Parametern. Hinsichtlich des Endenergiebedarfs wird im KIS-2030 und in der BEHG-Sensitivität ein deutlich höherer Rückgang erzielt als im MMS. Der höhere Rückgang des Endenergiebedarfs in den Szenarien ist vor allem auf die Gebäudesanierung und Heizungsaustausch zurückzuführen. Vor allem im Zeitraum bis 2030 ist im KIS-2030 eine deutlich höhere Dynamik aufgrund der Weiterentwicklung der energetischen Standards (siehe Abschnitt 8.3.3.1) festzustellen. Die Auswirkungen höherer Temperaturen aufgrund des Klimawandels sind dagegen in allen drei Szenarien vergleichbar.

Der Anteil erneuerbarer Wärme an der Endenergiebereitstellung ist durch die Forcierung des Ausbaus erneuerbarer Technologien im KIS-2030 ebenfalls deutlich höher als im MMS. Allerdings nimmt die Dynamik im KIS-2030 und der BEHG-Sensitivität erst bis 2040 deutlich zu. Diese Entwicklung wird auch im Wärmepumpen-Zubau dargestellt. Bis 2040 werden im KIS-2030 und in der BEHG-Sensitivität ein Vielfaches mehr Wärmepumpen installiert als im MMS.

**Tabelle 83: Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser im Gebäudebereich - Vergleich der Szenarien nach verschiedenen Parametern**

	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Rückgang des Endenergiebedarfs ausgehend von 2018</b>					
MMS		6 %	13 %	22 %	31 %
KIS-2030		11 %	24 %	34 %	43 %
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)		11 %	23 %	34 %	43 %

		2018	2025	2030	2035	2040
<b>Anteil erneuerbarer Wärme an der Endenergiebedarfbereitstellung</b>						
MMS		16 %	19 %	25 %	33 %	40 %
KIS-2030		16 %	19 %	28 %	40 %	49 %
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)		16 %	19 %	27 %	40 %	49 %
<b>Differenz der Treibhausgasemissionen für den Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser ggü. MMS</b>						
KIS-2030	CO <sub>2</sub> -Äq		-6,5	-19,6	-26,0	-25,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	CO <sub>2</sub> -Äq		-5,9	-18,4	-25,7	-24,5
<b>Änderung Endenergieverbrauch Gebäudesektor im Vergleich zu 2018 durch:</b>						
<i>Gebäudesanierung</i>						
MMS	TWh		-19,3	-46,0	-81,7	-124,7
KIS-2030	TWh		-50,5	-107,0	-164,0	-215,5
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	TWh		-50	-105,4	-162,9	-214,3
<i>Heizungsaustausch</i>						
MMS	TWh		-8,8	-29,3	-59,6	-86,1
KIS-2030	TWh		-34,9	-88,9	-139,7	-162,8
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	TWh		-36,1	-86,5	-141,0	-164,1
<i>Klimaeffekt</i>						
MMS	TWh		-16,7	-27,1	-35,5	-42,0
KIS-2030	TWh		-17,0	-26,4	-34,5	-39,9
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	TWh		-17,8	-27,2	-34,1	-39,5
<b>Anzahl Wärmepumpen<sup>74</sup></b>						
MMS	Mio.		0,36	0,88	1,73	2,93
KIS-2030	Mio.		1,76	5,87	10,85	14,77
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	Mio.		1,58	5,55	10,62	14,52
<b>Sanierungsrate</b>						
MMS			0,8 %	1,3 %	1,8 %	2,0 %
KIS-2030			1,4 %	1,6 %	1,6 %	1,5 %
KIS-2030 (BEHG Sensitivität)				1,4 %	1,5 %	1,6 %

Quelle: eigene Berechnungen, IREES GmbH

<sup>74</sup> Kumulierte absolute Anzahl an installierten Wärmepumpen

## 8.4 Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung

### 8.4.1 Methodik

Die verwendete Methodik entspricht der des Projektionsberichtes 2021 (Öko-Institut et al. 2021) und ist dort ausführlich beschrieben. Sie hat sich im Vergleich zum MMS nicht verändert. Es wurden lediglich zusätzlich die neuen Instrumente modelliert. Für die Modellierung wurde, wie im MMS und den Vorgängerprojekten, das bottom-up-Nachfragemodell FORECAST-Residential Appliances des Fraunhofer ISI genutzt (s. Anhang B.5). Wie das Industriemodell ist auch FORECAST-Residential auf die Energiebilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (AGEB 2022) kalibriert. Treibhausgasemissionsminderungen aufgrund von Stromeinsparungen werden in der Energiewirtschaft bzw. in der Industrie (d.h. für öffentliche bzw. Industriekraftwerke) bilanziert. Alle drei Instrumente, Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung, Verschärfte Mindeststandards und der Wechsel von Erd- zu Biogas, wurden bottom-up modelliert, d. h. es wurden die direkten Auswirkungen dieser Instrumente auf die individuellen Kaufentscheidungen und die daraus resultierenden veränderten Energiebedarfe quantifiziert.

### 8.4.2 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Änderungen gegenüber dem Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) wurden nur für die zusätzlichen Instrumente des KIS-2030 vorgenommen. Diese sind im folgenden Abschnitt dargestellt. Bezüglich der Anzahl der unterschiedlichen Haushaltsgeräte im Bestand wurden die gleichen Bestands- und Entwicklungsannahmen zu Grunde gelegt wie im MMS des Projektionsberichtes 2021 (Öko-Institut et al. 2021)

### 8.4.3 Instrumente und deren Parametrisierung

#### 8.4.3.1 KIS-2030

Das MMS diente als Ausgangslage für die Modellierung des KIS-2030. Neben den im MMS bereits modellierten Instrumenten, sind im KIS-2030 zusätzlich die folgenden drei Instrumente quantifiziert:

- ▶ Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung
- ▶ Ambitioniertere Ausgestaltung der Mindeststandards unter der EG-Ökodesign-Richtlinie
- ▶ Nutzungspflicht von Biogas für Gasherde

#### 8.4.3.1.1 Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung

Die Reform der Energiebesteuerung wurde bereits bei den sektorübergreifenden Instrumenten in Abschnitt 5.1 beschrieben und parametrisiert. Diese Parametrisierung wird auch im Haushaltssektor umgesetzt.

#### 8.4.3.1.2 Ambitioniertere Ausgestaltung der Mindeststandards unter der EG-Ökodesign-Richtlinie

Die Verschärfung der Mindeststandards (Minimum Energy Performance Standards - MEPS) wirkt insbesondere bei der Weißen Ware. Hier sind die Lebenszyklen in der Regel länger und die technischen Fortschritte langsamer im Vergleich zu den IKT-Endgeräten. Durch steuernde Mindeststandards kann hier der Energiebedarf der Neugeräte gegenüber dem MMS gesenkt werden. Die entsprechenden Annahmen für die spezifischen Verbräuche bis zum Jahr 2030 und darüber hinaus sind in Tabelle 84 zusammengefasst.

**Tabelle 84: Erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauches elektrischer Geräte in privaten Haushalten im KIS-2030, 2015-2040**

Spezifischer Geräteverbrauch	2015	2018	2020	2025	2030	2035	2040
	kWh/ Gerät	Veränderung gegenüber 2015 in %					
<b>Große elektrische HH-Geräte</b>							
Kühlschränke	223,4	-10,5	-17,6	-27,0	-32,3	-34,5	-36,5
Gefrierschränke	232,0	-8,3	-13,9	-27,2	-33,7	-35,9	-37,8
Waschmaschine	163,3	-5,2	-8,7	-17,2	-23,3	-25,8	-28,0
Geschirrspüler	363,6	-4,8	-7,9	-12,4	-16,7	-19,2	-22,1
Trockner	211,1	-10,8	-17,1	-30,0	-36,6	-38,7	-40,4
Elektroherd	771,2	-1,6	-3,4	-7,1	-10,7	-14,8	-16,1
<b>IKT-Endgeräte</b>							
Desktop-PC	58,4	-1,2	-2,7	-7,2	-11,1	-11,1	-11,1
Computer-Bildschirm	36,5	-9,6	-19,5	-36,7	-39,2	-39,2	-39,2
Laptops	30,1	0,7	2,0	1,3	-1,0	-1,0	-1,0
Fernseher	146,4	-0,8	0,9	4,2	2,5	-3,4	-8,5
Set-Top-Boxen	50,2	0,8	1,2	1,4	1,4	0,2	0,0
Router	71,2	-1,1	-3,8	-9,3	-13,3	-13,3	-13,3
<b>Beleuchtung pro Haushalt</b>	<b>192,5</b>	<b>-19,1</b>	<b>-30,8</b>	<b>-49,5</b>	<b>-64,8</b>	<b>-69,0</b>	<b>-68,6</b>
<b>Klimaanlage</b>	<b>381,1</b>	<b>-4,2</b>	<b>-3,9</b>	<b>3,6</b>	<b>10,3</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>

Quellen: Barthel et al. (2010), BITKOM (2008), EuP Preparatory Studies Lot 10 (2008), Institut für System- und Innovationsforschung (2009), GfK (2002-2010), ZVEI (2006-2009), StBA (2010), StBA (2014), Fraunhofer IZM (2015), Van Holsteijn en Kemna B.V. et al. (2014), Schätzungen Fraunhofer ISI

#### 8.4.3.1.3 Nutzungspflicht von Biogas für Gasherde

Der einzige nicht strombedingte Energiebedarf für private Haushaltsgeräte entsteht durch das Kochen mit Gasherden. Der Energiebedarf von Gasherden beträgt derzeit rund 4 TWh und wird durch Erdgas bereitgestellt. Das Instrument sieht vor, dass zwischen 2025 und 2030 ein vollständiger Umstieg von Erd- auf Biogas vollzogen wird und im Jahr 2030 die Nutzung von Erdgas für das Kochen in Privathaushalten verboten wird. Dies betrifft sowohl Gasherde als auch Gasgrills. Gleichzeitig wird der Umstieg auf Elektroherde durch die energieeffizienten Induktionsherde gefördert. Während zweiteres zu Energieeinsparungen führt, führt die reine Umstellung von Erd- auf Biogas nicht zu Energieeinsparungen, jedoch zu Emissionsminderung. Diese Minderung wird entsprechend in der Energiewirtschaft bzw. in der Industrie bilanziert.

#### 8.4.3.2 MMS

Im zuvor veröffentlichten MMS des Projektionsberichts 2021 wurden die folgenden Instrumente berücksichtigt:

- a) Ökologische Steuerreform

- b) EEG-Umlagensenkung
- c) Mindeststandards (EG-Ökodesign-Richtlinie)
- d) EU-Energielabel – EU-Verordnung zur Energieverbrauchskennzeichnung
- e) Pilotprogramm Einsparzähler
- f) Beratung einkommensschwacher Haushalte (Stromsparcheck)
- g) freiwillige Produktkennzeichnung für energierelevante Produkte
- h) Infokampagne für das neue EU-Energielabel
- i) Einführung intelligenter Messgeräte (Smart Meter) zur Stromverbrauchsmessung

Eine Beschreibung der Instrumente sowie deren Parametrisierung kann Öko-Institut et al. (2021) entnommen werden.

#### 8.4.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden, ergänzend zu den oben dargestellten Instrumentenbewertungen, die Szenarienergebnisse ausführlicher dargestellt. Hierzu werden die Strombedarfe der einzelnen Anwendungen im Detail präsentiert. Nachdem im nächsten Abschnitt die Ergebnisse des KIS-2030 dargestellt sind, werden zu Vergleichszwecken die Ergebnisse des MMS kurz zusammengefasst. Eine ausführlichere Darstellung der MMS-Ergebnisse finden sich im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. (2021)) wieder.

Wichtig ist hierbei zu beachten, dass diese nicht den gesamten Strombedarf privater Haushalte umfassen, da insbesondere durch zunehmende Elektrifizierung neue Stromverbraucher in den Haushalten hinzukommen. Diese sind jedoch, entsprechend ihrer Anwendung, in anderen Sektoren quantifiziert; so beispielsweise Wärmepumpen unter Wärmebedarf im Gebäudebereich und Elektrofahrzeuge im Verkehrssektor.

##### 8.4.4.1 KIS-2030

Tabelle 85 gibt einen Überblick über die Entwicklung des Strombedarfes privater Haushaltsgeräte bis 2040 im KIS-2030. Die Haushaltsgeräte verzeichnen insgesamt einen kontinuierlichen Rückgang im Strombedarf ab 2018 wobei sich substantielle Unterschiede für die unterschiedlichen Produktgruppen ergeben. Die Produktgruppe der Weißen Ware bedingt den größten Anteil des Strombedarfes. Gleichzeitig verzeichnet sie von 2018 bis 2030 den größten absoluten Rückgang des Strombedarfes um 5,3 TWh und (nach der Beleuchtung) mit rund 15 % den zweitgrößten relativen Rückgang. Diese Reduktion ist deutlich stärker als im MMS des Projektionsberichtes 2021 (Öko-Institut et al. (2021)) und ist durch das Instrument der verschärften Mindeststandards begründet. Diese wirken insbesondere auf die Weiße Ware, da diese in der Regel längere Lebensdauern als die kleineren Endgeräte aufweisen und weniger von Trends bestimmt werden als beispielsweise Endgeräte im IKT-Bereich. Der Strombedarf der Beleuchtung sinkt relativ gesehen am stärksten, um 55 % bis 2030. Dies entspricht 3,6 TWh. Der sonstige Strombedarf, welcher kleinere Haushaltsgeräte wie Toaster, Föhne, und ähnliches umfasst, sinkt ebenfalls leicht um 2,2 TWh (11 %). Die weiteren Produktgruppen verzeichnen bis 2030 einen Anstieg des Strombedarfes. Bei den Elektroherden kommt es zwar zu Effizienzgewinnen von mehr als 10 % gegenüber 2015 (siehe Tabelle 84), gleichzeitig steigt die Anzahl der Elektroherde durch den Wechsel von Gasherden zu Elektroherden leicht an. Dies führt zu einem leichten Anstieg des Strombedarfes für Elektroherde um 1 TWh bis 2030 (6 %). Die Anzahl der IKT-Geräte und deren Leistung nimmt auch im KIS-2030 weiterhin substantiell zu. Dies zeigt sich in Tabelle 84 durch eine vergleichsweise geringe Reduktion des spezifischen Geräteverbrauches, insbesondere bei

Desktop-PCs (~-11 %), Laptops (~-1 %) und Set-Top-Boxen (0 %). Somit können auch die Effizienzgewinne einen Strommehrbedarf um 8 % (1,5 TWh) bis 2030 nicht vermeiden können. Während der Anstieg bei Elektroherden und IKT-Endgeräten moderat zunimmt, steigt der Strombedarf für mobile Klimaanlage substantiell (von niedrigem Bedarf aus startend) an. Er wächst bis 2030 um 150 % auf 2,6 TWh an. In der Gesamtschau führen diese gegenläufigen Entwicklungen zu einer Reduktion des Strombedarfes von Haushaltsgeräten um 7 TWh von 100,3 TWh auf 93,3 TWh zwischen 2018 und 2030. Die Reduktion beträgt somit 7 %.

**Tabelle 85: Entwicklung des Strombedarfes privater Haushalte 2018–2040 im KIS-2030**

Stromverbrauch KIS-2030	2018	2020	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Weißer Ware	36,4	35,2	32,7	31,1	30,8	30,3
Elektroherd	17,8	18,4	19,7	18,8	17,8	17,4
IKT-Endgeräte	17,4	17,9	18,7	18,9	18,9	18,9
Beleuchtung	6,5	5,6	4,2	2,9	2,6	2,7
Klimaanlage	1,0	1,2	1,9	2,6	3,1	3,4
Sonstiger Strom	21,2	21,0	19,9	19,0	18,5	18,0
<b>Summe</b>	<b>100,3</b>	<b>99,3</b>	<b>97,0</b>	<b>93,3</b>	<b>91,7</b>	<b>90,8</b>

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Die zu Anfang dieses Kapitels gezeigte Tabelle 77 zeigt die Minderung des Strombedarfes von Haushaltsgeräten im KIS-2030 gegenüber dem MMS. Im Vergleich zum MMS wirken im KIS-2030 zwei zusätzliche Instrumente auf den Strombedarf von Haushaltsgeräten. Die übergreifend wirkende Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung führt in privaten Haushalten zu leicht sinkenden Stromkosten und dadurch zu minimal steigendem Strombedarf um 0,1 TWh im Jahr 2030. Gleichzeitig wirkt die Verschärfung der MEPS bedarfsmindernd und senkt den Strombedarf in 2030 um 1,6 TWh.

**Tabelle 86: Gasbedarf des Kochens privater Haushalte 2018–2040 im KIS-2030**

Stromverbrauch KIS-2030	2018	2020	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Erdgas	4,3	3,9	2,7	0,0	0,0	0,0
Biogas	0,0	0,0	0,3	3,0	3,0	3,0

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Zusätzlich zum leicht gesunkenen Strombedarf entstehen Energieeinsparungen (Tabelle 86) sowie Emissionsminderungswirkungen (Tabelle 78) durch das Instrument des Wechsels von Erdgas zu Biogas. Der gesamte Gas-Energiebedarf für das Kochen lag 2018 bei 4,3 TWh, dieser wird bis 2030 auf 3 TWh gesenkt, welche bis dann gänzlich durch Biogas bereitgestellt werden. Dies entspricht im Jahr 2030 einer Emissionsminderung von 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq gegenüber dem MMS.

#### 8.4.4.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Die Berechnung der BEHG-Sensitivität führt zu einem um 1,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq höheren Emissionsausstoß im Wohngebäudesektor als das reine KIS-2030 Szenario. Der Anteil der fossilen Energieträger in den Haushalten auf den diese Sensitivität wirkt, beschränkt sich auf die Gasherde, welche lediglich 0,2 % der fossilen Energieträger in den Wohngebäuden ausmachen. Da die Emissionswirkung der Haushaltsgeräte somit nur etwa 0,002 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq beträgt, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Darstellung verzichtet. Die entsprechende Sensitivität ist in der Tabelle im Anhang A.2 abgebildet.

#### 8.4.4.3 MMS

Um die zusätzlichen Einsparungen des KIS-2030 einordnen zu können, werden im Folgenden kurz die Ergebnisse des im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. (2021)) veröffentlichten MMS vorgestellt. Für eine umfangreichere Ausführung und Einordnung sei an dieser Stelle auf Öko-Institut et al. (2021) verwiesen. In Tabelle 87 ist der Strombedarf für Haushaltsgeräte im MMS des Projektionsberichtes 2021 dargestellt. Im MMS ist zwischen 2018 und 2030 ein Rückgang des Strombedarfes um 5,5 TWh und 5,5 % zu verzeichnen.

**Tabelle 87: Entwicklung des Stromverbrauches privater Haushalte 2010–2040 im MMS**

Stromverbrauch MMS	2018	2020	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Weißer Ware	36,4	35,2	32,6	32,7	32,8	32,7
Elektroherd	17,8	18,4	19,7	18,8	17,8	17,4
IKT-Endgeräte	17,4	17,9	18,7	18,9	18,8	18,7
Beleuchtung	6,5	5,6	4,2	2,9	2,6	2,7
Klimaanlage	1,1	1,2	1,9	2,6	3,1	3,4
Sonstiger Strom	21,2	21,0	19,9	19,0	18,5	18,0
<b>Summe</b>	<b>100,4</b>	<b>99,3</b>	<b>97,0</b>	<b>94,8</b>	<b>93,6</b>	<b>92,9</b>

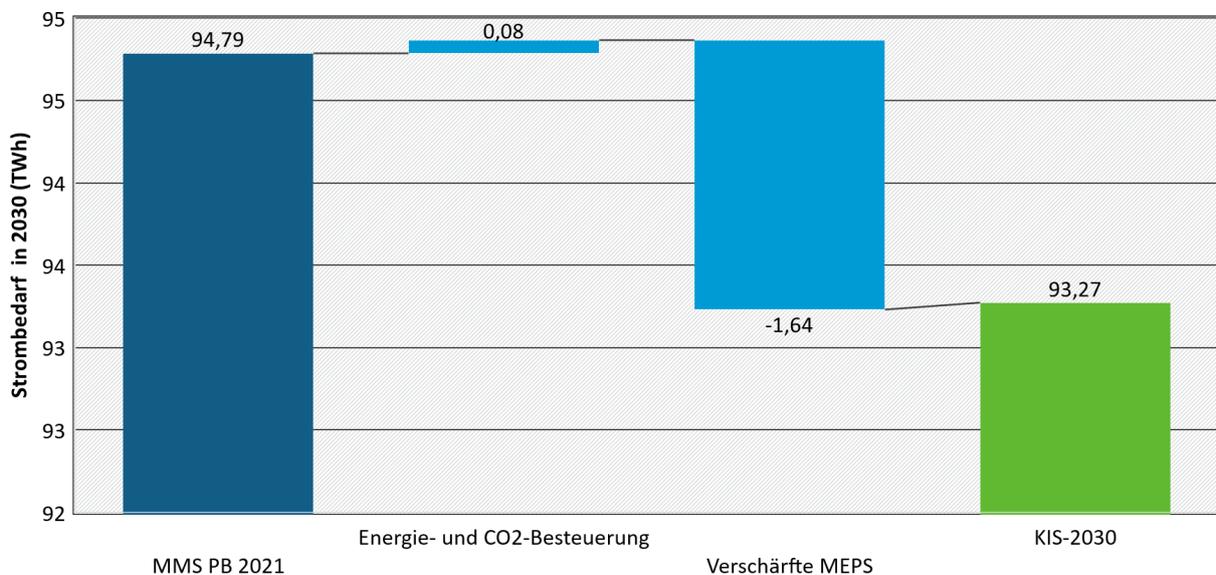
Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI in Öko-Institut et al. (2021)

Im Projektionsbericht 2021 wird die Entwicklung im MMS wie folgt zusammengefasst (Öko-Institut et al. (2021), S. 219): „Bei der weißen Ware wird insgesamt von einer relativ gleichbleibenden Ausstattungsrate ausgegangen, lediglich der Anteil der Trockner wird sich voraussichtlich in den kommenden Jahren noch leicht weiter erhöhen. Bei der weißen Ware ist der zu erwartende Rückgang des Stromverbrauchs durch Effizienzsteigerungen so groß, dass er den zusätzlichen Stromverbrauch zukünftiger Geräte, durch die größere Anzahl an Haushalten, überkompensiert. Gegenteiliges ist bei den IKT-Endgeräten der Fall: Trotz des teils beträchtlichen Rückgangs des spezifischen Energieverbrauchs der meisten IKT-Geräte führen die angenommenen höheren Ausstattungsraten zu einem leichten Anstieg des Energieverbrauchs. Im Beleuchtungsbereich führt der Wechsel zu LED-Beleuchtung zu deutlich niedrigeren spezifischen Verbräuchen, bei etwa gleichbleibenden Ausstattungsraten, wodurch der Stromverbrauch hier kontinuierlich abfällt. Im Gegensatz dazu wird bei den Klimageräten sowohl von einem deutlichen Anstieg der Ausstattungsraten als auch von höheren spezifischen Verbräuchen durch mehr Leistungsfähigkeit ausgegangen. In Folge dessen wird der Stromverbrauch für Klimaanlagen bis 2040 deutlich ansteigen.“

#### 8.4.4.4 Vergleich der Szenarien

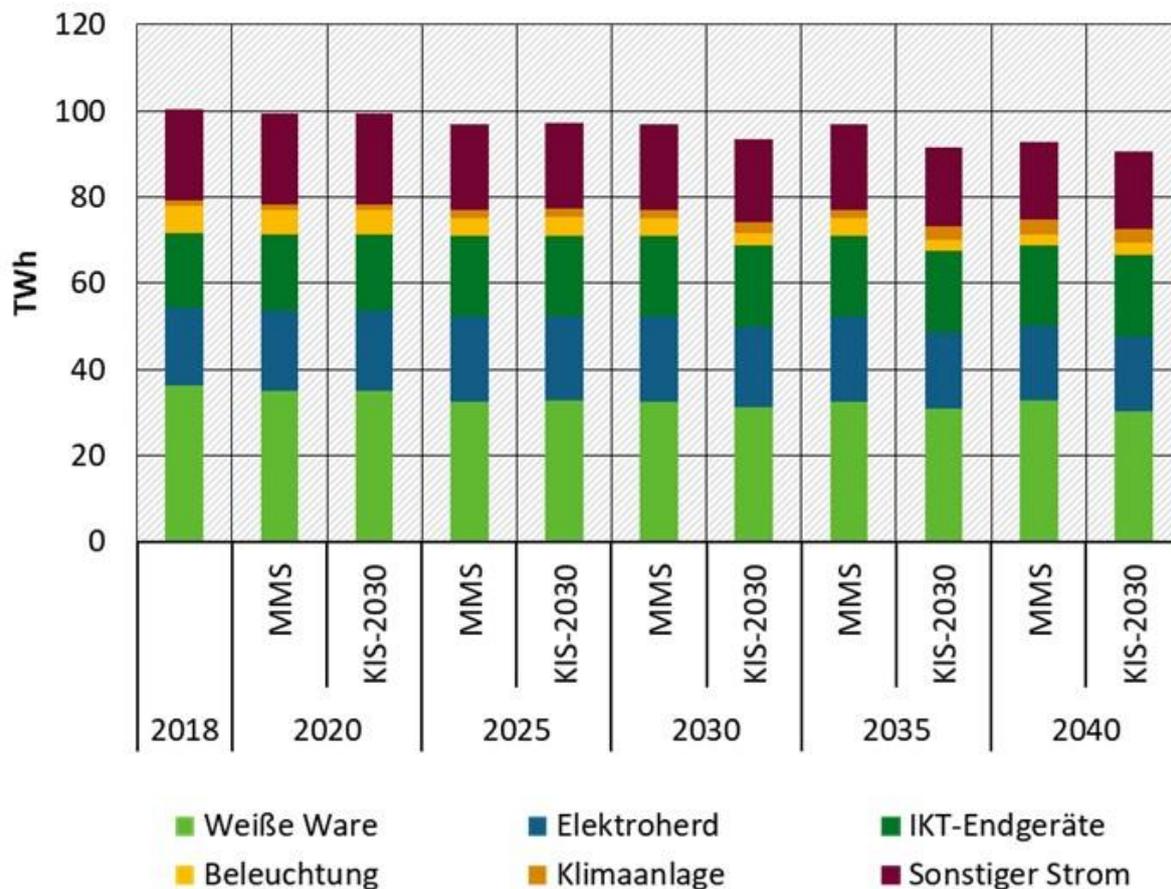
In Abbildung 62 ist dargestellt, welche Änderungen des Strombedarfs die zusätzlichen Instrumente des KIS-2030 im Jahr 2030 bewirken. Während im MMS im Jahr 2030 94,8 TWh Strom benötigt werden, werden im KIS-2030 nur 93,3 TWh benötigt. Diese Änderung setzt sich zusammen aus einem um 0,08 TWh leicht gestiegenen Strombedarf durch die Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung. Die Besteuerung führt zu niedrigeren Endenergiekosten im KIS-2030 gegenüber dem MMS. Dies wirkt sich insbesondere auf die Weiße Ware aus, bei der Wirtschaftlichkeitsüberlegungen eine größere Rolle spielen als bei anderen Haushaltsgeräten. Gleichzeitig führen die verschärften MEPS zu einer Reduktion des Strombedarfes in 2030 um 1,64 TWh. Auch diese verschärften MEPS wirken insbesondere bei der Weißen Ware, dort sind die Effizienzfortschritte im Vergleich zum MMS am größten. Dies hat mehrere Gründe: zum einen ist die Entwicklung hier nicht so schnelllebig wie beispielsweise bei IKT-Endgeräten. Das Verbot ineffizienter Geräte kann damit eine reale Wirkung auf die im Markt verfügbare Ware entfalten und so zu größeren Einsparungen führen. Zum anderen spielt die Effizienz bei größeren Haushaltsgeräten eine größere Rolle bei der Kaufentscheidung, während diese bei kleineren Geräten und insbesondere IKT-Endgeräten bislang merklich weniger berücksichtigt wird.

**Abbildung 62: Wirkung der zusätzlichen Einzelinstrumente für Haushaltsgeräte**



Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Abbildung 63 stellt die Stromanwendungen in den beiden Szenarien MMS und KIS-2030 dar. Wie vorhergehend beschrieben, unterscheiden die beiden Szenarien sich insbesondere durch die Bedarfe der Weißen Ware, während die Verbräuche der anderen Endgeräte in den beiden Szenarien nahezu identisch sind. Der Blick über 2030 hinaus zeigt, dass sich durch die zusätzlichen Instrumente die zusätzliche Minderungswirkung noch weiter verstärkt und der Strombedarf des KIS-2030 in 2040 2,2 TWh unter dem Strombedarf des MMS liegt.

**Abbildung 63: Stromanwendungen für Haushaltsgeräte im Szenarienvergleich**

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

## 8.5 Geräte und Prozesse im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

### 8.5.1 Methodik

Methodisch wird im KIS-2030 analog zum Projektionsbericht 2021 vorgegangen (Öko-Institut et al. (2021)). Wie im MMS kommt auch hier das Tertiary Modul des Energienachfragemodells FORECAST zum Einsatz (siehe z. B. Fleiter et al. (2018)). Im Folgenden wird sehr knapp auf die Kernpunkte des Modells eingegangen, diese finden sich auch in Öko-Institut et al. (2021) (S. 221):

*„Das Modul ist vom Aufbau vergleichbar mit dem Industriemodul, allerdings an Datenverfügbarkeit und Technologiestruktur im Sektor GHD angepasst. D.h. im Modell wird über ein Mengengerüst der Energieverbrauch einzelner Branchen und Energiedienstleistungen in Abhängigkeit von Rahmenbedingungen (u.a. Wirtschaftsentwicklung, Effizienzpolitik, Energiepreise) energieträgerspezifisch berechnet. [...] Der Energiebedarf je Branche wird als Summe des Energiebedarfs von bis zu 13 einzelnen Energiedienstleistungen (EDL) berechnet, die zusammen für den Großteil des Stromverbrauchs im Sektor GHD verantwortlich sind. Beispiele für EDL sind Beleuchtung, Kühlung oder IKT- [und Rechenzentrums-] Anwendungen. [...] Entsprechend erlaubt sie über das hinterlegte Mengengerüst eine „Bottom-up“-Berechnung des Energieverbrauchs für jede der Branchen. [...] Die Verbreitung von Effizienzmaßnahmen senkt den spezifischen Energieverbrauch einzelner Energiedienstleistungen und spiegelt so eine unterschiedliche Überwindung von Hemmnissen durch politische Instrumente zur Förderung der Energieeffizienz wider bzw. variierende Energiepreise. Modelliert*

*wird die Diffusion von Effizienzmaßnahmen als eine Summe von Investitionsentscheidungen der Unternehmen.“*

Eine ausführlichere Beschreibung des methodischen Vorgehens im FORECAST-Tertiary Modell befindet sich im Kapitel B.4 im Anhang sowie im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. (2021)).

### **8.5.2 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung**

Die allgemeinen Annahmen und Parameter für die Modellierung sind identisch zu denen im MMS des Projektionsberichtes 2021 (Öko-Institut et al. (2021), Abschnitt 7.4.3).

### **8.5.3 Instrumente und deren Parametrisierung**

Die Instrumente des MMS des Projektionsberichtes 2021 sind vollständig auch im KIS-2030 modelliert. Neben den Instrumenten der Industrie, welche auch Auswirkungen auf den GHD-Sektor haben, waren dies im MMS zusätzlich noch die Programme zur Förderung der Energieeffizienz in Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie die Kommunalrichtlinie der NKI.

Im KIS-2030 werden zusätzlich die Instrumente der Industrie in Bezug auf den Energieverbrauch (ohne Industriekraftwerke) und hierin insbesondere die Instrumente des Instrumentenbündels "Energieeffizienz" berücksichtigt (Abschnitt 7.1.2.1.6). Diese umfassen die „Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft“ (EEW) und die darin festgehaltene Förderung der außerbetrieblichen Abwärmenutzung. Neben den klassischen Wärmeanwendungen, ist die Bereitstellung von Abwärme auch für die im GHD-Sektor bilanzierten Rechenzentren von besonderer Bedeutung (für Details zu diesem Instrument siehe Abschnitt 7.1.2.1.6.3). Des Weiteren ist im Instrumentenbündel "Energieeffizienz" die degressive Abschreibung für Investitionen in Klimaschutz und Energieeffizienz berücksichtigt. Diese soll auch für Unternehmen im GHD-Sektor die Hemmnisse zur Durchführung von Energieeffizienzinvestitionen mindern und Anreize für Unternehmen setzen. Für eine detaillierte Beschreibung des Instruments und ihrer Parametrisierung siehe Abschnitt 7.1.2.1.6.4.

Bei der Quantifizierung des Instrumentenbündels "Energieeffizienz" wurden Mitnahme-, Vorzieh- und Spill-over-Effekte berücksichtigt.

### **8.5.4 Ergebnisse**

Im Folgenden werden, ergänzend zu der in Tabelle 79 dargestellten Instrumentenbewertung, die Szenarienergebnisse ausführlicher dargestellt. Hierzu werden zunächst die Endenergiebedarfe für die GHD-Prozesse und -Geräte präsentiert. Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse des KIS-2030 präsentiert, neben den Endenergieeinsparungen nach Energieträgern werden die Strombedarfe der unterschiedlichen Anwendungen diskutiert und ein kurzer gesonderter Einblick in den Strombedarf von Rechenzentren sowie der IKT-Anwendungen gegeben.

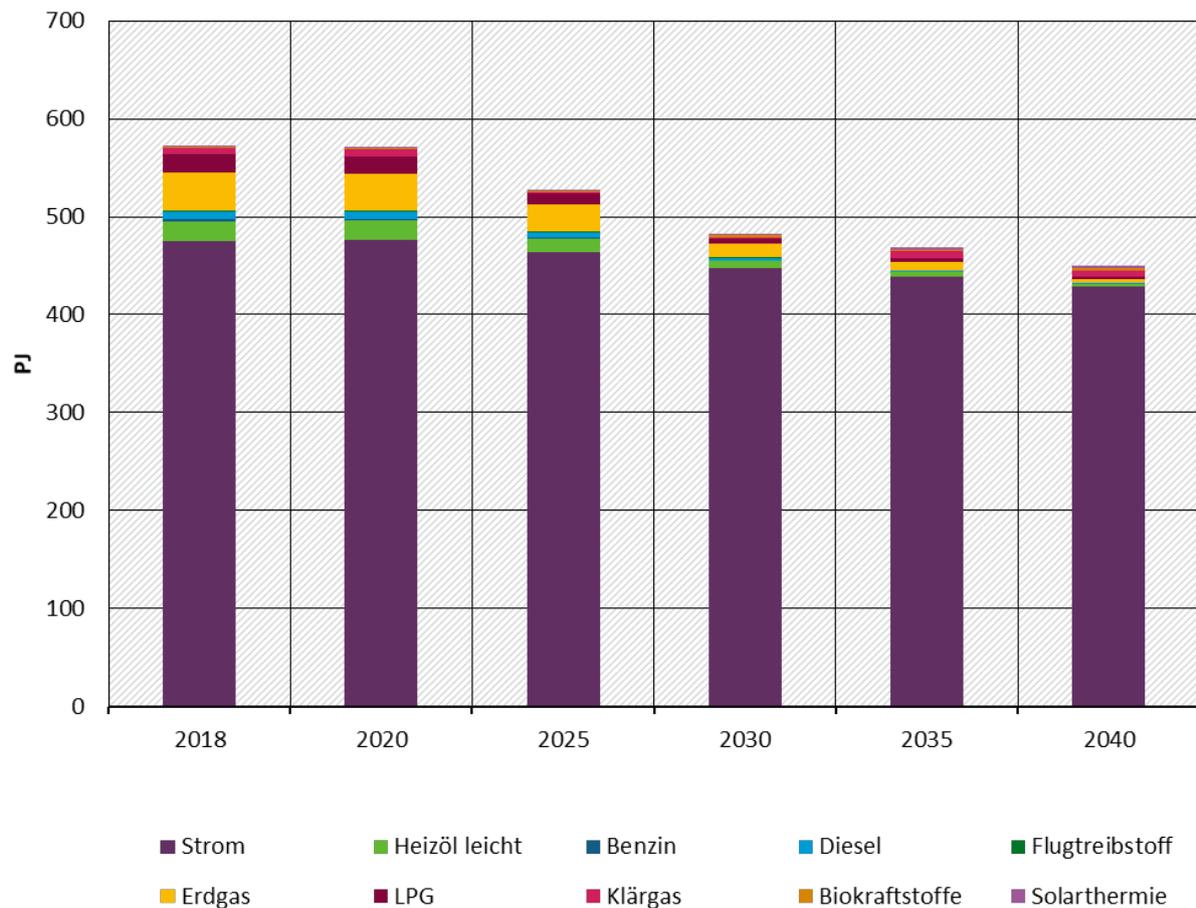
Anschließend werden zu vergleichszwecken die Ergebnisse des MMS kurz zusammengefasst. Eine ausführlichere Darstellung der MMS-Ergebnisse befindet sich im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. (2021)).

#### **8.5.4.1 KIS-2030**

Tabelle 79 zeigt die Wirkung des Instrumentenbündels "Energieeffizienz" im GHD-Sektor. Wie in der Industrie werden die Instrumente dieses Bündels gemeinsam quantifiziert, da es erheblich Überlappungseffekte zwischen den Instrumenten gibt und diese daher nicht trennscharf voneinander modelliert werden können. Im Jahr 2030 führt das Instrumentenbündel zu einer Endenergieeinsparung im GHD-Sektor von 51,4 PJ und senkt damit den Endenergiebedarf von

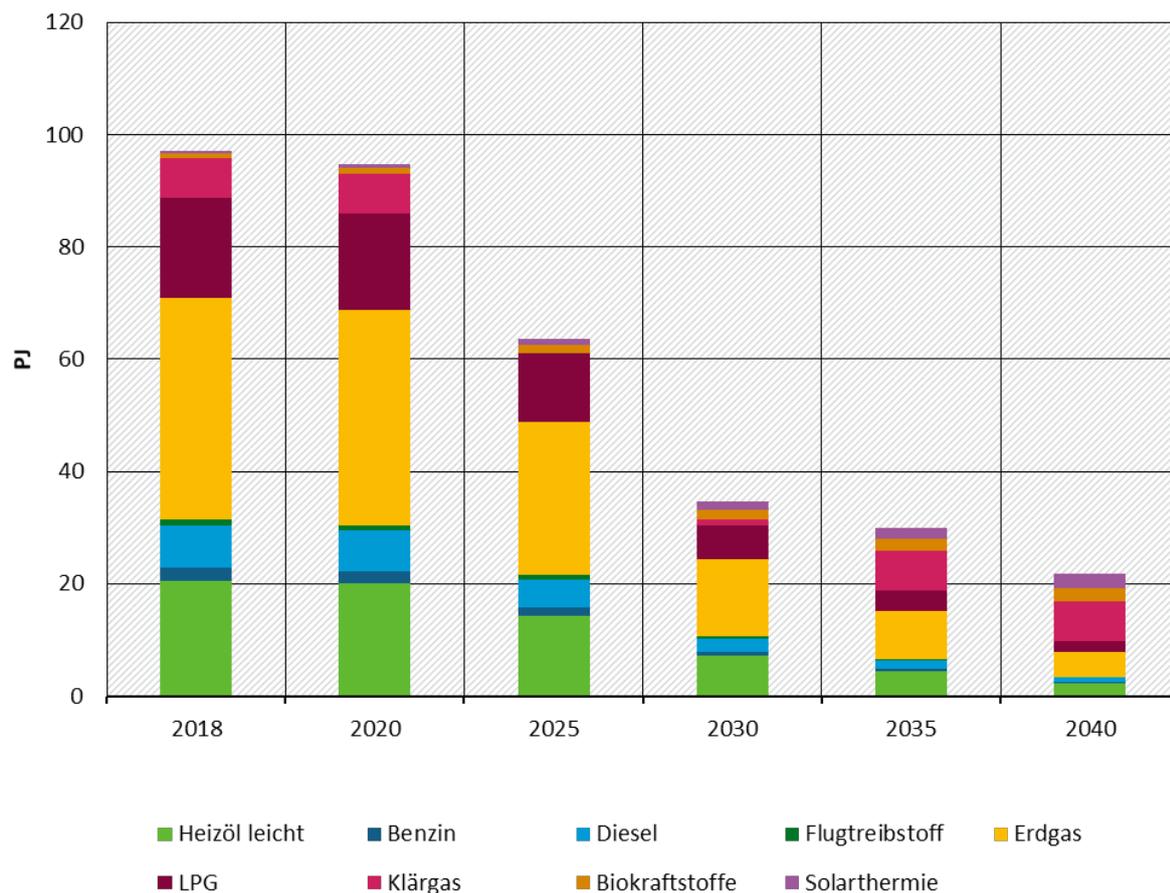
533,8 PJ im MMS des Projektionsberichtes 2021 (Öko-Institut et al. (2021)) auf 482,4 PJ im KIS-2030. Hierbei werden im Jahr 2030 gegenüber dem MMS 2,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq eingespart. Ein erheblicher Anteil dieser Einsparungen wird durch die Bundesförderung Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft in ihrer Novelle von 2021 mit aufgestockten Fördervolumen hervorgerufen. Zu etwas kleineren Anteilen wirken die degressive Abschreibung sowie verschärfte Mindeststandards. In Abbildung 64 ist die Entwicklung der Endenergiebedarfe des GHD-Sektors dargestellt, hierbei wird deutlich, dass der gesamte Bedarf sich nur leicht reduziert, insbesondere da die verstärkte Elektrifizierung von fossilen Prozessen zu einem kaum sinkenden Strombedarf führt, welcher den weitaus größten Anteil am Endenergiebedarf ausmacht.

**Abbildung 64: Entwicklung der Endenergiebedarfe des GHD-Sektors bis 2040 im KIS-2030**



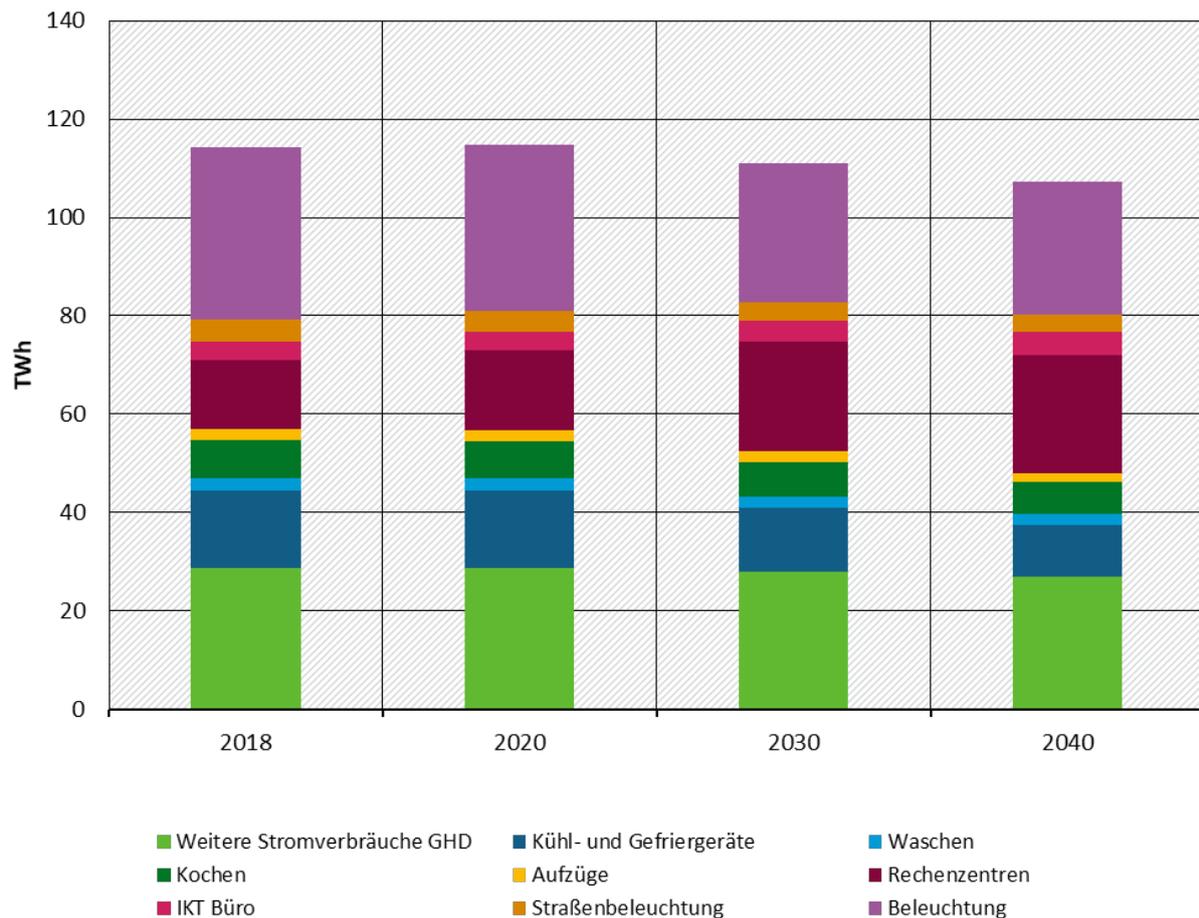
Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Abbildung 64 stellt die Entwicklung der Endenergiebedarfe des GHD-Sektors ohne die Stromanteile dar, hierbei wird deutlich, dass insbesondere die nicht strombasierte Endenergie im KIS-2030 bereits bis 2030 deutlich reduziert wird.

**Abbildung 65: Entwicklung der Endenergiebedarfe (ohne Strom) des GHD-Sektors bis 2040 im KIS-2030**

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Während die das Instrumentenbündel Endenergieminderungswirkungen hervorrufen, wirken insbesondere auf den Strombedarf zwei gegenteilige Effekte. So führt die Reform der Energie- und CO<sub>2</sub>-Besteuerung, wie gewünscht, zu einer verstärkten Elektrifizierung. Des Weiteren entstehen zusätzliche Strombedarfe durch IKT-Anwendungen und Rechenzentren. In Abbildung 66 TWh auf 111,0 TWh leicht, aber kontinuierlich ab. Diese Reduktion ist insbesondere getrieben von den starken Effizienzverbesserungen in der Beleuchtung sowie bei der Prozesswärme und -kälte. Andererseits kommt es zu steigenden Strombedarfen durch IKT-Anwendungen und Rechenzentren. Trotz starker Effizienzverbesserungen auch in diesen beiden Bereichen führt der erhebliche Mehrbedarf zu deutlichen Strombedarfssteigerungen. So steigt der Anteil des IKT bedingten Strombedarfes von 3,8 TWh in 2018 um 7 % auf 4,1 TWh im Jahr 2030 und anschließend noch weiter auf 4,6 TWh in 2040. Bei den Rechenzentren fällt der Anstieg sowohl relativ als auch absolut noch deutlicher aus: der Strombedarf von Rechenzentren betrug im Jahr 2018 14,0 TWh. Dieser Bedarf steigt im KIS-2030 bis 2030 auf 22,5 TWh und damit um 61 % an. Ein weiterer Anstieg auf 24,0 TWh bis 2040 wird erwartet (siehe auch Tabelle 88).

**Abbildung 66: Strombedarf nach Anwendungen im KIS-2030, 2018-2040**

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

**Tabelle 88: Strombedarf von Rechenzentren und IKT-Energiedienstleistungen, 2018-2040**

	2018	2020	2030	2040
Rechenzentren	14,0	16,3	22,5	24,0
IKT-Büro	3,8	3,7	4,1	4,6

Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Während der Anstieg der Energiebedarfe in Rechenzentren nicht zu vernachlässigen ist, stellt er gleichzeitig eine Grundvoraussetzung der Digitalisierung vieler Prozesse dar und ermöglicht Energieeinsparungen an vielen Stellen im System. Er spielt so eine wichtige Rolle, damit die Digitalisierung ihre Rolle als Wegbereiter der Energiewende entfalten kann.

Die Abwärmenutzung spielt auch in Rechenzentren eine zentrale Rolle. Energieeinsparungen entstehen somit durch den vermehrten Einsatz von Fern- und Nahwärme in Gebäuden sowie bei GHD-Prozessen. Die Entwicklungen der Rechenzentren und der IKT-bedingten Strombedarfe unterscheiden sich zwischen den Szenarien MMS und KIS-2030 nicht.

#### 8.5.4.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

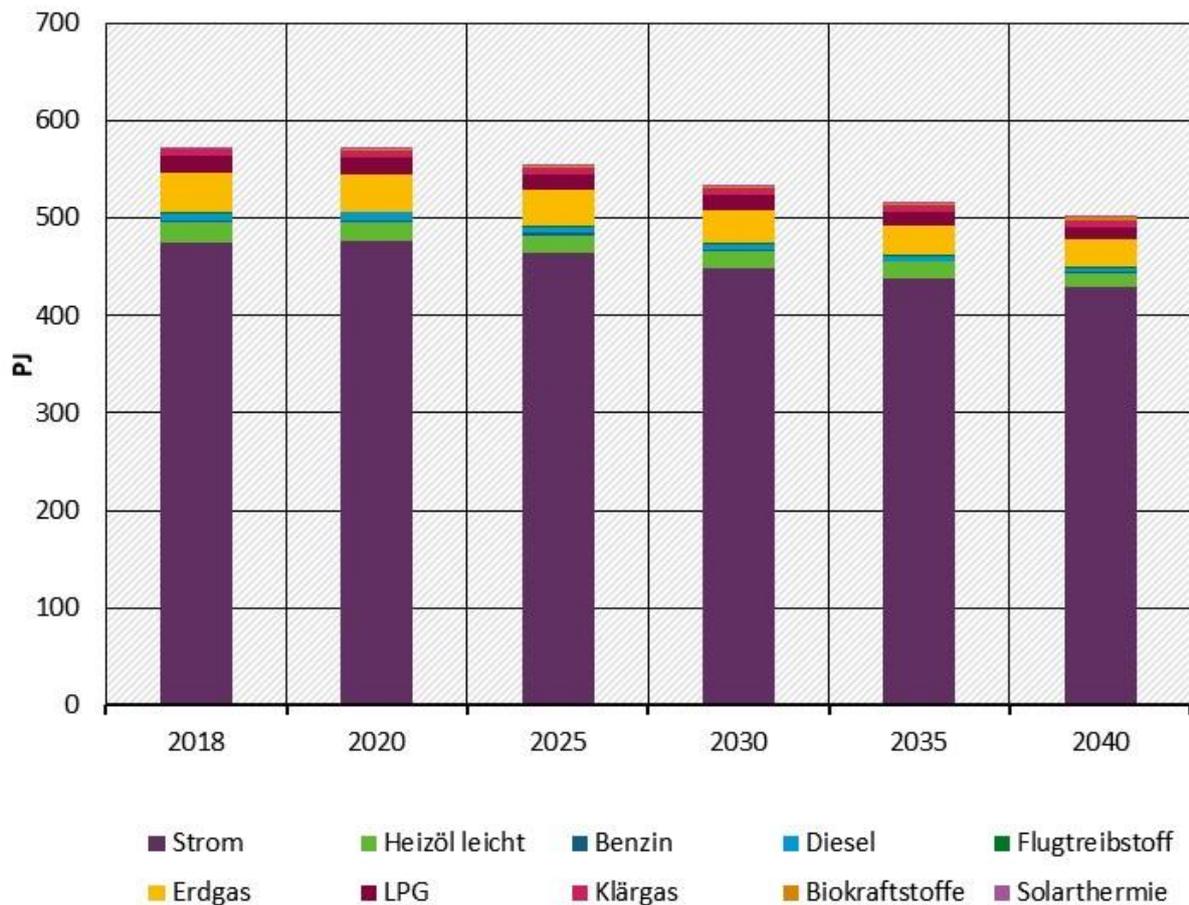
Die Berechnung der BEHG-Sensitivität führt zu einem um 0,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq höheren Emissionsausstoß im GHD-Sektor als das KIS-2030. Da der Anteil der fossilen Energieträger auf den diese

Sensitivität wirkt, lediglich 10 % der fossilen Energieträger im GHD-Sektor ausmacht und die Emissionswirkung damit etwa rund 0,02 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq beträgt, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Darstellung verzichtet. Die entsprechende Sensitivität ist in der Tabelle im Anhang A.2 abgebildet.

### 8.5.4.3 MMS

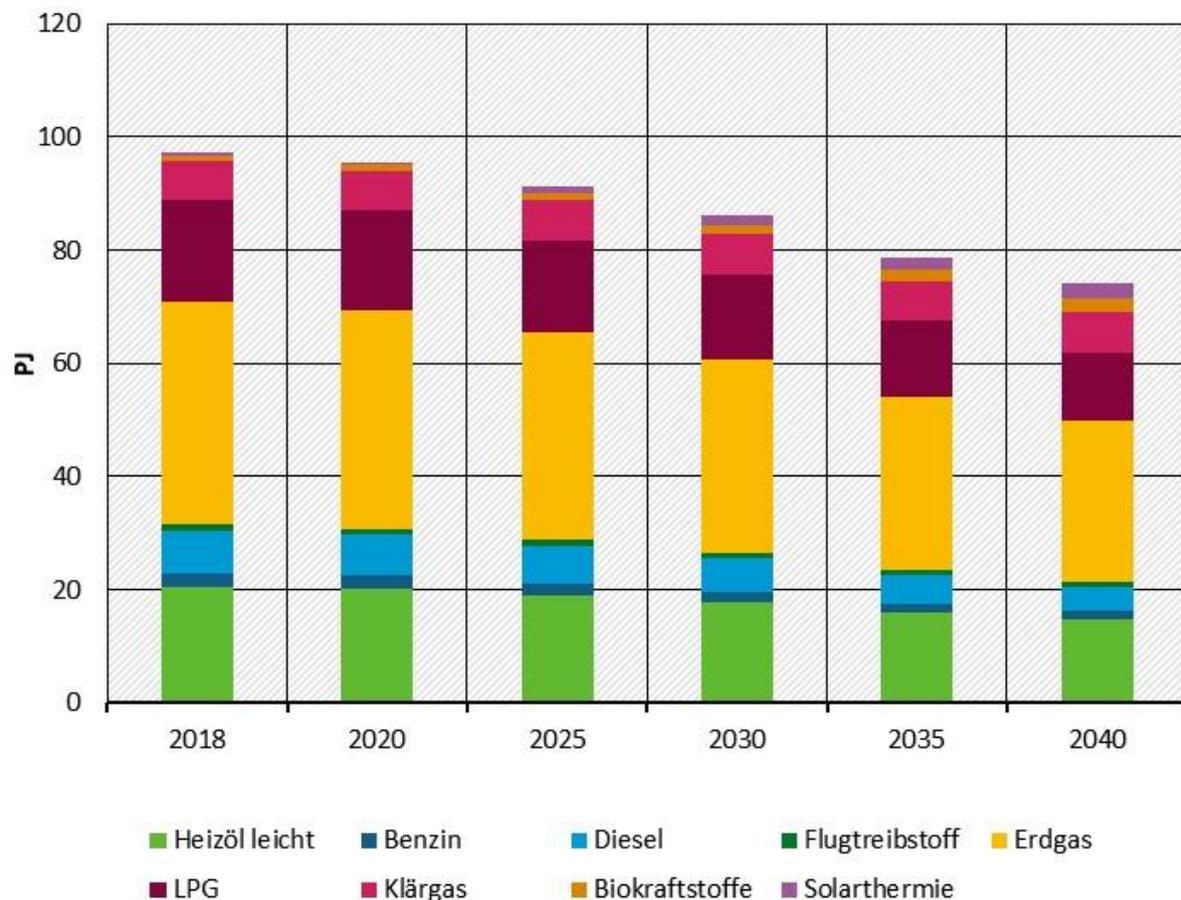
Abbildung 67 stellt die Entwicklung des Endenergiebedarfs im MMS nach Endenergieträgern dar. Bis 2030 und darüber hinaus sinkt der Endenergiebedarf aller Energieträger leicht, aber kontinuierlich ab. Der Strombedarf sinkt leicht von 475 PJ in 2018 auf 448 PJ in 2030.

**Abbildung 67: Entwicklung der Endenergiebedarfe des GHD-Sektors bis 2040 im MMS**



Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI in Öko-Institut et al. (2021)

Abbildung 68 zeigt die Entwicklung der Endenergieträger im MMS im GHD-Sektor ohne den Stromanteil. Im Jahr 2030 werden noch 76 PJ fossile Endenergieträger eingesetzt. Im Jahr 2040 sind es noch 62 PJ. Die Einzelinstrumentenbewertung des MMS ist im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. (2021)), dargestellt.

**Abbildung 68: Entwicklung der Endenergiebedarfe (ohne Strom) des GHD-Sektors bis 2040 im MMS**

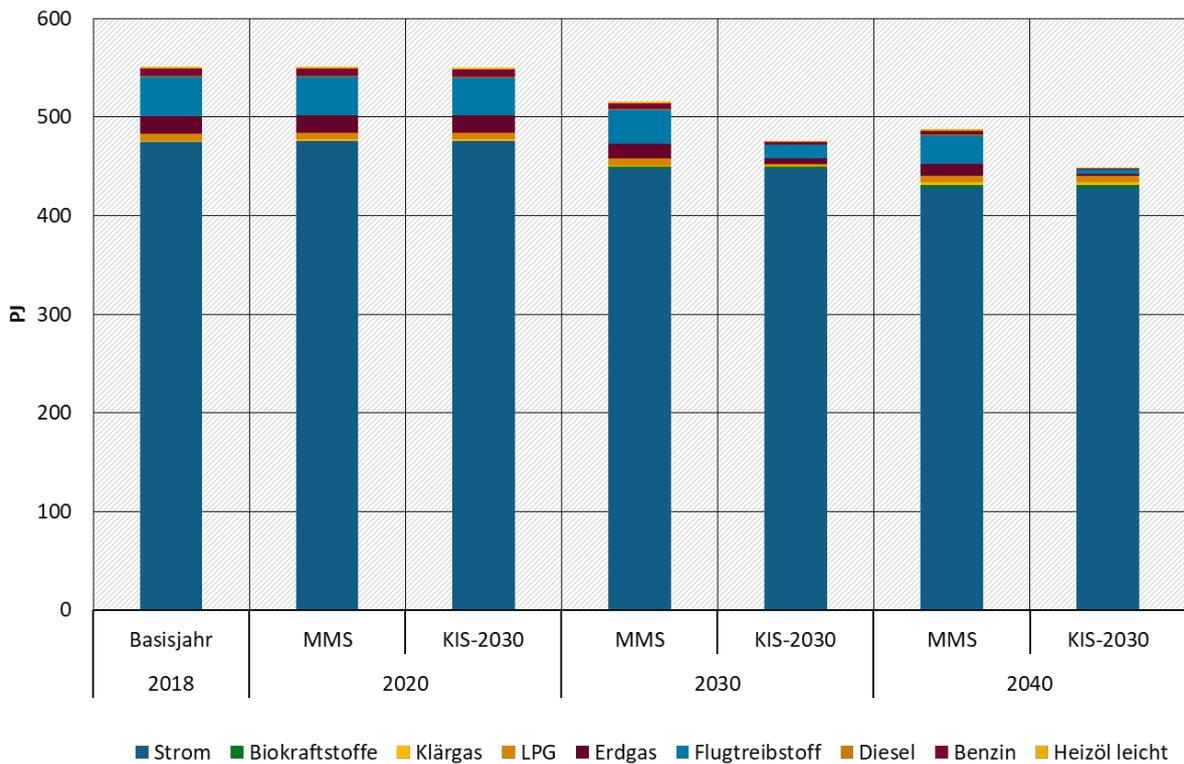
Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI in Öko-Institut et al. (2021)

#### 8.5.4.4 Vergleich der Szenarien

Abbildung 69 stellt die Entwicklung der Endenergieträger in den beiden Szenarien MMS und KIS-2030 gegenüber. Der Strombedarf entwickelt sich in beiden Szenarien nahezu identisch, auch wenn hier unterschiedliche Mechanismen am Werk sind. Die gesteigerte Effizienz im KIS-2030 wird durch eine erhöhte Elektrifizierungsrate ausgeglichen (siehe Abschnitt 8.5.4.1). In beiden Szenarien verhindern steigende Strombedarfe in Rechenzentren und für IKT-Anwendungen eine stärkere Reduktion der Strombedarfe.

Im KIS-2030 werden im Jahr 2030 noch 30 PJ und im Jahr 2040 noch 10 PJ fossile Endenergieträger eingesetzt, dies entspricht 6 % beziehungsweise 2 %. Im Gegensatz dazu beträgt der Anteil fossiler Endenergieträger im MMS in 2030 noch 14 % (76 PJ) und im Jahr 2040 noch 12 % (62 PJ). Der Vergleich zeigt somit, dass die fossilen Energieträger im MMS noch eine deutlich wichtigere Rolle spielen. Die Entwicklung des Strommixes wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, sondern ist in der Energiewirtschaft bilanziert. Die Entwicklung der nicht-strombasierten Energieträger sowie deren Treibhausgasemissionen sind hier im Sektor Gebäude bilanziert (siehe Gesamtergebnisse Gebäude im nächsten Unterkapitel 8.6).

**Abbildung 69: Endenergieträger im GHD-Sektor im Szenarienvergleich, 2018-2040**



Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

## 8.6 Gesamtergebnisse Gebäude

### 8.6.1 KIS-2030

Tabelle 89 und Abbildung 70 zeigen die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen im Zeitraum 1990 bis 2040 im KIS-2030. Die Definition und Abgrenzung dieses Sektors kann Abschnitt 3.1 entnommen werden. Die Gesamtemissionen, die dem Gebäudesektor in der Bilanzierung zugewiesen werden, sinken bis zum Jahr 2030. Mit dem modellierten Instrumentenpaket im KIS-2030 wird das Sektorziel gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 von 67 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq für das Jahr 2030 erreicht.

Davon entfallen 64 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf fossile Brennstoffe für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die restlichen Emissionen entfallen auf Geräte und Prozesse für private Haushalte und GHD.

**Tabelle 89: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030**

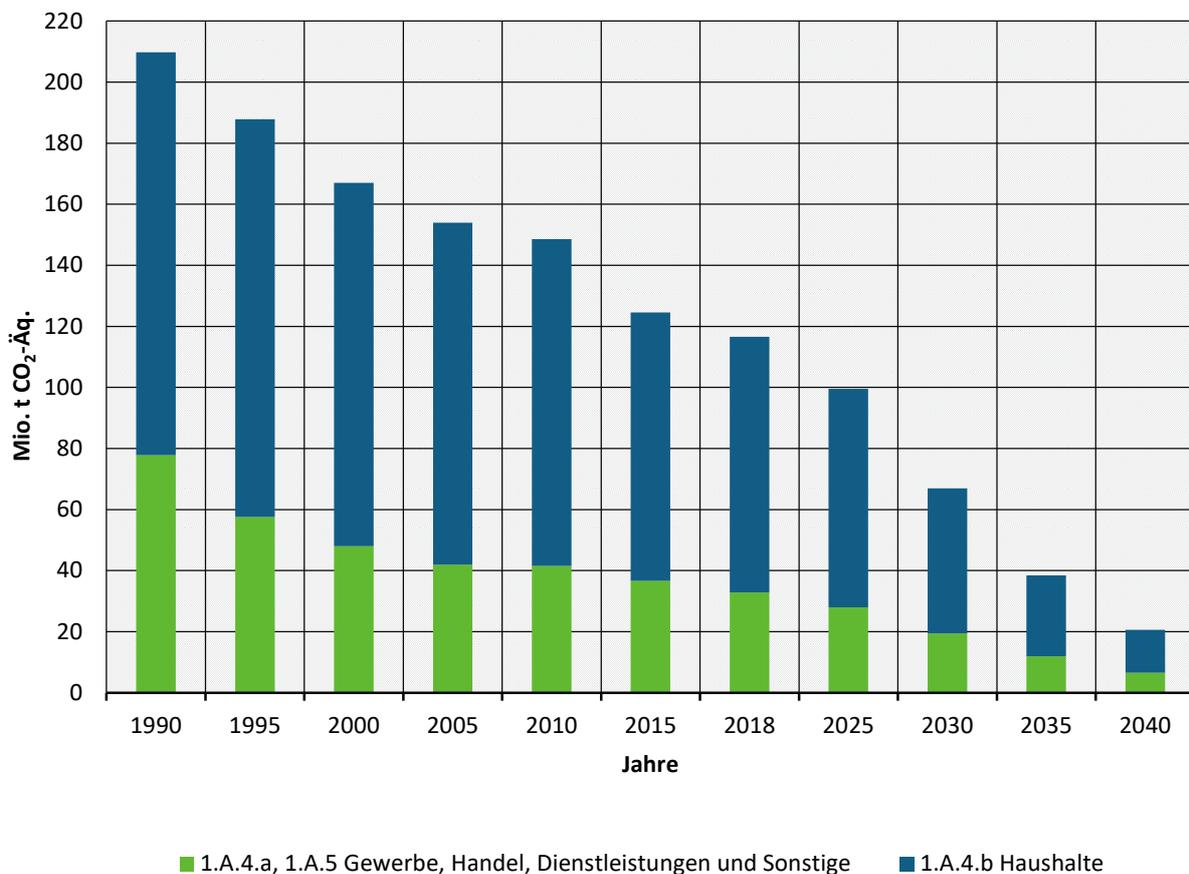
Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
GHD und Sonstige	32,9	31,9	31,4	30,4	29,5	28,0	26,4	24,8	23,1	21,2	19,4	11,9	6,6
Haushalte	83,7	83,0	80,9	78,4	75,5	71,6	67,2	62,4	57,7	52,6	47,6	26,6	14,0
<b>Gesamt</b>	<b>116,6</b>	<b>114,9</b>	<b>112,3</b>	<b>108,8</b>	<b>105,0</b>	<b>99,6</b>	<b>93,6</b>	<b>87,2</b>	<b>80,8</b>	<b>73,9</b>	<b>67,0</b>	<b>38,5</b>	<b>20,6</b>

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		113	108	102	97	92	87	82	77	72	67		
Abweichung vom Sektorziel		1,9	4,3	6,8	8,0	7,6	6,6	5,2	3,8	1,9	0,0		

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

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

**Abbildung 70: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**



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

### 8.6.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Tabelle 90 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen im Zeitraum 1990 bis 2040 in der BEHG-Sensitivität. Die Gesamtemissionen sinken bis 2030 auf 68 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, wobei 66 Mio. t auf fossile Brennstoffe für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser entfallen. Das Sektorziel des Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 für das Jahr 2030 wird damit knapp um 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq verfehlt. Bis zum Jahr 2040 ist jedoch eine Annäherung zum KIS-2030 zu beobachten. Die Abweichung zum KIS-2030 beträgt in diesem Jahr 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

**Tabelle 90: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
GHD und Sonstige	32,9	31,9	31,3	30,4	29,5	28,0	26,5	24,8	23,1	21,4	19,5	11,9	6,7
Haushalte	83,7	82,9	80,9	78,7	76,1	72,2	67,9	63,4	58,7	53,7	48,7	27,0	14,5
<b>Gesamt</b>	<b>116,6</b>	<b>114,8</b>	<b>112,2</b>	<b>109,1</b>	<b>105,6</b>	<b>100,2</b>	<b>94,4</b>	<b>88,2</b>	<b>81,8</b>	<b>75,1</b>	<b>68,3</b>	<b>38,9</b>	<b>21,1</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		113	108	102	97	92	87	82	77	72	67		
Abweichung vom Sektorziel		1,8	4,2	7,1	8,6	8,2	7,4	6,2	4,8	3,1	1,3		

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

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

### 8.6.3 MMS

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor im Zeitraum 1990 bis 2040 im MMS ist in Tabelle 91 dargestellt. Die Gesamtemissionen, die dem Gebäudesektor in der Bilanzierung zugewiesen werden, sinken bis zum Jahr 2030 auf 90,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Davon entfallen 84 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf fossile Brennstoffe für die Bereitstellung von Raumwärme- und Warmwasser in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die restlichen Emissionen entfallen auf Geräte und Prozesse für Private Haushalte und GHD. Das Sektorziel gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 wird für das Jahr 2030 verfehlt, es ergibt sich eine Ziellücke von 24 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Nichtsdestotrotz kann im Vergleich zu 1990 mit den bestehenden politischen Instrumenten eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 57 Prozent erreicht werden.

**Tabelle 91: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
GHD und Sonstige	32,9	31,8	31,3	30,7	30,0	29,2	28,4	27,4	26,3	25,2	24,1	17,9	13,3
Haushalte	83,7	84,1	83,1	81,7	80,3	78,6	76,7	74,6	72,3	69,7	66,8	51,0	36,9
<b>Gesamt</b>	<b>116,6</b>	<b>115,9</b>	<b>114,3</b>	<b>112,4</b>	<b>110,3</b>	<b>107,9</b>	<b>105,1</b>	<b>102,0</b>	<b>98,6</b>	<b>94,9</b>	<b>90,9</b>	<b>69,0</b>	<b>50,2</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		113	108	102	97	92	87	82	77	72	67		
Abweichung vom Sektorziel		2,9	6,3	10,4	13,3	15,9	18,1	20,0	21,6	22,9	23,9		

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut, et al. 2021, Abschnitt 7.5)

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

### 8.6.4 Vergleich der Szenarien

Tabelle 92 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Gasen im Vergleich der Szenarien. Aufgrund des Einsatzes fossiler Brennstoffe haben CO<sub>2</sub>-Emissionen die größte Bedeutung

im Gebäudesektor. Diese sind auch maßgeblich für den Rückgang der Treibhausgasemissionen. Durch Sanierungsmaßnahmen in Gebäuden und Austausch der Wärmeversorgungssysteme reduziert sich in allen Szenarien der Bedarf an den fossilen Brennstoffen Erdgas, Heizöl und Kohle. Darüber hinaus reduzieren jedoch auch steigende Außentemperaturen den Energieverbrauch für Raumwärme. Der weitaus größere Effekt wird jedoch durch die Verbesserung der Energieeffizienz der Gebäude und die Umstellung auf EE und Fernwärme erreicht.

In der Tabelle wird ersichtlich, dass die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2030 bis 2040 deutlich dynamischer ist als in den Vorjahren. Ausgehend von 1990 reduzieren sich die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 57 Prozent im MMS, um 67 Prozent in der BEHG-Sensitivität und um 68 Prozent im KIS-2030. Bis 2040 werden die THG-Emissionen bereits bis zu 90 Prozent (KIS-2030) reduziert. Aufgrund des steigenden CO<sub>2</sub>-Preises in allen Szenarien nimmt die Wirtschaftlichkeit für erneuerbare Wärmeversorgungstechnologien sowie die Sanierungsaktivität aufgrund steigender Energiekosten zu, was zu einer höheren Dynamik nach 2030 führt.

**Tabelle 92: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	204,5	152,7	115,4				
MMS				106,6	89,6	67,8	49,2
KIS-2030				98,7	66,5	38,1	20,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				99,3	67,7	38,4	20,7
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	4,2	0,7	0,8				
MMS				0,9	0,9	0,9	0,8
KIS-2030				0,5	0,3	0,2	0,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,5	0,3	0,3	0,3
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	1,0	0,5	0,4				
MMS				0,4	0,4	0,3	0,3
KIS-2030				0,3	0,2	0,2	0,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,3	0,2	0,2	0,2
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	209,7	153,9	116,6				
MMS				107,9	90,9	69,0	50,2
KIS-2030				99,6	67,0	38,5	20,6

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				100,2	68,3	38,9	21,1
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 1990 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018		-26,6	-44,4				
MMS				-48,6	-56,7	-67,1	-76,0
KIS-2030				-52,5	-68,1	-81,7	-90,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-52,2	-67,5	-81,5	-89,9
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 2005 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018			-24,3				
MMS				-29,9	-41,0	-55,2	-67,4
KIS-2030				-35,3	-56,5	-75,0	-86,6
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-34,9	-55,7	-74,7	-86,3

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030

## 9 Verkehr

### 9.1 Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick

In Tabelle 93 sind die Treibhausgasminderungen der bewerteten Instrumente und Instrumentenbündel in Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq gegenüber dem MMS dargestellt. Eine genaue Beschreibung der Ausgestaltung kann Abschnitt 9.3 entnommen werden.

**Tabelle 93: Treibhausgasminderungswirkung einzelner Instrumente und Instrumentenbündel des KIS-2030 gegenüber dem MMS im Sektor Verkehr**

Szenario / Instrument	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq											
MMS PB 2021	162,3	151,1	158,8	157,0	154,4	151,4	147,2	143,2	138,0	134,0	126,4
Erhöhte CO <sub>2</sub> -Bepreisung für die Sektoren Wärme und Verkehr (BEHG)		0	0	-1,5	-2,8	-4,7	-5,5	-8,6	-9,5	-12,5	-14,4
Stärkere CO <sub>2</sub> -Spreizung der Kfz-Steuer im 1. Jahr (Malus)		0	0	-0,9	-2,0	-3,2	-4,7	-6,0	-7,7	-8,9	-9,4
Ausweitung und CO <sub>2</sub> -Spreizung der Maut der Lkw-Maut		0	0	0	-0,2	-0,8	-1,1	-1,5	-2,4	-3,4	-4,6
Ausbau Lkw-Energieinfrastruktur		0	0	0	0	-0,2	-0,5	-1,0	-1,7	-2,9	-4,0
Abschaffung des Dieselsteuerprivilegs Nationale Umsetzung der RED II / THG-Quote Absenkung EEG-Umlage		0	0	-0,4	-1,4	-2,5	-3,3	-4,1	-4,2	-4,8	-6,1
EU-Mindestenergiesteuerersatz für inländische Flüge PtL im Flugverkehr nach 2030 beschleunigt einführen		0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4

Szenario / Instrument	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Kaufprämien für elektrische Fahrzeuge Umgestaltung der Besteuerung von Dienstwagen		0	0,4	-1,6	-3,2	-4,6	-5,0	-4,8	-4,4	-4,0	-3,5
<b>KIS-2030</b>	<b>162,3</b>	<b>151,2</b>	<b>159,2</b>	<b>152,1</b>	<b>144,4</b>	<b>134,9</b>	<b>426,6</b>	<b>116,7</b>	<b>107,6</b>	<b>97,1</b>	<b>84,1</b>
KSG-Jahresemissionsmengen		145	139	134	138	123	117	112	105	96	85

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut

## 9.2 Methodik

Die Berechnungsmethodik der Modellierungen mit TEMPS ist gegenüber dem Projektionsbericht 2021 weitestgehend unverändert. Für eine kurze Modellbeschreibung sei auf Öko-Institut et al. (2021) und den Anhang B.8 verwiesen. Zwei Unterschiede gegenüber dem Projektionsbericht 2021 ergeben sich bei der Methodik der Einzelinstrumentenbewertung aufgrund von deutlich stärkeren Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten:

Die Bewertung von mehreren Einzelinstrumenten gleicher Wirkungsart erfolgt in Bündeln. In diesem Szenario wird das Klimaziel im Jahr 2030 mithilfe eines insgesamt deutlich ambitionierteren Instrumentenmixes erreicht. Die wirkungsmächtigen Instrumente erschweren die eindeutige Zuordnung von Minderungspotentialen, da die Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten deutlich zugenommen haben. Aus diesem Grund werden Instrumente ähnlicher Wirkungsweise in Bündeln quantifiziert. Dies reduziert zwar die Auflösung der Minderungswirkungen, führt jedoch zu belastbaren und robusten Ergebnissen.

Die Minderungswirkung von Instrumenten kann teilweise nur in Verbindung mit flankierenden Instrumenten erreicht werden, welchen keine Minderung zugewiesen wird. Zentrale Instrumente dieses Szenarios können ihre Wirkungen nur entfalten, wenn entsprechende Instrumente die Voraussetzung für Verlagerungswirkung in Form von bspw. zusätzlichem Angebot bereitstellen. Die Wirkung kann nicht auf beide Instrumentenarten (Push/Pull) aufgeteilt werden, da in der Modellierung die Einzelwirkungen aufgrund von Überlagerungswirkungen nicht isoliert werden können. Daher werden die Minderungen bei einer Kombination aus Push und Pull-Instrumenten nur den Pushinstrumenten zugewiesen während die Pull-Instrumente als flankierend eingeordnet wird. Dies bedeutet, dass die Minderung der Push-Instrumente ausschließlich bei gleichzeitiger Umsetzung der flankierenden Instrumente erreicht werden kann.

## 9.3 Instrumente und deren Parametrisierung

### 9.3.1 KIS-2030

#### 9.3.1.1 CO<sub>2</sub>-Bepreisung bzw. Emissionshandel im Verkehr (BEHG) und Reduktion EEG-Umlage

Siehe übergreifende Maßnahmen (Abschnitt 5.1).

### 9.3.1.2 Stärkere CO<sub>2</sub>-Spreizung der Kfz-Steuer für Pkw im 1. Jahr (Malus)

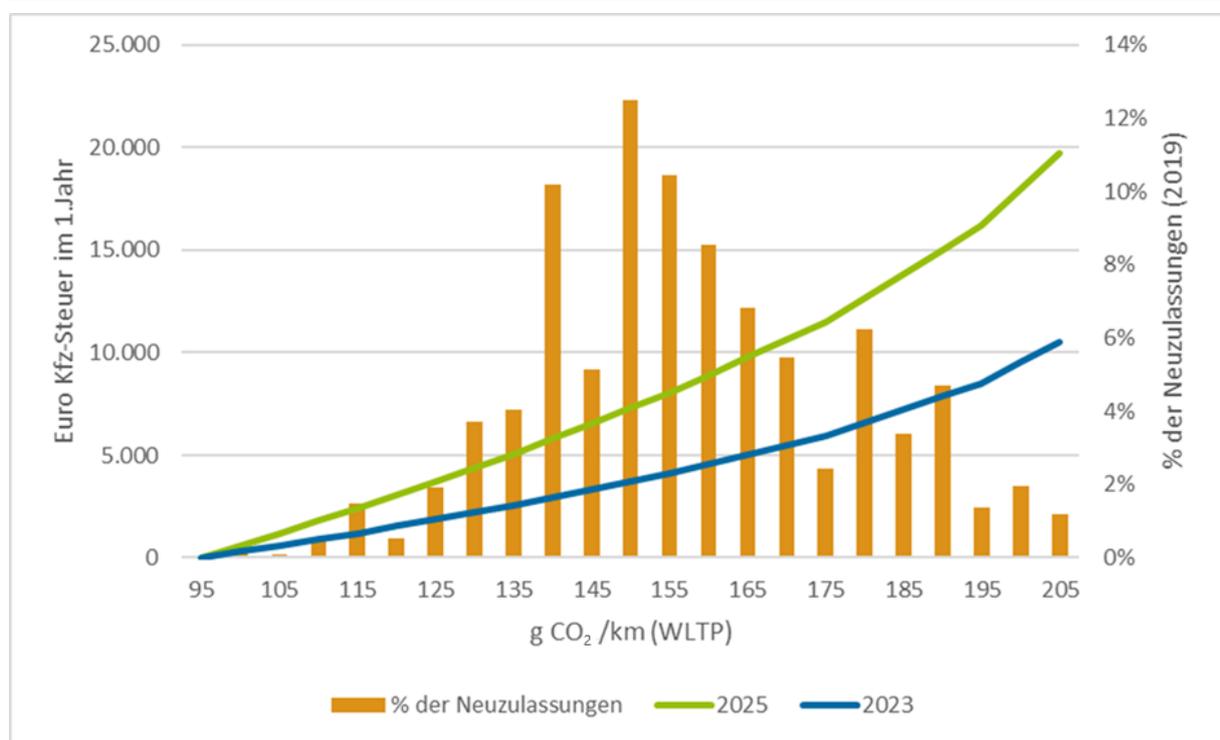
Die Kfz-Steuer im 1. Jahr für neu zugelassene Pkw wird ab 2023 stufenweise erhöht. Die CO<sub>2</sub>-abhängigen Steuersätze sind in Tabelle 94 dargestellt. Abbildung 71 zeigt die Verteilung der WLTP-Emissionen der Neuzulassungen von 2019 und die damit zusammenhängenden Zahlungen nach der Reform der Kfz-Steuer im ersten Jahr. Ein neuzugelassenes Fahrzeug mit Emissionen von 165 Gramm CO<sub>2</sub>/km müsste nach der Reform in 2023 rund 5.000 € und in 2025 rund 10.000 € zusätzliche Kfz-Steuer im ersten Jahr nach der Neuzulassung zahlen.

**Tabelle 94: Kfz-Steuer im 1. Jahr im KIS-2030 in € je g CO<sub>2</sub>/km (WLTP)**

	g CO <sub>2</sub> /km	95-115	116-135	136-155	156-175	176-195	>195
Status Quo (seit 2021)	€/g CO <sub>2</sub> /km	2	2,2	2,5	2,9	3,4	4
Kfz-Steuer – 1. Jahr (2023)	€/g CO <sub>2</sub> /km	60	67	78	92	128	200
Kfz-Steuer – 1. Jahr (2025)	€/g CO <sub>2</sub> /km	120	132	150	174	234	354

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Öko-Institut

**Abbildung 71: Kfz-Steuer im 1. Jahr und Verteilung der Neuzulassungen**



Quelle: Eigene Abbildung, Öko-Institut

### Parametrisierung

Die Maßnahme wirkt im Modell auf die Gesamtkosten für die Anschaffung und Nutzung (TCO) der neuen Pkw und damit auf die Neuzulassungsstruktur.

### 9.3.1.3 Kaufprämien Pkw

Kaufprämien für rein batterieelektrische und Brennstoffzellen-Pkw und -Lkw werden bis zum Jahr 2025 fortgeführt (in Höhe der bestehenden Innovationsprämie)<sup>75</sup>, während Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge ab 2022 nicht mehr mit einer Kaufprämie gefördert werden. Durch die höhere Kfz-Steuer im 1. Jahr (Abschnitt 9.3.1.2) wird die Gegenfinanzierung der Kaufprämien ermöglicht.

#### Parametrisierung

Die Kaufprämien wirken im Modell auf die TCO der neuen Pkw und damit auf die Neuzulassungsstruktur. Es wird der Bundesanteil der Kaufprämie berücksichtigt.

### 9.3.1.4 EU-Mindestenergiesteuersatz für inländische Flüge

Für inländische Flüge wird ab 2023 der Mindestenergiesteuersatz von 33 ct/l erhoben.

#### Parametrisierung

Es wird angenommen, dass die Anhebung des Mindestenergiesteuersatzes zu einer Erhöhung der Ticketpreise im Luftverkehr führt. Es werden auf Basis von Peter et al. (2012) Preiselastizitäten von -0,9 (national) und -0,76 (international) angenommen, welche zu einer Nachfragereduktion führen. Die Nachfrage wird großteils auf den MIV und den ÖV verlagert.

### 9.3.1.5 Abschaffung des Dieselsteuerprivilegs

Die Energiesteuern für Kraftstoffe sind seit 2003 unverändert und betragen 47,04 ct/l für Diesel und 65,45 ct/l für Benzin. Die Energiesteuer für Diesel, Erdgas und LNG wird im Zeitraum 2023-2027 an das Niveau der Energiesteuer von Benzin (bemessen am Energiegehalt) angeglichen. Dies ist eine übergreifende Maßnahme, welche jedoch im Verkehrssektor eine spezifische Wirkung entfaltet. Gleichzeitig wird die Hubraumkomponente der Kfz-Steuer für Dieselfahrzeuge sukzessive reduziert. Ferner wird für alle Kraftstoffe ein Inflationsausgleich ab 2027 eingeführt, sodass die Energiesteuern ab 2027 real gleichbleiben (ebenfalls eine übergreifende Maßnahme).

Für den Güterverkehr (Lkw >3,5t zGG) gibt es eine Rückerstattung der erhöhten Energiesteuern auf ein mit den europäischen Nachbarländern vergleichbares Niveau. So sollen graue Importe vermieden werden und ein fairer Wettbewerb mit den europäischen Nachbarländern gesichert werden. Klimaschutzanreize im Straßengüterverkehr werden über die CO<sub>2</sub>-Spreizung der Lkw-Maut gesetzt. Ein Rückerstattungssystem wird ohnehin im Rahmen BEHG / CO<sub>2</sub>-Komponente der Maut etabliert, so dass dies keinen zusätzlichen Aufwand verursacht.

#### Parametrisierung

Die steigenden Kraftstoffpreise wirken auf die Neuzulassungen bei Pkw und LNF und auf die Verkehrsnachfrage.

### 9.3.1.6 Umgestaltung der Besteuerung von Dienstwagen

Die Besteuerung des geldwerten Vorteils richtet sich ab dem 1.1.2023 auch nach dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Dienstwagens: Bei Fahrzeugen mit bis zu 95 g CO<sub>2</sub> / km wird 1,5 % des Listenpreises angesetzt, der Steuersatz steigt um 0,01 % pro zusätzlichem g CO<sub>2</sub> / km. Die Begünstigung von Plug-In-Hybriden (0,5 %-Regel) wird abgeschafft; sie zahlen ab 2023 ebenfalls 1,5 %. Rein batterieelektrische Fahrzeuge zahlen bis 2022 0,25 %, ab 2023 0,5 % und ab 2025 1 %.

<sup>75</sup> Bundesanteil der Kaufprämie in Höhe von 6.000 € (Nettolistenpreis bis 40.000 €)/5.000 € (Nettolistenpreis zwischen 40.000 € und 65.000 €).

**Parametrisierung**

Die geänderte Dienstwagenbesteuerung wirkt auf die TCO und damit auf die Anschaffungsentscheidung bei Dienstwagen. Gegenüber der derzeitigen Regelung sinkt insgesamt die Attraktivität von Dienstwagen als Gehaltsbestandteil. Der erhöhte Satz der Pauschalbesteuerung verringert die Attraktivität der Dienstwagen für Arbeitnehmende. Die Anzahl der Dienstwagenfahrzeuge verringert sich und somit auch die Fahrleistung. Der Flatrate-Charakter bleibt jedoch erhalten. Es wird angenommen, dass dadurch die Fahrleistung der Dienstwagen gegenüber dem MMS um 10 % zurückgeht (6 Mrd. km). Primärliteratur mit adäquaten Schätzungen liegen für Deutschland nicht vor und es handelt sich hierbei um eine diskutierte Expertenschätzung.

**9.3.1.7 Ausweitung und CO<sub>2</sub>-Spreizung der Lkw-Maut sowie Ausbau der Lkw-Energieinfrastruktur**

Die Lkw-Maut wird im Jahr 2025 auf alle Fahrzeuge und alle Straßen ausgeweitet, mit zunehmender Internalisierung externer Kosten im Zeitraum 2035-2040. Die CO<sub>2</sub>-Komponente tritt bereits ab 2023 in Höhe von 200 €/t in Kraft und bleibt konstant, so lange sie höher liegt als der CO<sub>2</sub>-Preis im BEHG. Mautpflichtige Fahrzeuge bekommen den CO<sub>2</sub>-Preis des BEHG rückerstattet.

Außerdem wird die Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw, E-Lkw und BZ-Lkw ausgebaut. Lademöglichkeiten bestehen zunächst nachts am Depot. Ein Teil der Lkw kann zudem am Zielort nachladen. Der Ausbau der Schnellladesäulen an der Autobahn wird ab 2024 beginnen, wenn die Standardisierung der eingesetzten Technik abgeschlossen ist. Es wird angenommen, dass 2030 für rund 50 % der Lkw auch im Fernverkehr BEV eingesetzt werden können. Im Jahr 2024 bestehen zudem 300 km Pendelstrecken für O-Lkw. Dieses Netz wird anschließend ausgebaut bis im Jahr 2040 ein Gesamtnetz aus rund 4.000 km Oberleitungen erreicht wird.

**Parametrisierung**

Die Lkw-Maut wirkt auf die Antriebswahl bei Lkw und auf die Verkehrsnachfrage. Im Güterverkehr wird von 100 % Verlagerung ausgegangen. Dabei wird die Elastizität aus de Jong et al. (2010) in Höhe von -0,6 verwendet. Bei Verlagerung auf Binnenschiff und Bahn wird zusätzlich ein Umwegfaktor verwendet, wodurch sich die Verkehrsleistung bei Verlagerung leicht erhöht.

**9.3.1.8 Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut**

Eine fahrleistungsabhängige Pkw-Maut wird ab 2029 für das gesamte Straßennetz eingeführt. Nach dem „Phase-In“ von 1,1 ct/km im Jahr 2029 wird der Satz auf 4,3 ct/km ab dem Jahr 2032 erhöht. Externe Kosten für Luftschadstoffe, Lärm, sowie Natur und Landschaft werden im Zeitraum 2035-2040 vollständig internalisiert (Blanck et al. 2020).

**Parametrisierung**

Die Pkw-Maut wirkt auf die Verkehrsnachfrage. Im MIV ist eine Elastizität von -0,3 hinterlegt (Hautzinger et al. 2004). Die Verlagerung verteilt sich auf verschiedene Modi sowie Vermeidung (40 % der vermiedenen Verkehrsleistung).

**9.3.1.9 Angebotsausweitung ÖPNV**

Auf Basis der kcw-Studie „Finanzierung des ÖPNV – Status Quo und Finanzierungsoptionen für die Mehrbedarfe durch Angebotsausweitungen“ im Auftrag des UBA (Naumann et al. 2019) wird von einer durchschnittlichen Angebotssteigerung über alle Verkehrsmittel des ÖPNV von 42 % ausgegangen. Der Finanzbedarf liegt nach der oben genannten Studie bei 11-15 Mrd. € jährlich (davon 4-8 Mrd. € für innovative Antriebe, 1 Mrd. € für die Infrastruktur, 6 Mrd. € für den Betrieb).

## Parametrisierung

Die Angebotsausweitung des ÖPNV ist notwendige Voraussetzung, um durch den CO<sub>2</sub>-Preis und die Pkw-Maut eine umfassende Verlagerung auf den ÖPNV zu erzielen. Die Verlagerungsleistung wird über die preislichen Änderungen modellendogen berechnet und entspricht in seiner Größenordnung den Werten aus Naumann et al. (2019). Der Angebotsausweitung wird keine eigene Minderungswirkung zugeschrieben. Sie ist aber Voraussetzung dafür, die Push-Wirkung der Instrumente im MIV zu realisieren. Die Verlagerung ist im Modell Folge der erhöhten Kilometerkosten im MIV.

### 9.3.1.10 Förderung des Radverkehrs

Gemäß der Ziele des Nationalen Radverkehrsplans 3.0 sollen perspektivisch 30 € je Einwohner in den Radverkehr investiert werden (d.h. rund 2,4 Mrd. € pro Jahr), und der Radverkehr soll sich bis zum Jahr 2030 mehr als verdoppeln auf durchschnittlich 2,7 Kilometer pro Person und Tag (50 % mehr Wege und eine durchschnittliche Wegelänge von +60 %).

Dieses Zielbild für 2030 liegt etwas unterhalb der heutigen „niederländischen Verhältnisse“: Dort werden bereits heute 33 € pro Person und Jahr in den Radverkehr investiert (Hendriks et al. 2017), und pro Person und Tag werden 3 km mit dem Fahrrad zurückgelegt (Haas und Hamersma 2020).

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 wurden die Mittel des Bundes bis 2023 auf zusätzliche 300 Mio. € jährlich erhöht (d.h. von bisher rund 100 Mio. € auf 400 Mio. € jährlich). Hinzu kommen die Mittel der Kommunen in Höhe von rund 500 Mio. € jährlich, sodass die Mittel im Jahr 2023 insgesamt bei 900 Mio. € liegen. Ab dem Jahr 2024 sind keine weiteren zusätzlichen Haushaltsmittel hinterlegt. Im KIS-2030 wird ein Mittelhochlauf für den Radverkehr auf 30 € pro Person bis zum Jahr 2025 hinterlegt. Dazu werden zunächst im Jahr 2023 die zusätzlichen Mittel auf 600 Mio. € erhöht. Diese steigen bis 2025 weiter auf 1,5 Mrd. € jährlich an. Inklusive der bisherigen Bundesfördermittel von 100 Mio. € sowie der kommunalen 500 Mio. € ergibt sich eine Fördersumme ab dem Jahr 2025 von 2,1 Mrd. € jährlich.

**Tabelle 95: Zusätzliche Fördermittel für den Radverkehr (Mio. €)**

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
MMS	50	250	300	300							
KIS-2030	50	250	300	600	1.000	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Öko-Institut

Allein durch die Aufstockung der Mittel ist das Ziel einer Verdopplung des Radverkehrs dennoch vermutlich nicht zu erreichen. Zusätzliche Radverkehrsförderung über die finanziellen Mittel hinaus wird durch Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit und eine Umgestaltung der StVO gewährleistet (s.u.).

## Parametrisierung

Für die Quantifizierung der Wirkung der zusätzlichen Mittel wird wie im MMS die Methodik aus dem Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2020) verwendet. Es wird eine Verlagerung von Pkw-Verkehr auf Radverkehr in Höhe von 0,9 pkm je investiertem € in die Radverkehrsinfrastruktur angenommen, wobei die Wirkung erst mit 5 Jahren Verzögerung vollständig zum Tragen kommt (aufgrund des zeitlichen Verzugs durch Planung und Bau der Infrastruktur).

### 9.3.1.11 Förderung des Fußverkehrs

Angestrebt wird eine Steigerung des Fußverkehrsanteils am Model Split von 27 % auf 41 % in Kernstädten, von 24 % auf 35 % in Landkreisen bis zum Jahr 2030 gegenüber 2015. Dazu trägt ein Maßnahmenbündel im Rahmen einer ganzheitlichen Fußverkehrsstrategie bei (Bauer et al. 2018):

- ▶ Zusätzliche Mittel für die Verbesserung des Fußverkehrs (z. B. analog zum Programm „Stadt und Land“ für den Radverkehr)
- ▶ Einführung von Mindeststandards für Fußverkehrsinfrastruktur/Gehwege in VwV-StVO
- ▶ Fußläufige Erreichbarkeit als Planungskriterium der Bauleitplanung
- ▶ Änderungen im Bußgeldkatalog, um Fußgänger und Fußgängerinnen wirksamer zu schützen
- ▶ Novellierung des Straßenverkehrsrechts hin zu einem Mobilitätsgesetz (Abschnitt 9.3.1.15),
- ▶ Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit innerorts.

#### Parametrisierung

Die Wirkung der genannten Maßnahmen wird Bauer et al. (2018) entnommen. Dies entspricht einer Steigerung des Fußverkehrs um rund 50 % gegenüber 2015.

### 9.3.1.12 Beschleunigter Ausbau des Schienenverkehrs (Personen- und Güterverkehr)

Die NPM AG 1 geht in ihrem Bericht vom Juni 2021 davon aus, dass in einem sehr ambitioniertem Szenario bis zum Jahr 2030 der Güterverkehr auf 184 Mrd. tkm und der Personenverkehr auf 142 Mrd. pkm zunimmt (NPM 2021). Die Modellierung nimmt dieselben Instrumente wie in NPM (2021) an. Eine zusätzliche Wirkung entsteht durch die stärkeren Push-Instrumente wie beispielsweise die höhere CO<sub>2</sub>-Bepreisung, die Abschaffung des Dieselprivilegs und die Ausgestaltung der Lkw-Maut, durch die eine stärkere Verlagerungswirkung als in NPM (2021) auf die Schiene entsteht.

Die wichtigsten hinterlegten Maßnahmen sind die folgenden, wobei besonders die beiden erstgenannten einen wichtigen Beitrag für die Kapazitätssteigerung liefern:

- ▶ Beschleunigung Deutschlandtakt: 50 % der verkehrlichen Gesamtwirkung werden bis 2030 erreicht. Der Deutschlandtakt führt zu stabileren Verbindungen und erhöht somit die Zuverlässigkeit.
- ▶ Beschleunigung Digitale Schiene: Der Flächenrollout des European Train Control System (ETCS) wird bis 2035 realisiert; bis 2030 stehen ca. 40 % der zusätzlichen Kapazitätseffekte aus ETCS zur Verfügung. Im Güterverkehr Einführung der Digitalen Automatischen Kuppelung (DAK) bis 2030. Wesentliche Wirkungen sind die Kostensenkung (ca. 10 %) im Einzelwagenverkehr und verkürzte Transportzeiten.
- ▶ Beschleunigte Streckenelektrifizierung (75 % des Streckennetzes bis 2030): Daraus folgen zusätzliche batterie-hybride Antriebe im SPV.
- ▶ Steigerung Regionalisierungsmittel im Schienenpersonennahverkehr: Es werden zusätzliche, jährliche Mittel (ab 2024: 4,5 Mrd. €) zur Verfügung gestellt. Die zusätzlichen Mittel führen zur Verbesserung des Angebots und damit zu mehr Angebot.

**Tabelle 96: Zusätzliche Regionalisierungsmittel im Schienenpersonennahverkehr (Mio. €)**

	2021	2022	2023	2024	2025	2030
MMS	303	308	464	472	481	525
KIS-2030	303	308	464	4972	4981	5025

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Öko-Institut

- ▶ Steigerung der monetären Förderung des Einzelwagenverkehrs (Verdopplung der Förderung bis 2030 ggü. 2021)
- ▶ Förderung der Trassenpreise im SPV (50 % Förderung; Trassenpreise haben 25 % Anteil an den Kosten = 12,5 % Kostenreduktion); die 50 %-ige Förderung der Trassenpreise im Schienengüterverkehr wird fortgeführt.
- ▶ Anreize für europäische Verbindungen und Nachtzüge: Nachtzugnetz mit vier Hauptlinien, auf denen die Züge im Mittel 250 Liegeplätze und 375 Sitzplätze anbieten (mittleres Szenario aus der MKS-Studie „Entwicklung eines attraktiven europäischen Nachtzugsystems und Potenziale für den Nachtzugverkehr von, nach und innerhalb Deutschlands“ (Fraunhofer ISI et al. 2017)).

### Parametrisierung

Die Verlagerungswirkung zum Schienenverkehr wird über die ökonomischen Push-Instrumente modelliert und mit den Ergebnissen der Modellierung des NPM plausibilisiert. Eine detaillierte Kapazitätsmodellierung wird nicht durchgeführt.

#### 9.3.1.13 Nationale Umsetzung der RED II / THG-Quote

Der Bundestag hat am 20. Mai 2021 einen Gesetzentwurf zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote) beschlossen, welcher Teil der Bundes-Immissionsschutzgesetz ist (Bundesministerium der Justiz 2021). Im Szenario wird diese THG-Quote hinterlegt.

Ferner wird angenommen, dass konventionelle Biokraftstoffe aus Futter- und Nahrungsmitteln sowie UCOs (Biokraftstoffe nach Anhang IX, Teil B der RED) ab 2025 nur bis zu dem Anteil, mit dem sie auf die THG-Quote anrechenbar sind (2030: 4,4 % für konventionelle, 1,9 % für UCOs in 2030), keinen CO<sub>2</sub>-Preis zahlen müssen. Für darüber hinausgehende Mengen wird der CO<sub>2</sub>-Preis fällig. Dadurch wird der Einsatz nicht-nachhaltiger konventioneller Biokraftstoffe im Verkehr begrenzt. Denn sobald der CO<sub>2</sub>-Preis höher liegt als die Vermeidungskosten dieser Biokraftstoffe, könnten diese zusätzlich und weitgehend unkontrolliert (über die Erfüllung der THG-Quote hinaus) in den Markt gelangen.

Tabelle 97 stellt wesentliche Eckpunkte der THG-Quote dar. Die THG-Quote soll bis zum Jahr 2030 auf 25 % steigen. Für fortschrittliche Biokraftstoffe (RED II Anhang IX Teil A) gilt eine energetische Mindestquote, für Biokraftstoffe aus Altspeiseölen und tierischen Fetten (RED II Anhang IX Teil B) sowie konventionelle Biokraftstoffe gilt dagegen eine energetische Obergrenze für die Anrechenbarkeit auf die THG-Quote.

**Tabelle 97: Eckpunkte der THG-Quote**

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
THG-Quote (CO <sub>2</sub> -Minderung)	7,0 %	8,0 %	9,3 %	10,5 %	12,0 %	14,5 %	17,5 %	21,0 %	25,0 %

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Anhang IX, Teil A (Mindestanteil, energetisch)	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,7 %	1,0 %	1,0 %	1,7 %	1,7 %	2,6 %
Anhang IX, Teil B (Obergrenze, energetisch)	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %
Konventionell (Obergrenze, energetisch)	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %
<b>Biogen gesamt</b>	<b>6,5 %</b>	<b>6,6 %</b>	<b>6,7 %</b>	<b>7,0 %</b>	<b>7,3 %</b>	<b>7,3 %</b>	<b>8,0 %</b>	<b>8,0 %</b>	<b>8,9 %</b>

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach BImSchG, Öko-Institut

Strom im Straßenverkehr wird mit dem Faktor 3 angerechnet. Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe im Straßenverkehr und in Raffinerien werden mit dem Faktor 2 angerechnet, ebenso wie fortschrittliche Biokraftstoffe oberhalb des energetischen Mindestanteils. Maßnahmen zur Reduktion der Upstream-Emissionen (UER) können nur noch bis 2026 mit maximal 1,2 % angerechnet werden.

Weiterhin wurde im BImSchG ein Mechanismus etabliert, der dazu führt, dass bei starker Elektrifizierung des Straßenverkehrs die THG-Quote erhöht wird. Übersteigt der auf die THG-Quote angerechnete Strom die in Tabelle 98 dargestellten Werte, so wird die THG-Quote für das übernächste Verpflichtungsjahr erhöht, und zwar um die halbe bis eineinhalbfache Treibhausgasminde- rung durch die Menge an elektrischem Strom, die über die in der Tabelle genannte Menge hinausgeht. Für die Modellierung wird von einem Faktor 0,5 ausgegangen.

**Tabelle 98: Schwelle des angerechneten Stroms, ab welcher die THG-Quote erhöht wird**

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Angerechneter Strom (PJ)	5	9	13	19	25	38	53	71	88

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach BImSchG, Öko-Institut

### Parametrisierung

Im Szenario erfolgt die Erreichung der THG-Quote zu einem wesentlichen Anteil durch den hohen Anteil von Strom im Verkehr. Bei Biokraftstoffen werden die Anteile wie in Tabelle 97 angesetzt: Die Unterquote für fortschrittliche Biokraftstoffe wird mit 2,6 % im Jahr 2030 erfüllt. Konventionelle Biokraftstoffe schöpfen im Jahr 2030 ihren Maximalanteil für die Anrechnung auf die THG-Quote in Höhe von 4,4 % aus, ebenso wie UCOs mit 1,9 %. Bei strombasierten Kraftstoffen werden dieselben Mengen wie im MMS angenommen (29 PJ in 2030).

Auch der Einsatz von Wasserstoff in Raffinerien kann auf die THG-Quote angerechnet werden. Hierfür wird ein Aufwuchs auf 13 PJ im Jahr 2030 angenommen.

#### 9.3.1.14 PtL im Flugverkehr nach 2030 beschleunigt einführen

Der Markthochlauf von PtL könnte nach 2030 beschleunigt werden, um ambitionierten Klimaschutzmaßnahmen gerecht zu werden. Es wird eine Erhöhung der Quote von 2 % im Jahr 2030 (bereits im MMS enthalten) auf 25 % im Jahr 2045 international bzw. 100 % national eingeführt.

**Parametrisierung**

Die Zunahme der PtL-Kraftstoffe reduziert die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Luftverkehr, führt aber auch zu einem Anstieg der Kraftstoffpreise, aus der auch eine Nachfragereaktion erfolgt

**9.3.1.15 Rechtliche Rahmenbedingungen: Bundesmobilitätsgesetz bzw. ambitionierte Reform der Straßenverkehrsordnung**

Es wird eine ambitionierte Reform der Straßenverkehrsordnung und der Straßenverkehrsgesetze mit klarer Ausrichtung an Klima- und Umweltschutzziele umgesetzt.

- ▶ Die den Straßenverkehr betreffenden Gesetze und Verordnungen werden mit Zweckbestimmungen ausgestattet, die neben der Sicherheit und Ordnung auch den Umweltschutz, die Vorsorge vor dem Entstehen von Gefahren und Belästigungen sowie die städtebauliche Entwicklung einbeziehen (Hermann et al. 2019).
- ▶ Den Kommunen wird mehr Spielraum für die Ausgestaltung der Verkehrswende vor Ort eingeräumt (z. B. bei der Parkraumbewirtschaftung, Flächenumwidmung, angebotsorientierter Rad- und Fußverkehrsplanung, sowie bei der Einrichtung autoreduzierter Quartiere). Dazu kann bspw. die Experimentierklausel in § 45 StVO zu einer „Öffnungs- bzw. Innovationsklausel“ erweitert werden.
- ▶ Gleichzeitig wird für Kommunen die Erstellung von Klimamobilitätsplänen verpflichtend.
- ▶ Stellplatzverordnungen werden geändert, so dass Mobilitätsdienstleistungen als Ersatz für Stellplätze möglich werden.
- ▶ Zur Förderung des Fußverkehrs: Abschaffen des Gehwegparkens (§12 StVO) und Erleichtern des Querens von Fahrbahnen (§ 25 StVO)
- ▶ Technische Regelwerke (z. B. ERA, RILSA) werden klar an Bedürfnissen des Umweltverbands ausgerichtet.

**Parametrisierung**

Die unterstützenden rechtlichen Rahmenbedingungen werden als flankierend bewertet.

**9.3.1.16 Effizienzregulierung für elektrische Pkw**

Es wird eine Regulierung zur Effizienzsteigerung von elektrischen Pkw eingeführt, beispielsweise nach dem „Top-Runner-Prinzip“. Dazu wird zu einem bestimmten Stichtag eine Marktübersicht der elektrischen Fahrzeuge erstellt und der Verbrauch der effizientesten Fahrzeuge zum Standard der Branche erhoben. In den kommenden Jahren müssen die Hersteller diesen Effizienzstandard mindestens erfüllen, ansonsten kommt es, je nach Ausgestaltung des Gesetzes, zu Strafzahlungen oder Verkaufsverboten.

**Parametrisierung**

Die Effizienz von neu zugelassenen elektrischen Pkw nimmt ab 2023 zusätzlich um jährlich 0,5 % zu.

**9.3.2 MMS**

Im zuvor veröffentlichten MMS des Projektionsberichts 2021 wurden die folgenden Instrumente berücksichtigt:

- a) CO<sub>2</sub>-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr
- b) Erhöhung der Luftverkehrsteuer (LuftVSt)

- c) Mehrwertsteuersenkung Bahn-Fernverkehr
- d) Elektrifizierung Schienenverkehr
- e) Stärkung Schienenpersonenfernverkehr (SPFV): Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung
- f) Stärkung Schienenpersonennahverkehr und Verbesserung der Angebotsqualität und Attraktivität des ÖPNV
- g) Stärkung Schienengüterverkehr: Trassen- und Anlagenpreisförderung, Bundesprogramm Zukunft Schienengüterverkehr, Netzausbau, Kapazitätserhöhung, Anschlussförderung
- h) Ausbau von Radinfrastruktur und Fahrradparkmöglichkeiten sowie allgemeine Verbesserung der Rahmenbedingungen für den Radverkehr
- i) Kaufprämie und Infrastrukturförderung für E-Pkw
- j) Vergünstigte Besteuerung von elektrischen Dienstwagen und andere steuerliche Vorteile
- k) Absenkung der EEG-Umlage ab 2021
- l) Kraftfahrzeugsteuer: stärkere Gewichtung der CO<sub>2</sub>-Komponente für Pkw und verlängerte Gewährung der Befreiung für erstzugelassene reine Elektrofahrzeuge
- m) Förderung von umweltfreundlichen Bussen
- n) Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben
- o) Sonder-AfA für elektrisch angetriebene NFz bis 2030
- p) Förderung des Aufbaus öffentlicher und privater Versorgungsinfrastruktur für elektrifizierte Nutzfahrzeuge
- q) Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler
- r) Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe sowie von Antriebstechnologien für die Luftfahrt
- s) CO<sub>2</sub>-Spreizung der Lkw-Maut
- t) EU-CO<sub>2</sub>-Standards für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge für 2025 und 2030
- u) CO<sub>2</sub>-Standards für schwere Nutzfahrzeuge
- v) Nationale Umsetzung RED II: Anpassung der Treibhausgasquote
- w) Umsetzung der Clean Vehicle Directive
- x) Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen und alternative Antriebe
- y) Binnenschifffahrt: Abschaffung der Kanalgebühren
- z) Förderung der Umstellung von Flugzeugflotten
- aa) Gebühren für Bewohnerparkausweise
- bb) Beschleunigung von Planung und Umsetzung neuer Infrastrukturen
- cc) Unterstützung bei der Transformation der Automobilindustrie
- dd) Novelle der Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung
- ee) Steigerung des Anteils umweltschonend betriebener Kraftfahrzeuge im Fuhrpark des Bundes

ff) Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen, innovative Mobilitätsformen ermöglichen  
Eine Beschreibung der Instrumente und Maßnahmen sowie deren Parametrisierung kann Öko-Institut et al. (2021) entnommen werden.

## 9.4 Ergebnisse

### 9.4.1 KIS-2030

#### 9.4.1.1 Verkehrsnachfrage

##### Personenverkehr

Tabelle 99 und Abbildung 72 zeigen die Entwicklung der Personenverkehrsnachfrage im KIS-2030 bis zum Jahr 2040. Daten bis 2020 sind aus „Verkehr in Zahlen“ (BMVI 2020), TREMOD 6.01 und der Genesis-Datenbank des Statistischen Bundesamtes<sup>76</sup> übernommen. Der in Personenkilometern gemessene Verkehrsaufwand im Personenverkehr nimmt bis 2025 gegenüber 2018 um 2 % zu und bleibt danach konstant.

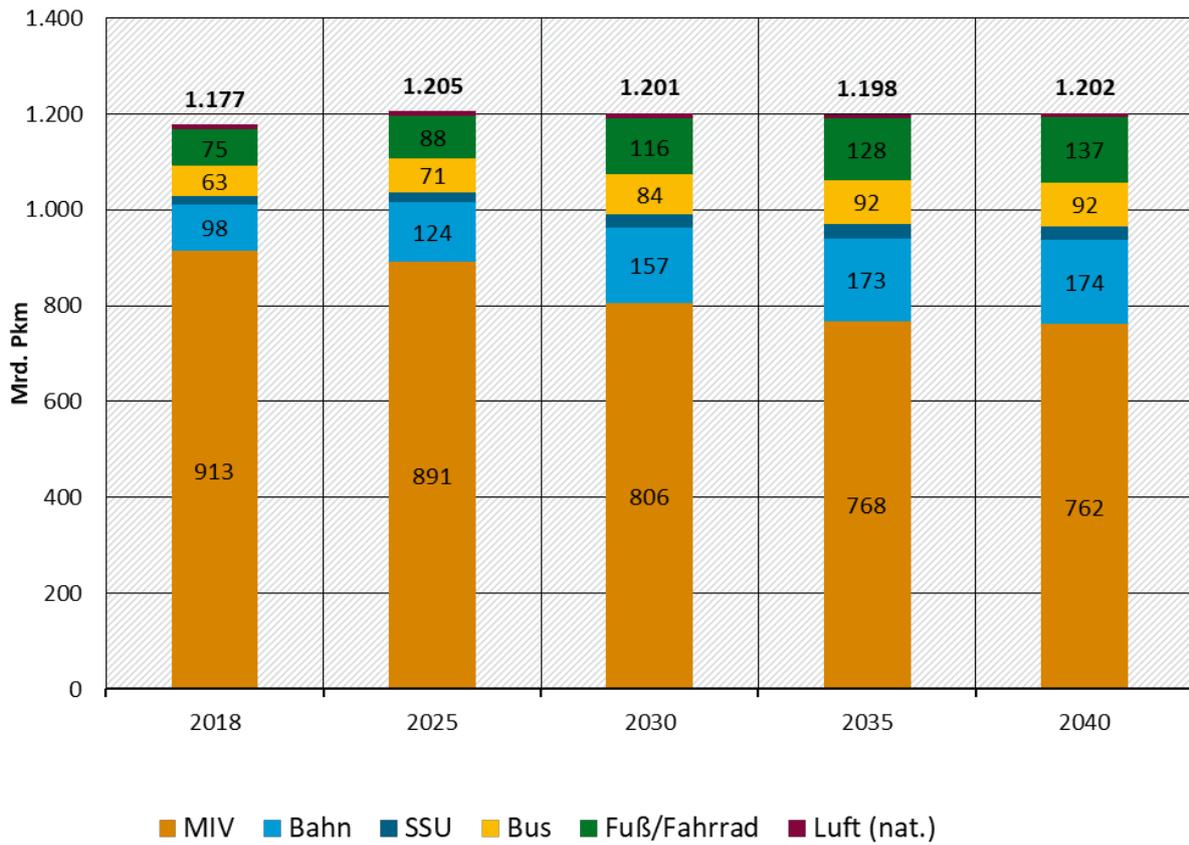
Der Pkw-Verkehr nimmt im KIS-2030 zugunsten öffentlicher und nicht-motorisierter Verkehrsmittel sukzessive ab (-12 % zwischen 2018 und 2030). Dabei spielen zwei Faktoren eine Rolle: Zum einen dämpfen die - unter anderem durch den höheren CO<sub>2</sub>-Preis und die Anpassungen der Energiebesteuerung steigenden - Kraftstoffkosten die Verkehrsnachfrage im motorisierten Individualverkehr (MIV) und zum anderen bewirkt das flankierende Instrumentenbündel zur Förderung des Umweltverbunds (z. B. beschleunigte Einführung des „Deutschland-Takts“ und der „Digitalen Schiene“, Erhöhung der Regionalisierungsmittel, erhöhte Investitionen in den Fuß- und Radverkehr) eine Verkehrsverlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsmittel. So steigt beispielsweise die Verkehrsnachfrage im Fuß- und Fahrradverkehr bis 2030 um +54 % im Vergleich zu 2018.

Die Verkehrsnachfrage im öffentlichen Personenverkehr nimmt im KIS-2030 zwischen 2018 und 2030 um durchschnittlich 4,1 % pro Jahr zu. Im Vergleich lag die Entwicklung nach Daten des Statistischen Bundesamtes zwischen 2010 und 2018 deutlich geringer bei rund +1,2 % pro Jahr (Destatis 2020). Neben den kosteninduzierten Verlagerungseffekten trägt auch der beschleunigte Ausbau des Schienenverkehrs zu einer erheblich gesteigerten Nachfrage nach öffentlichen Verkehrsmitteln bei. Die signifikante Steigerung der Nachfrage nach öffentlichen Verkehrsmitteln entsteht insbesondere durch den Bahn-Verkehr (+60 % zwischen 2018 und 2030) und Verkehrsmittel im urbanen Kontext wie Straßen-, Stadt- und U-Bahnen (SSU: +50 %). Auch bei Bussen ist ein deutlicher Zuwachs von +33 % zu verzeichnen. Trotz des deutlichen Zuwachses des öffentlichen Verkehrs wird das offizielle Ziel der Bundesregierung, welches eine Verdopplung der Verkehrsleistung vorsieht, verfehlt.

Beim Luftverkehr bleibt die Nachfrage nach innerdeutschen Flügen in etwa auf vergleichbarem Niveau zu heute. Dies ist unter anderem auf die Einführung eines Energiesteuersatzes von 33 ct je Liter Kerosin für Inlandsflüge zurückzuführen, da diese Steuer einer steigenden Nachfrage entgegensteuert. Die aus Deutschland abgehenden internationalen Flüge sind hier separat ausgewiesen, deren Treibhausgasemissionen sind allerdings nicht Teil der nationalen Klimaschutzverpflichtungen.

<sup>76</sup> <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>

**Abbildung 72: Personenverkehrsnachfrage im KIS-2030, 2018-2040**



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

**Tabelle 99: Verkehrsnachfrage Personenverkehr im KIS-2030 in Mrd. Pkm, 2018-2040**

	2018	2025	2030	2035	2040
Pkw	895	873	789	752	747
Kraftrad	18	18	17	16	15
ÖPV – Bahn	98	124	157	173	174
ÖPV – SSU <sup>77</sup>	18	22	27	29	29
ÖPV – Bus	63	71	84	92	92
Flugzeug (national)	10	10	11	9	9
Rad/Fuß	75	88	116	128	137
<b>Gesamt national</b>	<b>1.177</b>	<b>1.205</b>	<b>1.201</b>	<b>1.198</b>	<b>1.202</b>
Flugzeug (international)	238	286	323	351	379
<b>Gesamt</b>	<b>1.415</b>	<b>1.492</b>	<b>1.524</b>	<b>1.550</b>	<b>1.581</b>

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

### Güterverkehr

Tabelle 100 und Abbildung 73 stellen die Entwicklung der Güterverkehrsnachfrage im KIS-2030 bis 2040 dar. Daten bis 2020 sind aus „Verkehr in Zahlen“ (BMVI 2020), TREMOD 6.01 und der Genesis-Datenbank des Statistischen Bundesamtes übernommen. Der in Tonnenkilometern gemessene Güterverkehrsaufwand nimmt im KIS-2030 zwischen 2018 und 2030 um durchschnittlich 1,4 % p.a. zu, was in etwa der Wachstumsrate zwischen 2010 und 2018 entspricht. Im Zeitraum 2030 bis 2040 liegt der Anstieg bei 0,8 % p.a.

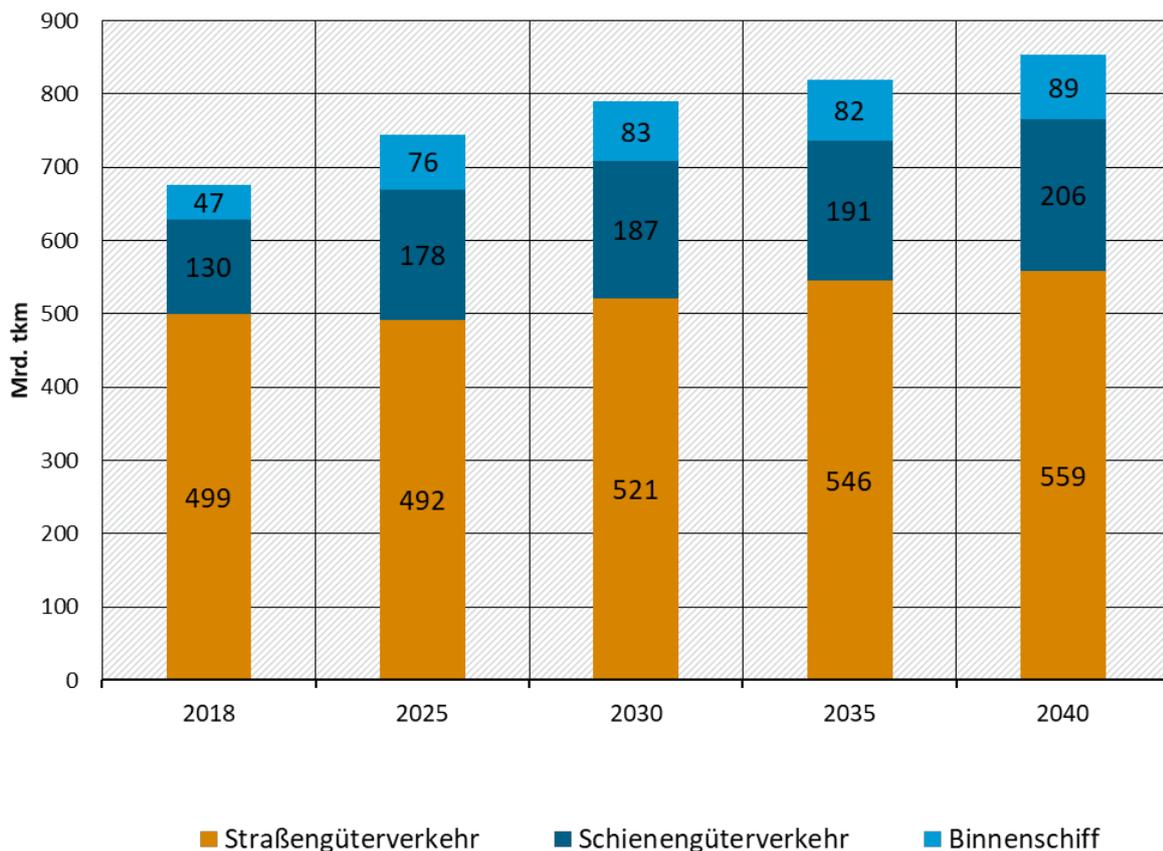
Der Schienengüterverkehr hat zwischen 2010 und 2018 ein deutliches Wachstum von durchschnittlich 2,4 % p.a. verzeichnet, mit besonders hohen Wachstumsraten in den letzten Jahren. Im KIS-2030 werden die Wachstumsraten bis 2030 weiter auf 3,7 % p.a. gesteigert (+43 % zwischen 2018 und 2030). Der Schienengüterverkehr erreicht im Jahr 2030 mit 187 Mrd. tkm einen Modalanteil in Höhe von knapp 24 %. Ab 2030 flacht das Wachstum auf jährlich 1,0 % ab und der Modalanteil verbleibt auf ähnlichem Niveau.

Die Verkehrsnachfrage in der Binnenschifffahrt ist seit 2010 zurückgegangen. Im KIS-2030 wird von einer Erholung der Nachfrage sowie anschließendem Anstieg auf 83 Mrd. tkm im Jahr 2030 (+77 % zwischen 2018 und 2030) und 89 Mrd. tkm im Jahr 2040 ausgegangen.

Trotz der deutlichen Verlagerung von der Straße zum Schienen- und Schiffsverkehr, wächst die Nachfrage im Straßengüterverkehr aufgrund des insgesamt steigendem Transportaufkommens weiter um rund 4 % zwischen 2018 und 2030 an.

Der nationale Luftverkehr trägt hingegen nicht nennenswert zum Güterverkehrsaufwand bei (Tabelle 100).

<sup>77</sup> Straßen-, Stadt-, und U-Bahnen.

**Abbildung 73: Güterverkehrsnachfrage im KIS-2030, 2018-2040**

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

**Tabelle 100: Verkehrsnachfrage Güterverkehr im KIS-2030 in Mrd. tkm, 2018-2040**

	2018	2025	2030	2035	2040
Straße	499	492	521	546	559
Schiene	130	178	187	191	206
Binnenschiff	47	76	83	82	89
Flugzeug (national)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
<b>Gesamt national</b>	<b>676</b>	<b>745</b>	<b>791</b>	<b>820</b>	<b>853</b>
Flugzeug (international)	13	14	15	16	17
<b>Gesamt</b>	<b>689</b>	<b>759</b>	<b>806</b>	<b>836</b>	<b>871</b>

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

### Fahrleistungen im Straßenverkehr

Für die Fahrleistungen im Straßenverkehr wird bis 2018 das Fahrleistungsgerüst aus TREMOD 6.01 und Verkehr in Zahlen (BMVI 2020) verwendet. Die Fahrleistung bei Pkw geht zwischen 2018 und 2030 um jährlich rund 1,0 % zurück und ab 2030 um 0,5 % pro Jahr. Bei Lkw steigt die Fahrleistung im Zeitraum 2018-2030 um rund 0,7 % p.a. und bei leichten Nutzfahrzeugen um rund 0,6 % p.a. Zwischen 2030 und 2040 nimmt die Fahrleistung bei Lkw um 0,7 % p.a. und bei leichten Nutzfahrzeugen um 1,0 % p.a.

**Tabelle 101: Fahrleistungen im KIS-2030 in Mrd. km, 2018-2040**

	2018	2025	2030	2035	2040
Pkw	642	626	566	540	536
LNF	52	55	56	58	61
Lkw 3,5-12t zGG	10	11	12	12	13
Lkw > 12t zGG	51	51	55	58	61

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

### Internationaler Seeverkehr

Der internationale Seeverkehr nimmt im Zeitraum 2018-2040 um 57 % zu. Es entsteht keine Veränderung zum MMS, da für den internationalen Seeverkehr keine zusätzlichen Instrumente im KIS-2030 hinterlegt sind.

**Tabelle 102: Verkehrsnachfrage Seeverkehr im KIS-2030 in Mrd. tkm, 2018-2040**

	2018	2025	2030	2035	2040
Hochseeschifffahrt	2.152	2.580	2.930	3.152	3.386

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

### 9.4.1.2 Antriebstechnologien

#### Pkw

Bei der Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen steigt im KIS-2030 der Anteil batterieelektrischer Pkw (BEV) bis zum Jahr 2025 sukzessive auf rund 61 % an (Abbildung 74). Ausschlaggebend ist die Einführung einer Malus-Komponente für stark CO<sub>2</sub>-emittierende Pkw (>95 g CO<sub>2</sub>/km) beim Fahrzeugkauf (umgesetzt als erhöhter Steuersatz im ersten Jahr nach Neuzulassung in der Kfz-Steuer), die ab dem Jahr 2025 voll wirksam wird. Mit dem Auslaufen der Kaufprämie sinkt der Neuzulassungsanteil von BEV zunächst auf 46 % im Jahr 2026 und steigt in der weiteren Entwicklung durch das Zusammenwirken verschiedener Instrumente wie z. B. der steigenden Kfz-Steuer für fossile Antriebe, und steigenden Kraftstoffpreisen (z. B. CO<sub>2</sub>-Preis, Anpassung Energiebesteuerung) erneut auf einen Anteil über 63 % im Jahr 2030 an.

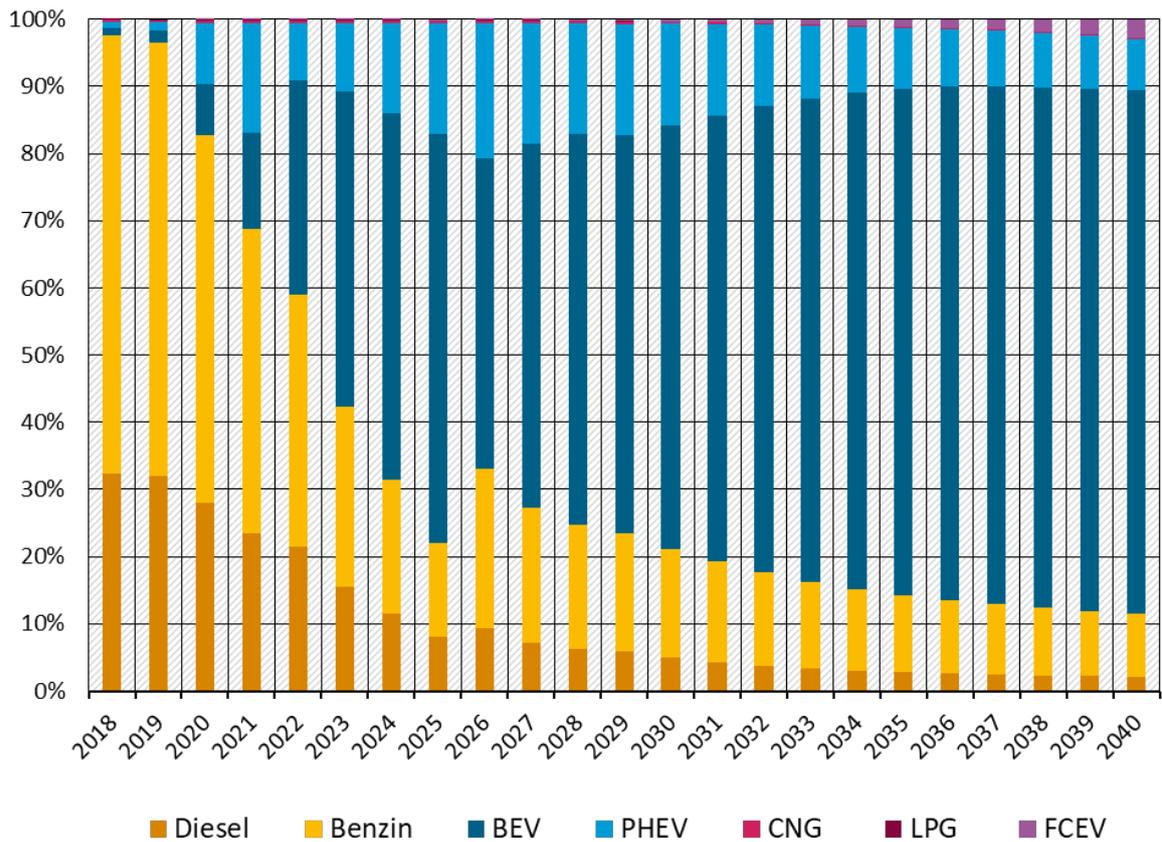
Plug-in-Hybride (PHEV) spielen nach dem Ende der Förderung im Jahr 2022 eine geringere Rolle bei den Neuzulassungen elektrischer Pkw. Der Anteil von Plug-in-Hybriden an den Neuzulassungen insgesamt steigt von 8,5 % im Jahr 2022 auf rund 20 % im Jahr 2026 und fällt anschließend bis zum Jahr 2030 auf 15 % zurück.

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) sind im Pkw-Bereich nur in Ausnahmefällen wirtschaftlich einsetzbar und kommen daher in vernachlässigbaren Stückzahlen auf den Markt.

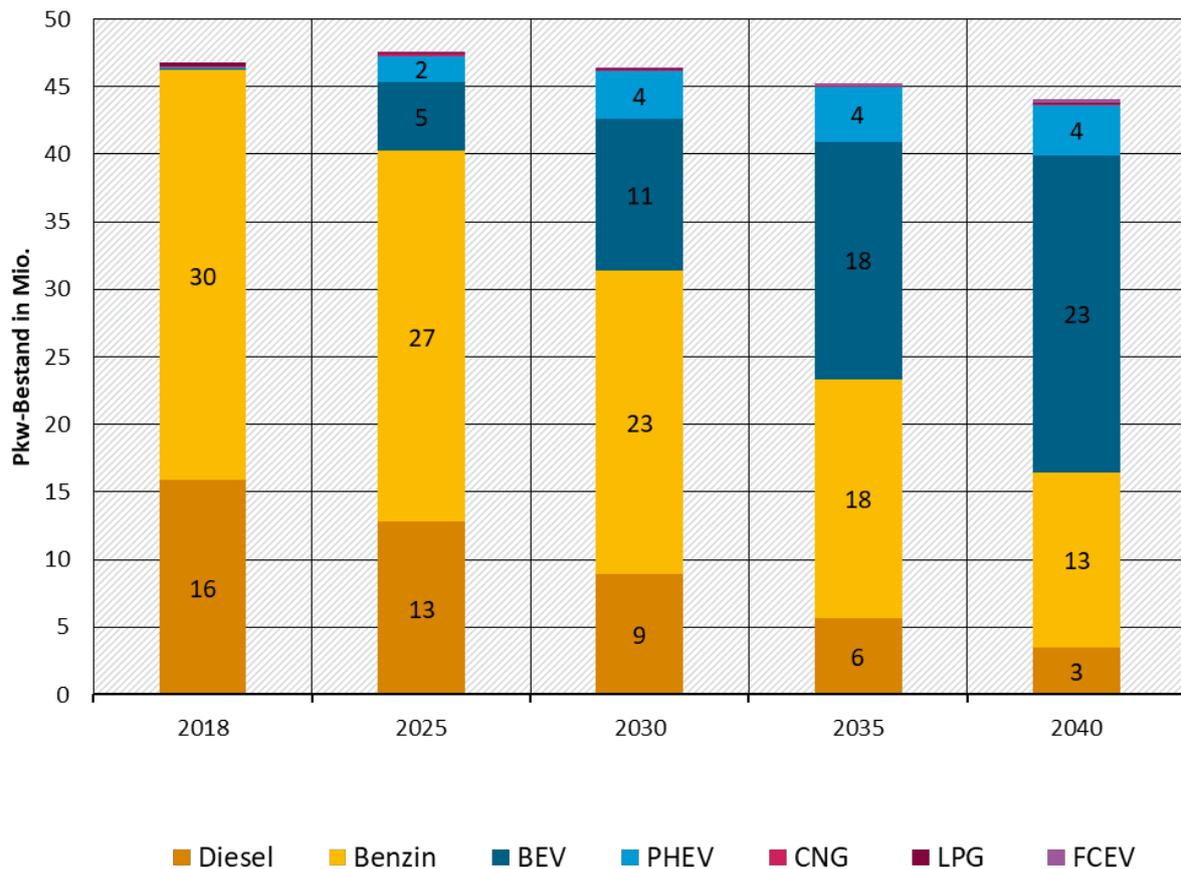
Die ökonomischen Anreizinstrumente beim Fahrzeugkauf führen verglichen mit dem MMS zu einer stärkeren Zunahme effizienterer verbrennungsmotorischer Pkw sowie elektrisch angetriebener Fahrzeuge.

Im Jahr 2030 sind rund 14,7 Millionen elektrische Fahrzeuge im Bestand bei einem Anteil von über 75 % rein elektrischer Fahrzeuge. Die Anzahl der Fahrzeuge im Pkw-Bestand im Jahr 2030 entspricht in etwa dem Niveau des Jahres 2018 (Abbildung 75).

**Abbildung 74: Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen nach Antrieben, 2018-2040**



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

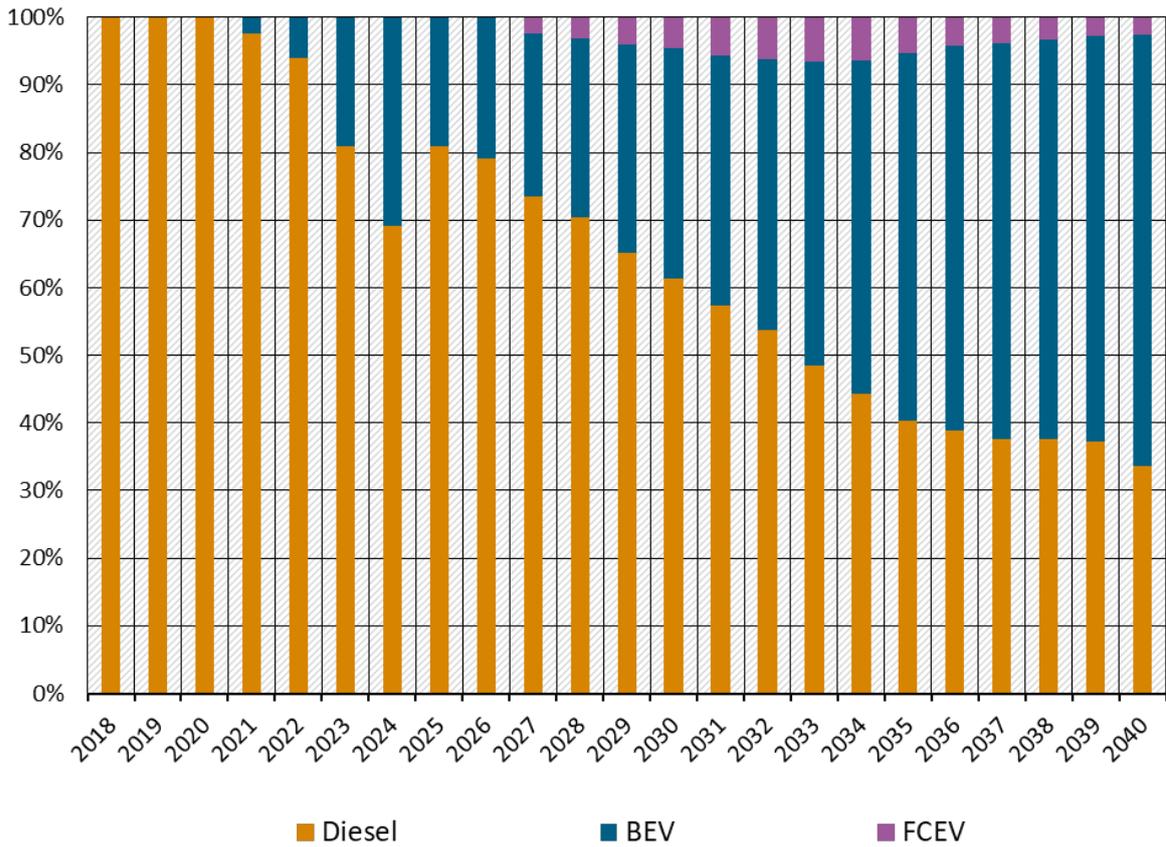
**Abbildung 75: Pkw-Bestand nach Antrieben, 2018-2040**

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

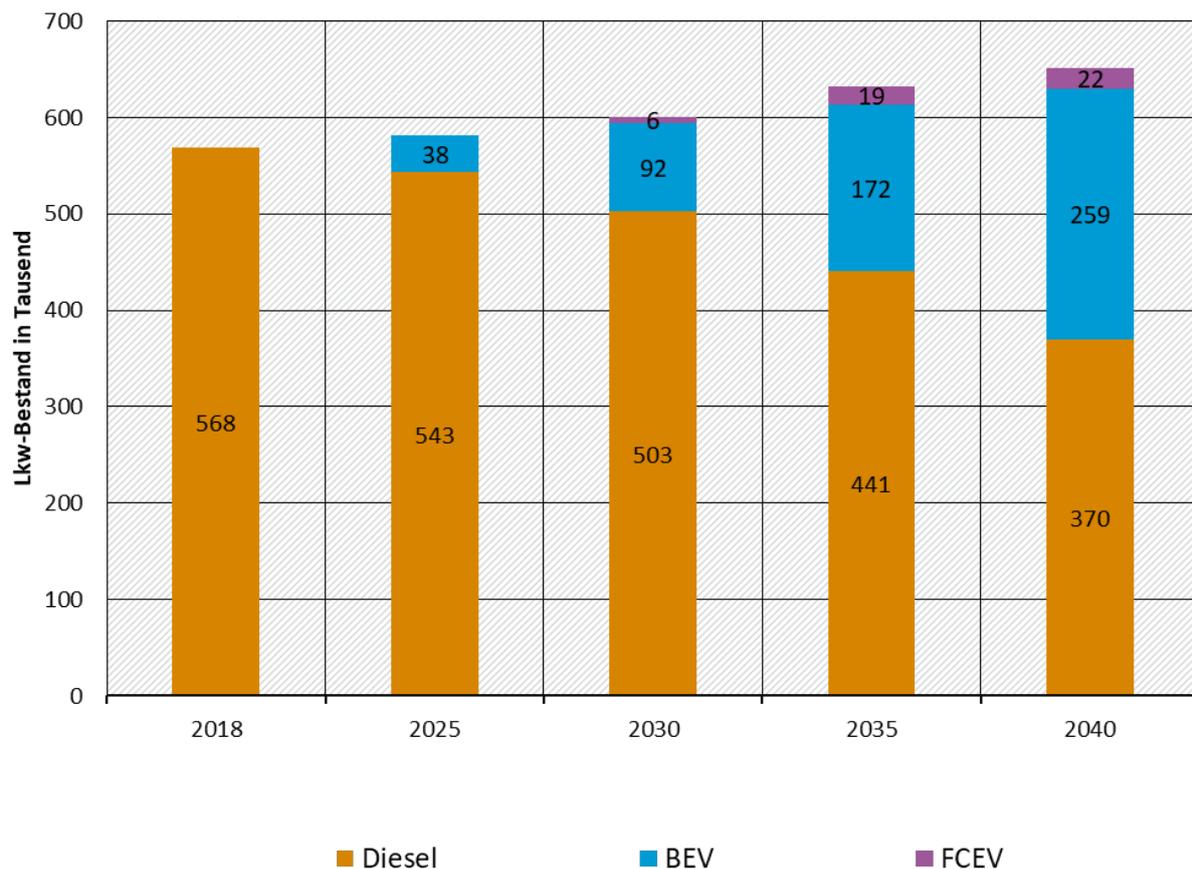
### Lkw

Der Anteil elektrischer Antriebe an den Lkw-Neuzulassungen (über 3,5 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht, ohne Last- und Sattelzüge) steigt im KIS-2030 auf nahezu 39 % im Jahr 2030 (Abbildung 76). Bis 2024 wirken die Kaufprämien auf den Zuwachs elektrischer Lkw. Die Ausweitung der Lkw-Maut auf alle Fahrzeuge und alle Straßen sowie vor allem die Einführung der CO<sub>2</sub>-Komponente bedingen wesentlich den weiteren Zuwachs elektrischer Lkw. Im KIS-2030 ergeben sich durch die Verfügbarkeit von Lade- und Tankinfrastrukturen in Richtung 2030 geringere Einschränkungen für den Betrieb elektrischer Lkw, sodass etwa die Hälfte aller Lkw-Fahrprofile keinen Restriktionen mehr unterliegen. Im Jahr 2030 verzeichnet der Bestand einen Anteil von rund 16 % an Lkw mit elektrischem Antrieb (Abbildung 77).

**Abbildung 76: Entwicklung der Lkw-Neuzulassungen nach Antrieben (>3,5 t zGG, ohne Last- und Sattelzüge), 2018-2040**



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

**Abbildung 77: Lkw-Bestand nach Antrieben (>3,5 t zGG, ohne Last- und Sattelzüge), 2018-2040**

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

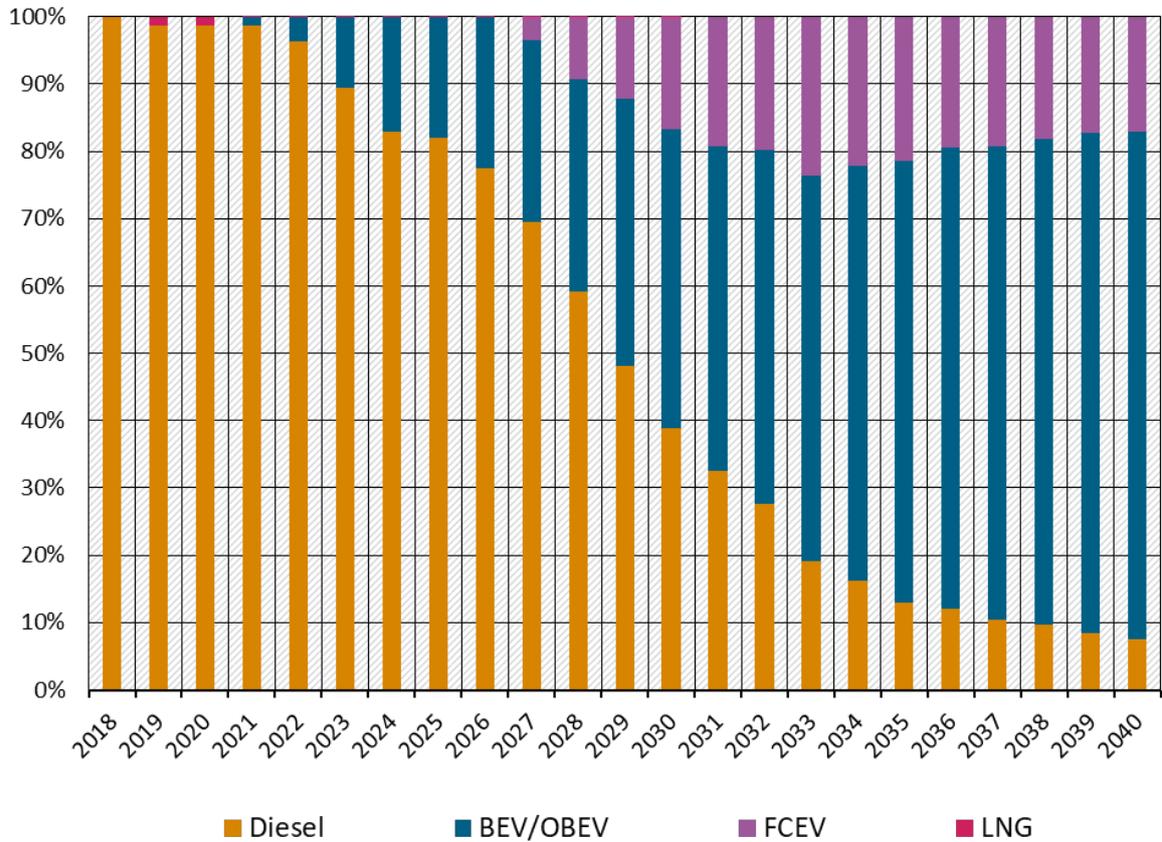
Der Anteil elektrischer Antriebe an den Neuzulassungen für Last- und Sattelzüge steigt im KIS-2030 kontinuierlich über die Jahre an und erreicht im Jahr 2030 einen Anteil von 61 % (Abbildung 78). Die schnellere Elektrifizierung der Last- und Sattelzüge im Vergleich zu den leichteren Lkw begründet sich durch die höheren Fahrleistungen, durch welche die geringeren Kilometerkosten elektrischer Antriebe stärker zum Tragen kommen. So verfügen 2030 rund 29 % der Last- und Sattelzüge im Bestand über einen elektrischen Antrieb (Abbildung 79).

Voraussetzung für den Betrieb elektrischer Last- und Sattelzüge ist die Verfügbarkeit von Lade- und Tankinfrastruktur. Im KIS-2030 werden ab 2024 Hochleistungs-Schnellladepunkte zunehmend flächendeckend aufgebaut und Restriktionen der Kaufentscheidung für batterieelektrische Nutzfahrzeuge sukzessive zurückgenommen. Parallel stehen für Oberleitungs-Lkw ab 2024 in Summe rund 300 km Pendelstrecken und bis 2040 ein Gesamtnetz von 4.000 km elektrifizierter Fahrbahnen bereit. Last- und Sattelzüge mit Brennstoffzellenantrieb (FCEV) und ein Basisnetz an Wasserstoff-Tankstellen sind ab 2027 verfügbar. Das limitierte Angebot an Energieinfrastrukturen und Fahrzeugmodellen dämpft die Wirkung der Kaufprämien auf den Absatz elektrischer Last- und Sattelzüge, die im KIS-2030 im Jahr 2024 auslaufen.

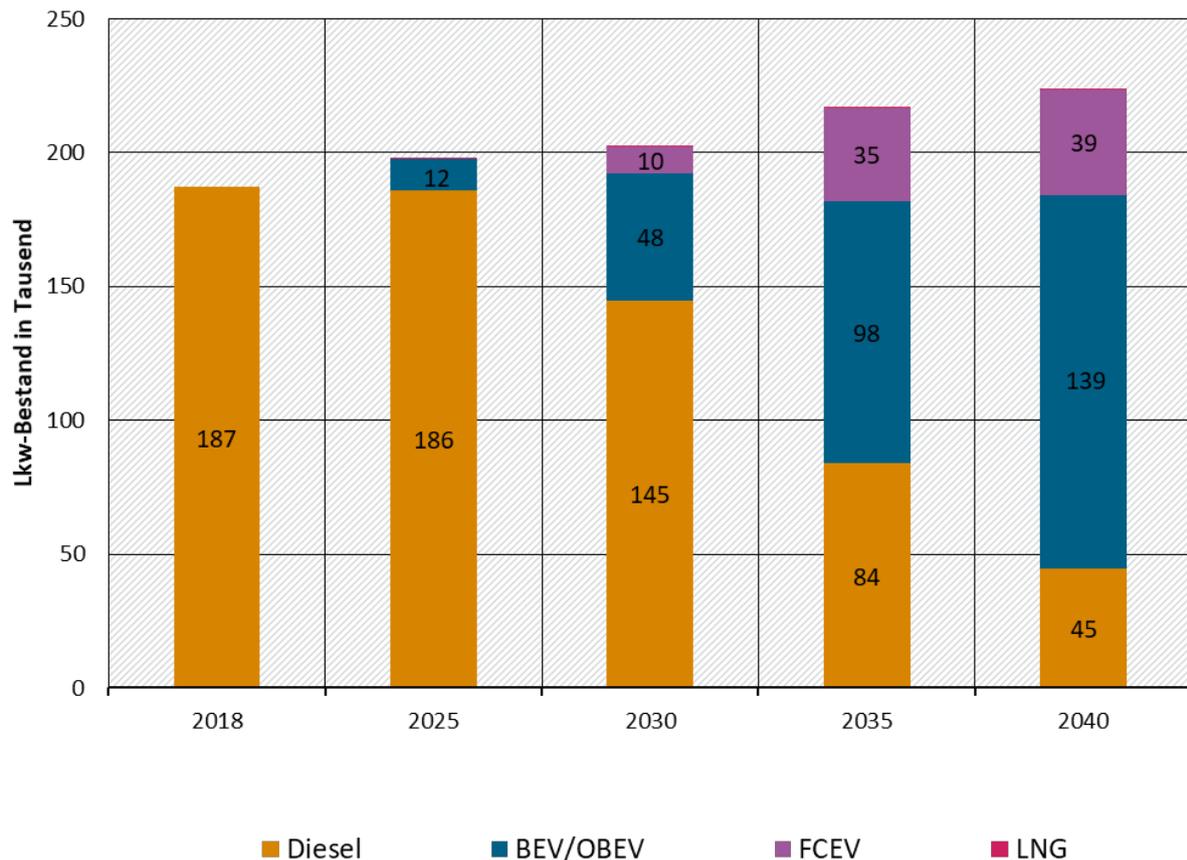
Die Nachfrage nach elektrischen Last- und Sattelzügen wird im KIS-2030 wesentlich durch die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Komponente sowie einer Spreizung der Infrastrukturkomponente in der Lkw-Maut begünstigt. Im Jahr 2030 weisen batterieelektrische Last- und Sattelzüge (BEV, inkl. Fahrzeugen mit Stromabnehmern für Oberleitungen: OBEV) einen Anteil von 44 % und Brennstoffzellenantriebe (FCEV) einen Anteil von 17 % an den Neuzulassungen von Last- und Sattelzügen auf. Im Zeitraum von 2033 bis 2040 wächst einzig die Nachfrage nach batterieelektrischen Last- und Sattelzügen, die keinen relevanten Einsatzrestriktionen mehr unterliegen.

Im KIS-2030 werden die CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards für schwere Nutzfahrzeuge im deutschen Flottenmix erfüllt. Der Anteil an neu zugelassenen elektrischen schweren Nutzfahrzeugen im Jahr 2030 führt dazu, dass die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung bei neu zugelassenen Lkw deutlich über der aktuell geforderten Minderung von 30 % der CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen (je Hersteller) liegt.

**Abbildung 78: Entwicklung der Lkw-Neuzulassungen nach Antrieben (Last- und Sattelzüge), 2018-2040**



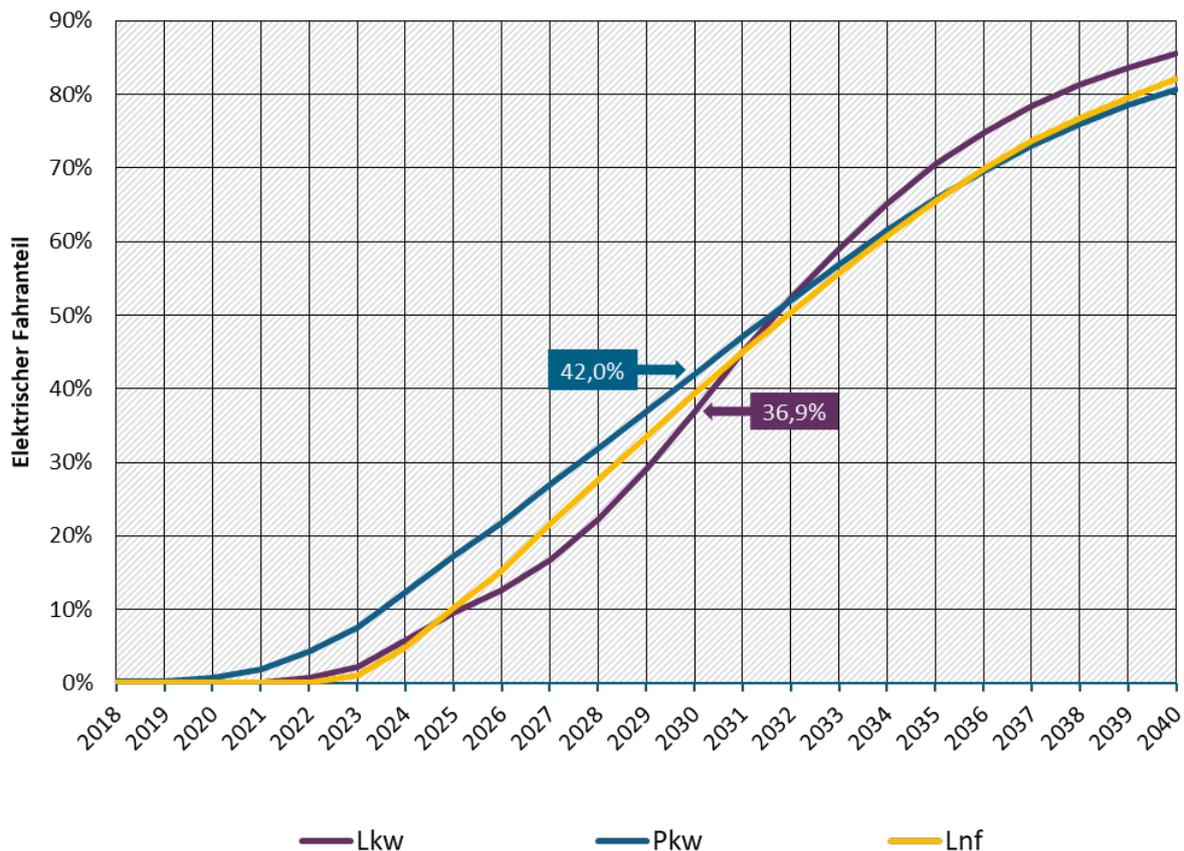
Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

**Abbildung 79: Lkw-Bestand nach Antrieben (Last- und Sattelzüge), 2018-2040**

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

### Elektrische Fahranteile

Die fortlaufende Elektrifizierung des Bestandes von Pkw und Lkw sowie leichter Nutzfahrzeuge führt zu einem ansteigenden elektrischen Fahranteil. Im Jahr 2030 beträgt der elektrische Fahranteil bei Pkw bereits 42 %. Bei den Lkw beträgt der Anteil rund 37 % (24 % BEV, 8 % FCEV und 5 % O-Lkw) und übererfüllt damit leicht das Ziel der Bundesregierung von einem Drittel elektrischer (bzw. strombasierter) Fahrleistung für das Jahr 2030 (BMU 2019). Der Anteil bei den leichten Nutzfahrzeugen beträgt rund 39 %. Unabhängig vom Fahrzeugtyp steigt der elektrische Fahranteil über die folgenden Jahre weiter deutlich an.

**Abbildung 80: Entwicklung des elektrischen Fahranteils von Lkw, Pkw und leichten Nutzfahrzeugen**

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

### 9.4.1.3 Entwicklung des Endenergieverbrauchs

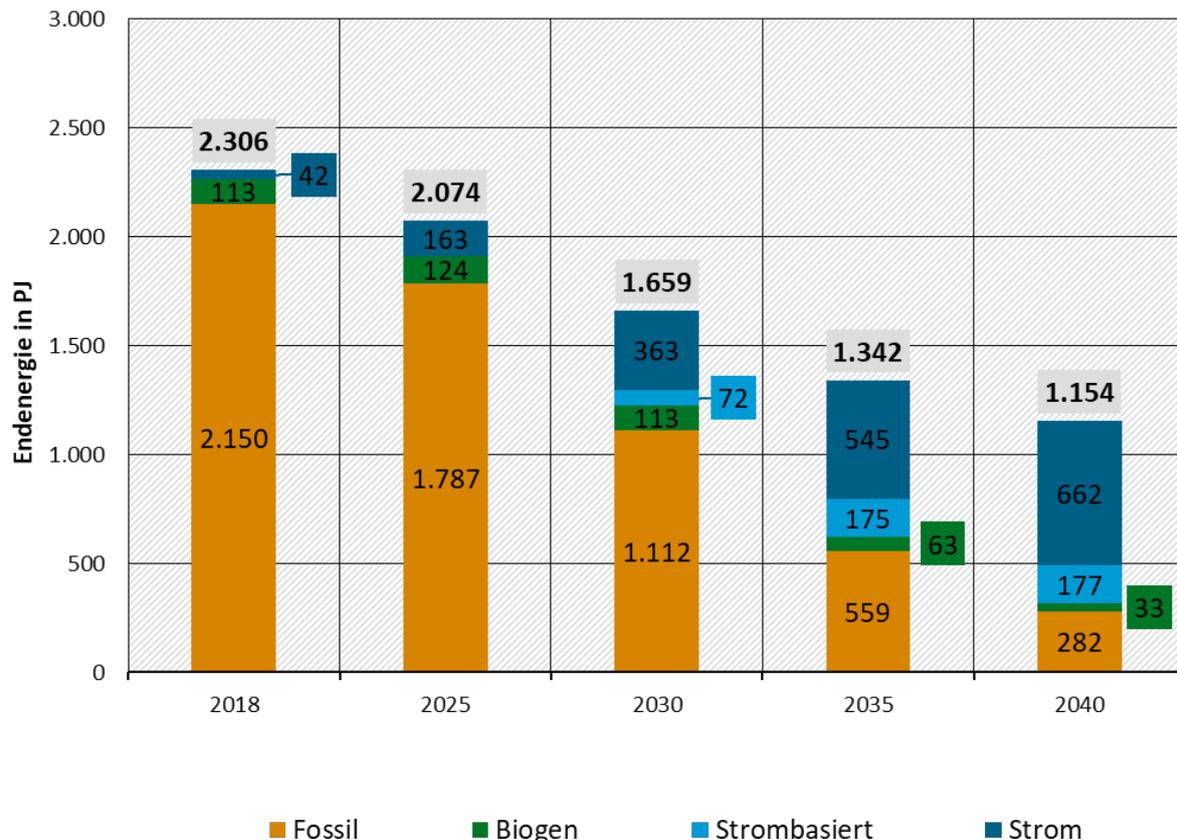
Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrssektors ist in Abbildung 81 sowie in Tabelle 103 dargestellt. Gegenüber 2018 geht der Endenergieverbrauch des nationalen Verkehrs bis zum Jahr 2030 um 28,1 % zurück. Bis zum Jahr 2040 wird gegenüber 2018 ein Rückgang des Endenergieverbrauchs des nationalen Verkehrssektors um 50,0 % erreicht. Ursache dafür ist vor allem die zunehmende Elektrifizierung sowie die Verlagerung auf weniger energieintensive Verkehrsmittel. Der Einsatz fossiler Kraftstoffe geht bis 2030 um 48,3 % und bis 2040 um 86,9 % gegenüber 2018 zurück.

Die Zusammensetzung und Menge an erneuerbaren Kraftstoffen ergeben sich maßgeblich aus der Ausgestaltung der THG-Quote im Verkehr. Der Einsatz von Biokraftstoffen und Biogas nimmt ab 2025 auf Grund der sinkenden Nachfrage von Kraftstoffen trotz des steigenden Ambitionsniveaus der THG-Quote insgesamt ab. Im Jahr 2030 liegt die Nachfrage mit 113 PJ etwa auf dem Niveau von 2018. Damit kann das freiwerdende Mengenpotenzial an nachhaltiger Biomasse in anderen Sektoren stofflich bzw. energetisch verwendet werden. Die Mindestanteile für fortschrittliche Biokraftstoffe werden zunächst maßgeblich über den Einsatz von Biogas erfüllt, da dies die kostengünstigste und am einfachsten verfügbare Erfüllungsoption darstellt, und der Einsatz von fossilem Erdgas wird vollständig ersetzt. Bis zum Jahr 2030 verbleibt der Einsatz von strombasierten Kraftstoffen im Straßenverkehr mit knapp unter 30 PJ auf dem Niveau des MMS und erhöht sich danach leicht. Eine stärkere Nachfrage stellt sich jedoch für grünen Wasserstoff ein, indem Brennstoffzellenfahrzeuge vor allem im Schwerlastverkehr einen Bedarf an

Wasserstoff erzeugen. Im Gegensatz dazu verringert sich die Nutzung der Biomasse im Verkehrssektor über die Zeit immer weiter.

Der wachsende Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge sowie der ebenfalls zunehmende Schienenverkehr führt zu einem steigenden Stromverbrauch des Verkehrssektors in Höhe von insgesamt 363 PJ im Jahr 2030 und 662 PJ im Jahr 2040. Der Bedarf an Kerosin für den nationalen Flugverkehr nimmt bis 2030 nur leicht ab und sinkt von 27 PJ in 2018 auf rund 24 PJ in 2030. Der Bedarf nimmt bis 2040 um weitere 10 PJ ab. Im Jahr 2030 sind rund 0,5 PJ und in 2040 rund 10 PJ durch strombasiertes Kerosin (PtL) gedeckt.

**Abbildung 81: Endenergiebedarf im nationalen Verkehr, 2018-2040**



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

**Tabelle 103: Endenergiebedarf des Verkehrssektors (ohne Sonderverkehre) im KIS-2030 in PJ, 1990-2040**

Energieträger	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Benzin	1.330,5	992,4	692,7	625,7	425,7	235,6	123,8
Diesel	827,8	1.122,7	1.410,6	1126,0	660,2	310,9	152,7
LPG	0,1	2,4	13,6	6,4	2,5	1,0	0,4
Erdgas	-	3,1	6,0	4,6	0,0	0,0	0,0
(Bio-)Ethanol	-	6,8	31,1	40,6	31,6	18,8	10,8
Biodiesel	-	72,5	80,6	72,7	65,1	32,3	16,6
Biogas	-	-	1,4	10,3	15,9	11,8	5,9

Energieträger	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Power-to-Liquid <sup>78</sup>	-	-	-	-	28,3	63,3	67,9
Wasserstoff	-	-	-	0,3	43,8	111,9	108,8
Strom	49,2	58,7	42,2	163,3	362,9	544,6	662,3
Kerosin (nat. Luftverkehr)	31,2	30,5	27,2	23,9	23,3	11,8	4,7
Steinkohlen	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Summe(national)</b>	<b>2.239,4</b>	<b>2.289,3</b>	<b>2.305,8</b>	<b>2.073,8</b>	<b>1.659,3</b>	<b>1.342,0</b>	<b>1.154,0</b>
Kerosin (Int. Luftverkehr)	164,5	314,0	410,4	435,1	456,3	463,2	468,9
Seeschifffahrt: Diesel und LNG	81,4	90,3	55,5	34,0	36,5	35,8	35,0
<b>Summe international</b>	<b>245,9</b>	<b>404,3</b>	<b>465,9</b>	<b>469,1</b>	<b>492,9</b>	<b>499,0</b>	<b>503,9</b>
<b>Summe gesamt</b>	<b>2.485</b>	<b>2.694</b>	<b>2.772</b>	<b>2.543</b>	<b>2.152</b>	<b>1.841</b>	<b>1.658</b>

Quelle: (UBA 2020d), eigene Berechnungen des Öko-Instituts. Diesel inklusive andere Mineralölprodukte.

#### 9.4.1.4 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

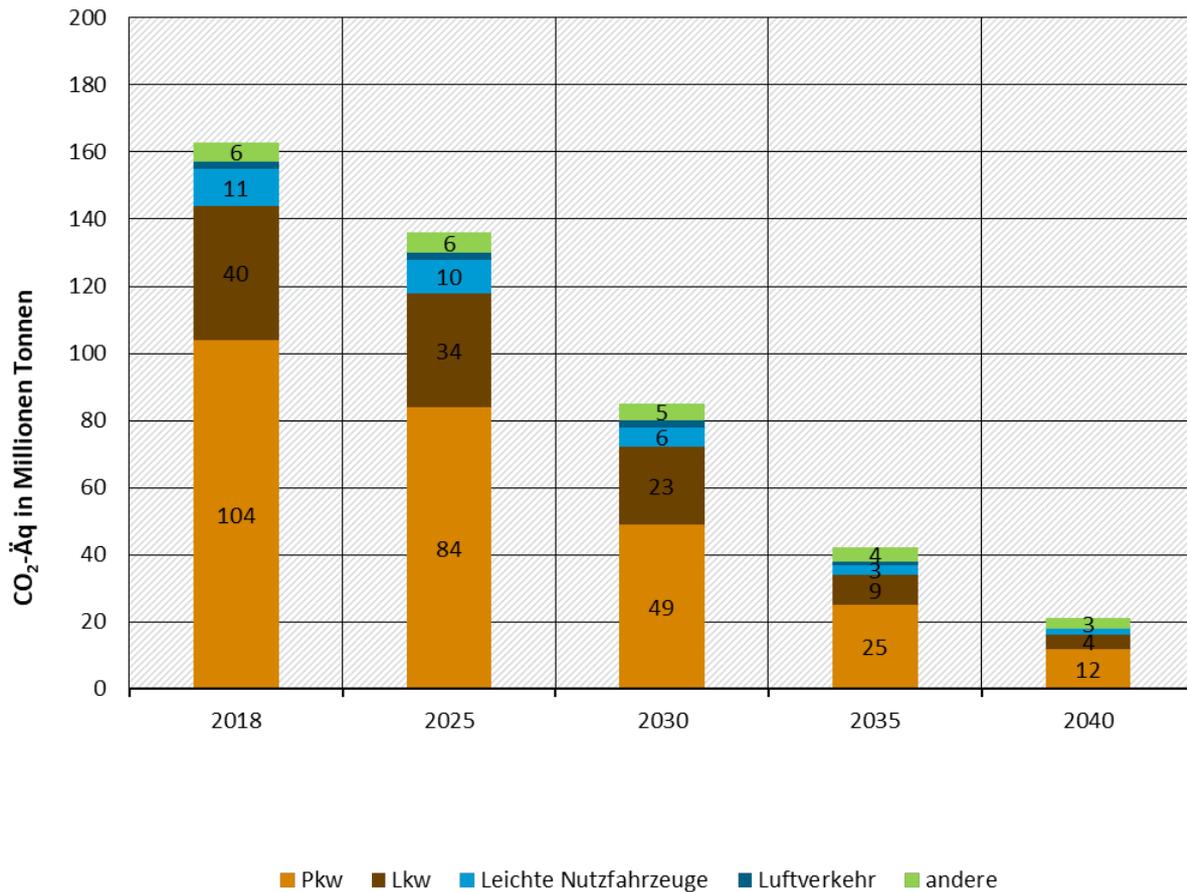
Die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor gehen im KIS-2030 bis zum Jahr 2030 auf 84,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq zurück (Abbildung 82 und Tabelle 104). Das Klimaschutzziel in Höhe von 85 Mio. t im Jahr 2030 wird damit knapp erreicht. In den Jahren davor werden die im Klimaschutzgesetz definierten Ziele für den Verkehr jedoch durchgängig verfehlt. Ausnahme war die durch die Corona-Pandemie bedingte kurzzeitige Zielerfüllung im Jahr 2020. Die wieder zunehmende Verkehrsaktivität führt jedoch seitdem wieder zur Zielverfehlung. Die erhebliche Lücke verringert sich – ausgehend von voraussichtlich rund 20 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2022 – im Zeitverlauf kontinuierlich und führt im Jahr 2030 zur Zielerfüllung.

Die größten Minderungsbeiträge können im Straßenverkehr erzielt werden. Neben dem Rückgang der Verkehrsleistung ist vor allem die starke Elektrifizierung des Bestands an Pkw und Lkw der Haupttreiber dieser Entwicklung. So kann bei Pkw gegenüber 2018 ein Rückgang der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um 55 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und bei Lkw um 17 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq erreicht werden. Dies entspricht einer relativen Minderung um mehr als 52 % bzw. um mehr als 42 %.

Die Minderungsbeiträge der weiteren Verkehrsträger (Schiene, Binnenschiff, inländischer Luftverkehr) sind mit Blick auf die absoluten Mengen, aber auch hinsichtlich der relativen Minderung, in diesem Kontext von geringerer Bedeutung. Ursachen hierfür sind ein grundsätzlich geringeres Ausgangsniveau der Emissionen, der erhebliche Anstieg der Verkehrsleistung (Schiene, Binnenschiff), ein aktuell bereits hoher Elektrifizierungsgrad (Schiene) bzw. bis zum Jahr 2030 fehlende Optionen zur Elektrifizierung (Binnenschiff, Luftverkehr).

<sup>78</sup> Power-to-Liquid (PtL) beschreibt ein Verfahren, bei dem elektrischer Strom in Flüssigkraftstoffe wie beispielsweise Diesel und Kerosin umgewandelt wird.

**Abbildung 82: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Verkehrsträgergruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030**



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

**Tabelle 104: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030**

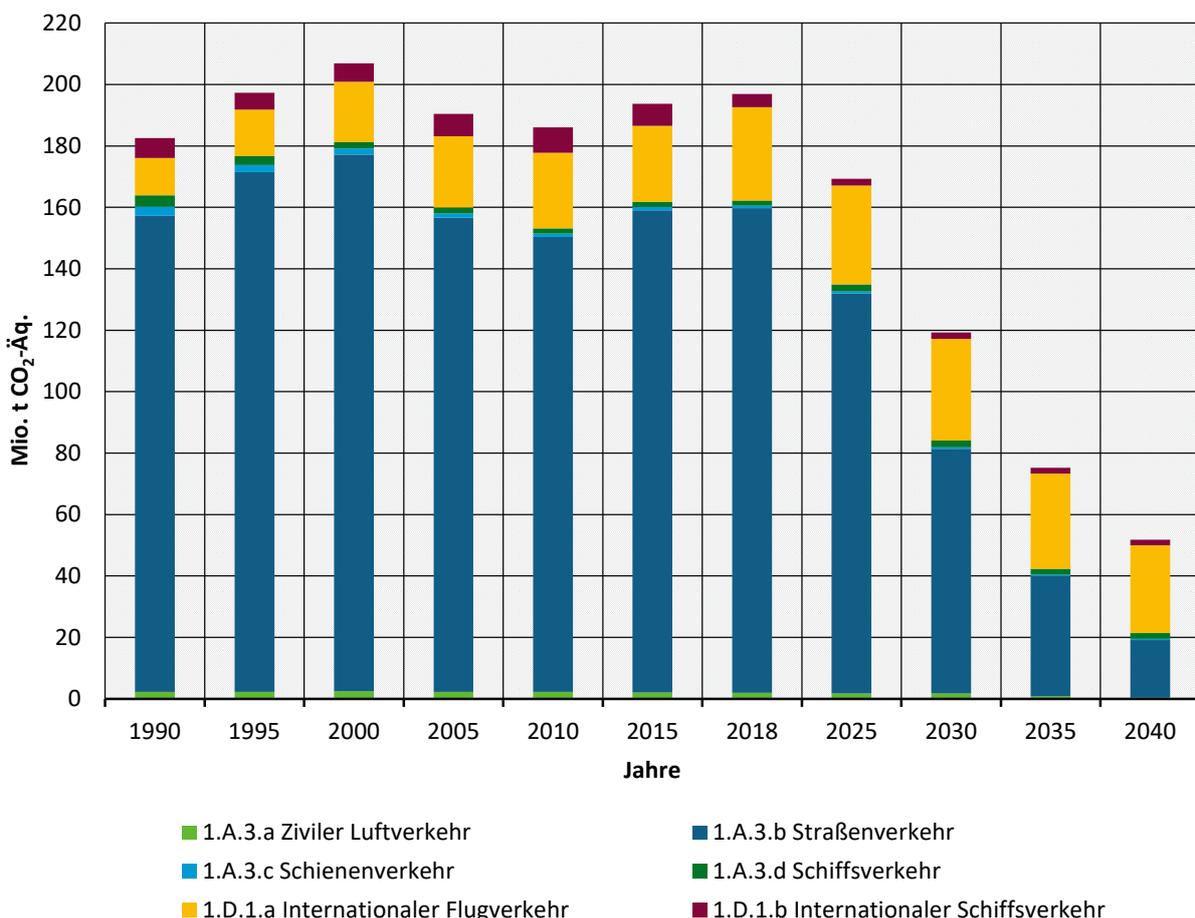
Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Inländischer ziviler Luftverkehr	2,0	1,2	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	0,9	0,3
Straßenverkehr	157,7	148,7	155,0	147,6	139,9	130,1	121,9	112,0	103,0	92,5	79,7	39,1	18,8
Schienenverkehr	0,8	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4
Binnenschifffahrt	1,7	1,6	1,7	2,0	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	1,9	1,8
<b>Gesamt</b>	<b>162,3</b>	<b>152,2</b>	<b>159,2</b>	<b>152,1</b>	<b>144,4</b>	<b>134,9</b>	<b>126,6</b>	<b>116,7</b>	<b>107,6</b>	<b>97,1</b>	<b>84,1</b>	<b>42,3</b>	<b>21,4</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		145	139	134	128	123	117	112	105	96	85		
Abweichung vom Sektorziel		7,2	20,2	18,1	16,4	11,9	9,6	4,7	2,6	1,1	-0,9		
Nachrichtlich:													

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Internationaler ziviler Luftverkehr <sup>79</sup>	30,4	23,1	31,4	31,7	32,1	32,2	32,3	32,7	32,8	33,2	33,1	30,9	28,7
Internationaler Schiffsverkehr	4,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,0	1,8
<b>Gesamt</b>	<b>197,0</b>	<b>177,6</b>	<b>192,9</b>	<b>186,0</b>	<b>178,7</b>	<b>169,3</b>	<b>161,2</b>	<b>151,6</b>	<b>142,6</b>	<b>132,4</b>	<b>119,3</b>	<b>75,3</b>	<b>51,8</b>

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

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

**Abbildung 83: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**



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

#### 9.4.1.5 Bewertung der Einzelinstrumente

Die Einzelmaßnahmen werden jeweils gegenüber der Ausgestaltung der Instrumente im MMS bewertet. Die folgende Tabelle stellt die Instrumente, ihre Ausgestaltung im KIS-2030 sowie die Annahmen zur Ausgestaltung im MMS dar. Die Treibhausgasemissionsminderung durch Verlagerung von Verkehren auf den Umweltverbund wird jeweils den ökonomischen Lenkungsinstrumenten zugeordnet. Die flankierenden Maßnahmen zur Steigerung der Qualität und der Verfügbarkeit des Umweltverbunds sowie zur Kapazitätssteigerung von deren Verkehrsinfrastrukt-

<sup>79</sup> Alle abgehenden grenzüberschreitenden Flüge, sowohl in EU- als auch in Nicht-EU-Länder.

ren sind jedoch die Voraussetzung, dass sich die Verlagerungswirkungen realisieren lassen. Diesen Maßnahmen kommt daher eine sehr bedeutsame Rolle zu, auch wenn keine Treibhausgasemissionsminderung für diese Instrumente angegeben wird.

**Tabelle 105: Parametrisierung der Einzelmaßnahmen im Verkehr im KIS-2030**

Instrument	Ausgestaltung im KIS-2030	Ausgestaltung im MMS	Parametrisierung / Wirkung
CO <sub>2</sub> -Bepreisung für die Sektoren Wärme und Verkehr (BEHG)	Erhöhter CO <sub>2</sub> -Preisfad ab 2023 (240 €/t im Jahr 2030)	CO <sub>2</sub> -Preis ab 2021. Exogener CO <sub>2</sub> -Preisfad (125 €/t im Jahr 2030)	Wirkt auf Fahrzeugwahl und Verkehrsnachfrage
Absenkung der EEG-Umlage ab 2021	Abschaffung der EEG-Umlage	EEG-Umlage wird ab 2021 reduziert (Größenordnung 2-3 ct)	Wirkt auf Fahrzeugwahl und Verkehrsnachfrage
Stärkere CO <sub>2</sub> -Spreizung der Kfz-Steuer im 1. Jahr (Malus)	Erhöhung der Kfz-Steuer im 1. Jahr für neu zugelassene Pkw ab 2023. Erhöht sich bis 2025, so dass dann das 60-fache der derzeitigen jährlichen Steuer (z. B. 120 €/g CO <sub>2</sub> ab 95 g) erreicht wird	Gemäß Kraftfahrzeugsteuergesetz (stärkere Progression nach CO <sub>2</sub> , Begünstigung PHEV und BEV)	Berücksichtigung in der TCO der Pkw-Käufer
Kaufprämien für elektrische Fahrzeuge	Kaufprämien für rein batterieelektrische Pkw und E-Lkw werden bis zum Jahr 2025 fortgeführt (in Höhe der Innovationsprämie), während Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge ab 2022 nicht mehr mit einer Kaufprämie gefördert werden.	Umsetzung gemäß Förderrichtlinie (Bundesanteil Kaufprämie bis zu 6.000 €); keine Haushaltsmittel ab dem Jahr 2022 verfügbar.	Berücksichtigung in der TCO der Pkw-Käufer
EU-Mindestenergiesteuersatz für inländische Flüge	Für inländische Flüge wird ab 2023 der Mindestenergiesteuersatz von 33 Cent pro Liter erhoben.	-	Nachfragereduktion und Verlagerung auf andere Verkehrsmittel
Abschaffung des Dieselsteuerprivilegs	Die Energiesteuer für Diesel, Erdgas und LNG wird im Zeitraum 2023-2027 an das Niveau der Energiesteuer von Benzin (bemessen am Energiegehalt) angeglichen. Gleichzeitig wird die Hubraumkomponente der Kfz-Steuer für Dieselfahrzeuge sukzessive reduziert. Ferner wird ein Inflationsausgleich bei	-	Wirkt auf Fahrzeugwahl und Verkehrsnachfrage

Instrument	Ausgestaltung im KIS-2030	Ausgestaltung im MMS	Parametrisierung / Wirkung
Umgestaltung der Besteuerung von Dienstwagen	<p>der Energiesteuer ab 2023 eingeführt.</p> <p>Die Besteuerung des geldwerten Vorteils richtet sich ab dem 1.1.2023 auch nach dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Dienstwagens: Bei Fahrzeugen mit bis zu 95 g CO<sub>2</sub> / km wird 1,5 % des Listenpreises angesetzt, der Steuersatz steigt um 0,01 % pro zusätzlichem g CO<sub>2</sub> / km. Die Begünstigung von Plug-In-Hybriden (0,5 %-Regel) wird abgeschafft; sie entrichten ab 2023 ebenfalls 1,5 %. Rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) zahlen bis 2022 0,25 %, ab 2023 0,5 % und ab 2025 1 %.</p>	<p>Privat genutzte E-Dienstwagen werden bis 2030 statt mit 1 % des Listenpreises mit der Hälfte des Listenpreises (PHEV) oder eines Viertels des Listenpreises (BEV, FCEV wenn Listenpreis &lt;= 60.000 €) versteuert.</p>	<p>Berücksichtigung bei der Kaufentscheidung von Dienstwagen</p>
Ausweitung der Lkw-Maut	<p>Die Lkw-Maut wird im Jahr 2025 auf alle Fahrzeuge und alle Straßen ausgeweitet, mit zunehmender Internalisierung externer Kosten bis 2035 (bei manchen 2040). Die CO<sub>2</sub>-Komponente tritt bereits ab 2023 in Höhe von 200 €/t in Kraft und bleibt konstant, so lange sie höher liegt als der CO<sub>2</sub>-Preis im BEHG. Mautpflichtige Fahrzeuge bekommen den CO<sub>2</sub>-Preis des BEHG rückerstattet.</p>	-	<p>Berücksichtigung in der TCO der Lkw-Käufer sowie in den Lkw-Nutzerkosten</p>
Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut	<p>Eine fahrleistungsabhängige Pkw-Maut wird ab 2029 für das gesamte Straßennetz eingeführt. Nach dem „Phase-In“ von 1,1 ct (2016)/km im Jahr 2029 wird der Satz auf 4,3 ct (2016)/km ab dem Jahr 2032 erhöht. Bis 2035 werden externe Kosten für Luftschad-</p>	-	<p>Wirkt auf Fahrzeugwahl und Verkehrsnachfrage</p>

Instrument	Ausgestaltung im KIS-2030	Ausgestaltung im MMS	Parametrisierung / Wirkung
	stoffe, Lärm, sowie Natur (ab 2040) und Landschaft vollständig internalisiert.		
Angebotsausweitung des ÖPNV	Es wird von einer durchschnittlichen Angebotssteigerung über alle Verkehrsmittel des ÖPNV von 42 % ausgegangen. Dies erfolgt flankierend zum CO <sub>2</sub> -Preis.	-	Ermöglicht Verlagerung
Förderung des Radverkehrs	Es wird ein Mittelhochlauf für den Radverkehr auf 30 € pro Person bis zum Jahr 2025 hinterlegt. Gegenüber den bisher beschlossenen Mitteln entspricht das einer Erhöhung um rd. 1,5 Mrd. €.	Zusätzlich 900 Mio. € Bundesmittel insgesamt bis 2023 für den Radverkehr	Ermöglicht Verlagerung
Förderung des Fußverkehrs	Angestrebt wird eine Steigerung des Fußverkehrsanteils von 27 % auf 41 % in Kernstädten, von 24 % auf 35 % in Landkreisen bis zum Jahr 2030 gegenüber 2015.	-	Ermöglicht Verlagerung
Beschleunigter Ausbau des Schienenverkehrs (Personen- und Güterverkehr)	Die Schienengüterverkehrsleistung steigt bis 2030 auf rund 190 Mrd. tkm und die Schienenpersonenverkehrsleistung auf 157 Mrd. pkm.	Bis zum Jahr 2034 können ca. 182 Mrd. tkm auf der Schiene transportiert werden und bis zum Jahr 2040 ca. 200 Mrd. tkm	Ermöglicht Verlagerung
Nationale Umsetzung der RED II / THG-Quote	Die THG-Quote wird erfüllt (2030: 25 %), welche ein höheres Ambitionsniveau als die RED II aufweist.	Die THG-Quote (Kabinettvorschlag) wird erfüllt (2030: 22 %), welche ein höheres Ambitionsniveau als die RED II aufweist.	Durch die Möglichkeit, Treibhausgasemissionsminderungen aus der Stromnutzung im Straßenverkehr anrechnen zu lassen, erhöht sich die Treibhausgasemissionsminderung jedoch nicht im Vergleich MMS.
PtL im Flugverkehr nach 2030 beschleunigt einführen	Der Anteil an strombasiertem Kerosin steigt bis 2045 national auf 100 % und international auf 25 %.	-	

Instrument	Ausgestaltung im KIS-2030	Ausgestaltung im MMS	Parametrisierung / Wirkung
Effizienzregulierung für elektrische Pkw	Es wird eine Regulierung zur Effizienzsteigerung von elektrischen Pkw eingeführt, beispielsweise nach dem „Top-Runner-Prinzip“. Die Effizienz von neu zugelassenen elektrischen Pkw nimmt dadurch ab 2023 stärker (insgesamt um jährlich 0,5 %-Punkte) zu.	-	Wirkt auf Fahrzeugwahl und Verkehrsnachfrage
Rechtliche Rahmenbedingungen	Bundesmobilitätsgesetz bzw. ambitionierte Reform der Straßenverkehrsordnung		Flankierend

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Öko-Institut

In Tabelle 93 sind die Emissionsminderungswirkungen der Einzelinstrumente bzw. der zu Instrumentenbündeln zusammengefassten Instrumente gegenüber dem MMS dargestellt.

Die Instrumente zur Treibhausgasminderung stehen in Interaktion und verstärken bzw. reduzieren gegenseitig die Minderungswirkung. Bei der Wirkungsbewertung kann u.a. zwischen ökonomischen Instrumenten, die unmittelbar auf Betriebs- und Energiekosten wirken als auch Instrumenten, die auf den Fahrzeugkauf wirken, unterschieden werden. Teilweise können ökonomische Instrumente sowohl den Fahrzeugbetrieb als auch die Kaufentscheidung beeinflussen. Flankierende Instrumente zur Verkehrsverlagerung und Infrastrukturausbau bilden die Grundlage für die erzielbare Treibhausgasminderungswirkung.

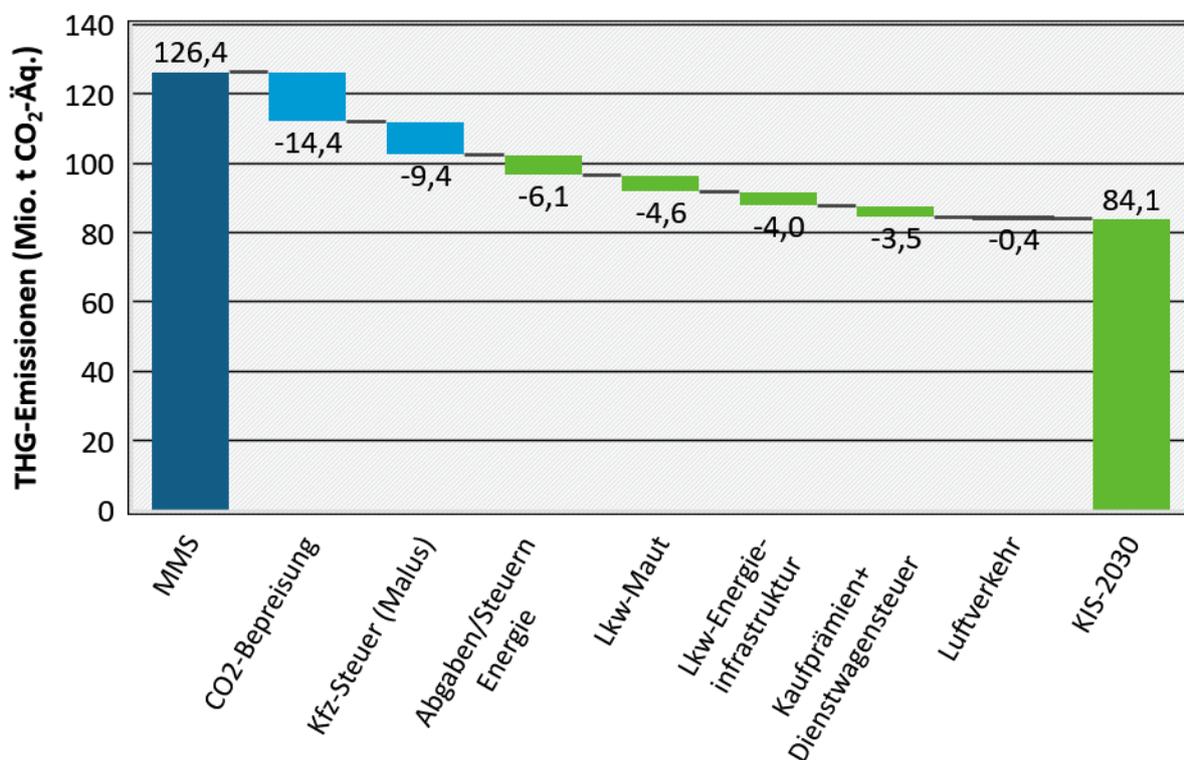
Aufgrund der Wechselwirkungen der einzelnen Instrumente wird für die Einzelinstrumentenbewertung zunächst die Minderungswirkung von Instrumentenbündeln mit einem ähnlichen Wirkmechanismus bestimmt. Diese Minderungswerte bilden die Grundlage für die Ableitung der Treibhausgasemissionsminderung einzelner Instrumente.

Mit Blick auf die im KIS-2030 betrachteten Einzelinstrumente bzw. Instrumentenbündel zeigt der ambitioniertere CO<sub>2</sub>-Preisfad als Einzelinstrument mit einer Treibhausgasminderung im Jahr 2030 um 14,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq gegenüber dem MMS die größte Einzelwirkung. Diese ergibt sich aus einer Verminderung der Pkw-Fahrleistung durch höhere Kilometerkosten sowie eine schnellere Elektrifizierung des Fahrzeugbestands angesichts einer verbesserten Gesamtkostenbilanz gegenüber konventionellen Pkw. Mit einer Minderungswirkung von 9,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq für das Jahr 2030 zeigt auch die stärkere CO<sub>2</sub>-Spreizung bei der Kfz-Steuer (CO<sub>2</sub>-Emissionsmalus beim Fahrzeugkauf) eine starke Minderungswirkung, die aus einer schnelleren Elektrifizierung der Pkw-Neuzulassungen resultiert. Es folgen mit einer Minderungswirkung von 6,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq die Abschaffung des Dieselsteuerprivilegs inklusive der Einführung eines Inflationsausgleich in der Energiebesteuerung und die Reduktion der EEG-Umlage. Zusammen verschlechtern diese Anpassungen die Attraktivität von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen (v.a. Dieselfahrzeugen) in der Beschaffung und im Betrieb gegenüber Elektrofahrzeugen und beschleunigen somit den Umstieg auf elektrische Pkw und LNF und reduzieren sogleich die Fahrleistung von Dieselfahrzeugen. Im kleineren Maßstab unterstützt auch die Energiebesteuerung von Kerosin die

Zielerfüllung im Klimaschutzgesetz (nationales Emissionsinventar) im Jahr 2030. Weitere relevante Minderungsbeiträge im Jahr 2030 können bei Lkw mit 4,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq durch die Ausweitung und CO<sub>2</sub>-Spreizung der Lkw-Maut erzielt werden. Diese Minderungsleistung erhöht sich um weitere 4,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, wenn ein ambitionierter Ausbau der Energieversorgungsinfrastruktur für alternativ betriebene Lkw erreicht wird. Die Ausweitung der Maut und die Berücksichtigung einer CO<sub>2</sub>-Komponente hat einerseits zur Folge, dass Lkw mit alternativen Antrieben angesichts einer verbesserten Wirtschaftlichkeit einen schnelleren Markthochlauf erreichen und sich andererseits die Kilometerkosten konventioneller Lkw erhöhen. Durch den beschleunigten Ausbau der Energieversorgungsinfrastruktur kann der Markthochlauf von alternativ betriebenen Lkw weiter beschleunigt werden, da technische Engpässe bei der Energieversorgung verringert und damit weitere wirtschaftliche Einsatzprofile von Lkw erschlossen werden können.

Die Reform der Dienstwagenbesteuerung, die eine weniger vorteilhafte Pauschalversteuerung vorsieht, sowie die Fortführung der Kaufprämie bis zum Jahr 2025 für batterieelektrische Fahrzeuge liefern einen Minderungsbeitrag von insgesamt 3,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030. Dieser ergibt sich aufgrund eines beschleunigten Markthochlaufs von batterieelektrischen Fahrzeugen – insbesondere im Vergleich zu Plug-in-Hybridfahrzeugen sowie durch einen Rückgang an Dienstwagen angesichts des geringeren steuerlichen Anreizes in der Dienstwagenbesteuerung.

**Abbildung 84: Treibhausgasemissionsminderungswirkung der einzelnen Instrumente(nbündel) im KIS-2030 im Jahr 2030**



Quelle: eigene Berechnungen, Öko-Institut

#### 9.4.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Im Falle der BEHG-Sensitivität des KIS-2030, in dem der CO<sub>2</sub>-Preisfad des MMS hinterlegt wird und somit ab dem Jahr 2022 einen deutlich geringeren Anstieg des CO<sub>2</sub>-Preisfad gegenüber dem KIS-2030 betrachtet wird, verlangsamt sich die Treibhausgasemissionen gegenüber dem KIS-2030. Bis zum Jahr 2030 gehen die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen lediglich auf

90,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq zurück und das Sektorziel wird um mehr als 5 Mio. t verfehlt (Tabelle 106). Der Anstieg der Treibhausgasemissionen in dieser Sensitivität gegenüber dem KIS-2030 ist dabei geringer als die zuvor gezeigte Emissionsminderung des Einzelinstruments CO<sub>2</sub>-Bepreisung mit den weiteren Maßnahmen des KIS-2030 (Abbildung 84), welche durch den höheren CO<sub>2</sub>-Preis im KIS-2030 erreicht werden. Dieser Effekt ist auf die Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten zurückzuführen, sodass für das KIS-2030 eine stärkere Minderungswirkung angegeben ist.

Auch in den Jahren vor 2030 werden die Ziele klar verfehlt. Im Jahr 2025 beträgt die Diskrepanz knapp 15 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Der verlangsamte Rückgang der Treibhausgasemissionen geht ausschließlich auf die geringere Emissionsminderung im Straßenverkehr zurück. So wird bei Pkw und Lkw gegenüber 2018 ein Rückgang der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 von insgesamt 71,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq erreicht. Dies entspricht einer relativen Minderung um 44 %.

**Tabelle 106: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Inländischer ziviler Luftverkehr	2,0	1,2	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	0,9	0,3
Straßenverkehr	157,7	148,7	155,0	149,2	142,2	132,8	125,1	117,3	108,6	98,6	86,1	45,4	23,0
Schienenverkehr	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Binnenschifffahrt	1,7	1,6	1,7	2,0	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	1,9	1,8
<b>Gesamt</b>	<b>162,3</b>	<b>152,2</b>	<b>159,2</b>	<b>153,7</b>	<b>146,6</b>	<b>137,6</b>	<b>129,8</b>	<b>121,9</b>	<b>113,1</b>	<b>103,1</b>	<b>90,4</b>	<b>48,7</b>	<b>25,6</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		145	139	134	128	123	117	112	105	96	85		
Abweichung vom Sektorziel		7,2	20,2	19,7	18,6	14,6	12,8	9,9	8,1	7,1	5,4		
Nachrichtlich:													
Internationaler ziviler Luftverkehr <sup>80</sup>	30,4	23,1	31,4	31,7	32,1	32,2	32,3	32,7	32,8	33,2	33,1	31,0	28,7
Internationaler Schiffsverkehr	4,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,0	1,8
<b>Gesamt</b>	<b>197,0</b>	<b>177,6</b>	<b>192,9</b>	<b>187,7</b>	<b>181,0</b>	<b>172,0</b>	<b>164,4</b>	<b>156,8</b>	<b>148,1</b>	<b>138,4</b>	<b>125,6</b>	<b>81,7</b>	<b>56,1</b>

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

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

### 9.4.3 MMS

Die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor gehen im MMS bis zum Jahr 2030 auf 126,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq zurück. Das Klimaschutzziel in Höhe von 85 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 wird um 41,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq verfehlt. In den Jahren 2025-2029 liegt die Abweichung vom Sektorziel gemäß Klimaschutzgesetz bei durchschnittlich rund 32 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

<sup>80</sup> Alle abgehenden grenzüberschreitenden Flüge, sowohl in EU- als auch in Nicht-EU-Länder.

Zwischen 2018 und 2025 vollzieht sich der Rückgang der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor mit durchschnittlich rund 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq jährlich noch relativ langsam, was auf die steigende Verkehrsnachfrage bei erst allmählich zunehmender Elektrifizierung zurückzuführen ist. Nach 2025 gehen die Treibhausgasemissionen mit durchschnittlich rund 5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq jährlich deutlich zügiger zurück, bis auf 78,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2040. Im Verkehrssektor dominieren dabei die CO<sub>2</sub>-Emissionen; die sonstigen Treibhausgase spielen mit gut 1 % eine untergeordnete Rolle.

**Tabelle 107: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Inländischer ziviler Luftverkehr	2,0	1,2	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6
Straßenverkehr	157,7	148,7	154,3	152,5	150,0	147,0	142,8	138,9	133,7	129,7	122,2	96,0	74,8
Schienenverkehr	0,8	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
Binnenschifffahrt	1,7	1,7	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9
<b>Gesamt</b>	<b>162,3</b>	<b>152,2</b>	<b>158,8</b>	<b>157,0</b>	<b>154,4</b>	<b>151,4</b>	<b>147,2</b>	<b>143,2</b>	<b>138,0</b>	<b>134,0</b>	<b>126,4</b>	<b>100,1</b>	<b>78,7</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		145	139	134	128	123	117	112	105	96	85		
Abweichung vom Sektorziel		7,2	19,8	23,0	26,4	28,4	30,2	31,2	33,0	38,0	41,4		
Nachrichtlich:													
Internationaler ziviler Luftverkehr <sup>81</sup>	30,4	14,3	23,1	31,3	31,7	32,2	32,6	32,8	33,1	33,2	33,4	34,6	35,6
Internationaler Schiffsverkehr	4,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5
<b>Gesamt</b>	<b>197,0</b>	<b>167,2</b>	<b>177,7</b>	<b>192,5</b>	<b>191,2</b>	<b>189,1</b>	<b>186,5</b>	<b>182,5</b>	<b>178,9</b>	<b>173,8</b>	<b>162,4</b>	<b>137,2</b>	<b>116,8</b>

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut, et al. 2021, Abschnitt 8.4.5)

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

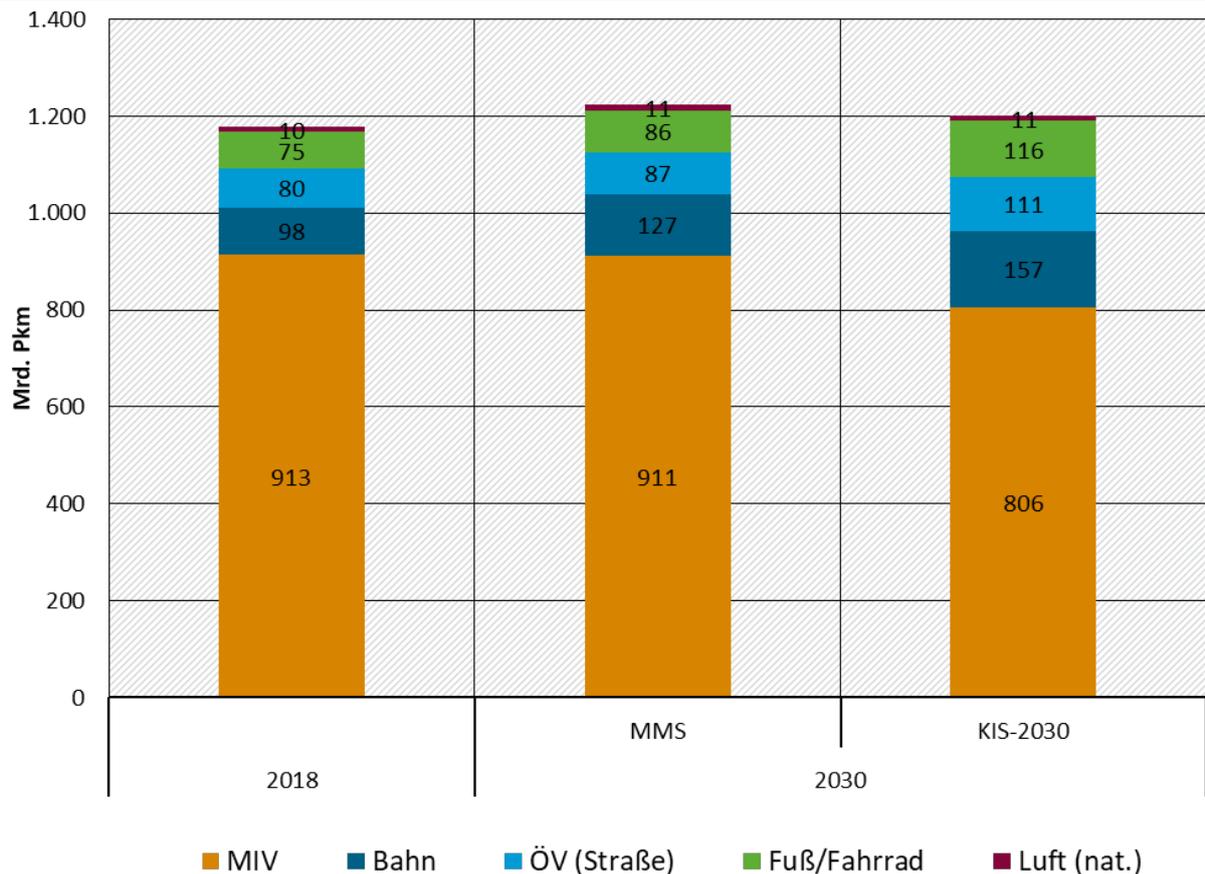
## 9.4.4 Vergleich der Szenarien

### 9.4.4.1 Vergleich Verkehrsnachfrage

#### Personenverkehr

Die Förderung des Umweltverbundes führt in Kombination mit einem höheren CO<sub>2</sub>-Preis im KIS-2030 zu einer stärkeren Verlagerung der Nachfrage im Personenverkehr auf öffentliche und nicht-motorisierte Verkehrsmittel als im MMS. Der Pkw-Verkehr geht im KIS-2030 im Jahr 2030 auf 806 Mrd. Pkm zurück. Dagegen bleibt der Pkw-Verkehr im MMS mit 911 Mrd. Pkm in etwa auf dem Niveau von 2018 (Abbildung 85).

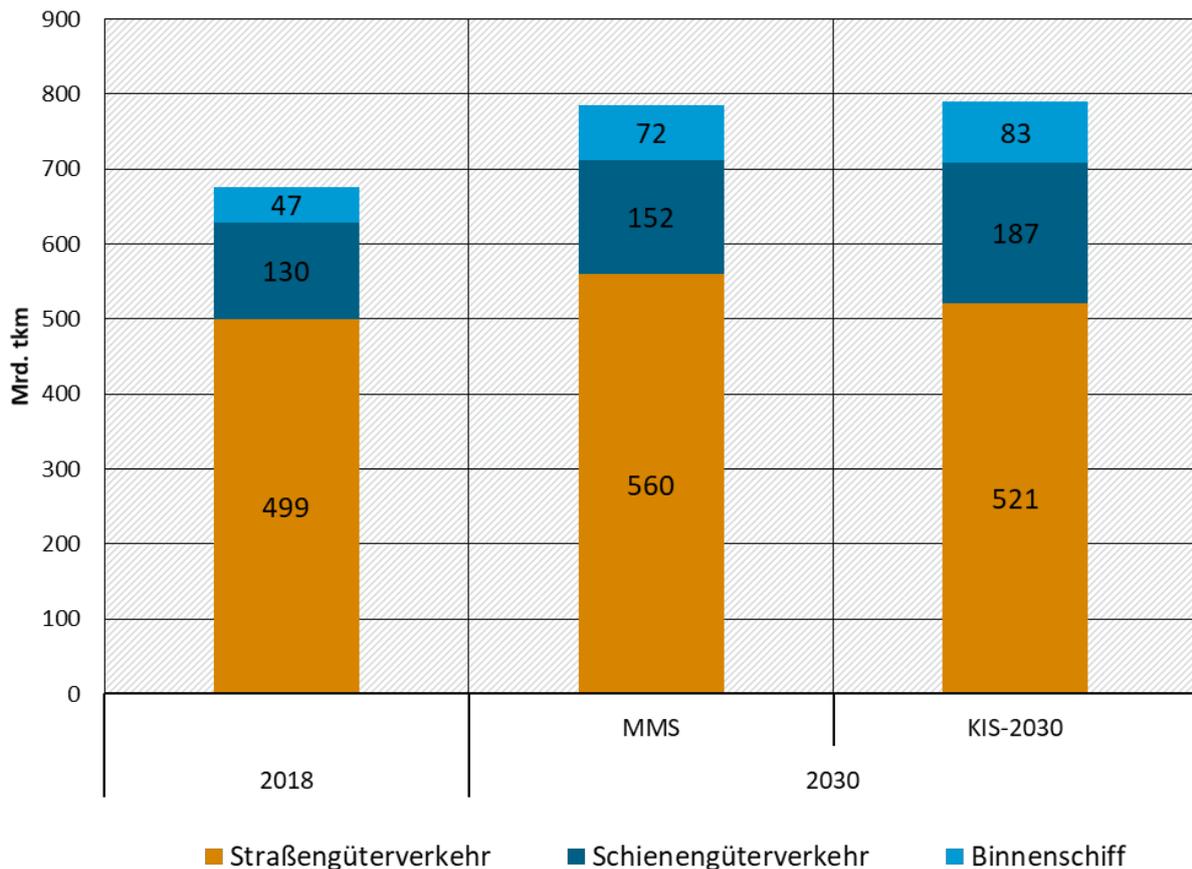
<sup>81</sup> Alle abgehenden grenzüberschreitenden Flüge, sowohl in EU- als auch in Nicht-EU-Länder.

**Abbildung 85: Vergleich der Personenverkehrsnachfrage zwischen KIS-2030 und MMS**

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

### Güterverkehr

Die Güterverkehrsnachfrage nimmt im KIS-2030 und MMS im Zeitraum von 2018 bis 2030 um 16 % bzw. 17 % zu. Im KIS-2030 wird eine stärkere Verlagerung auf den Schienenverkehr und die Binnenschifffahrt erzielt. Aufgrund des insgesamt steigenden Transportaufkommens nimmt der Straßengüterverkehr im MMS zwischen den Jahren 2018 und 2030 um 12 % und im KIS-2030 um 4 % zu (Abbildung 86). Der nationale Luftverkehr trägt dabei nicht maßgeblich zum Güterverkehr bei und ist daher hier nicht aufgeführt.

**Abbildung 86: Vergleich der Güterverkehrsnachfrage zwischen KIS-2030 und MMS**

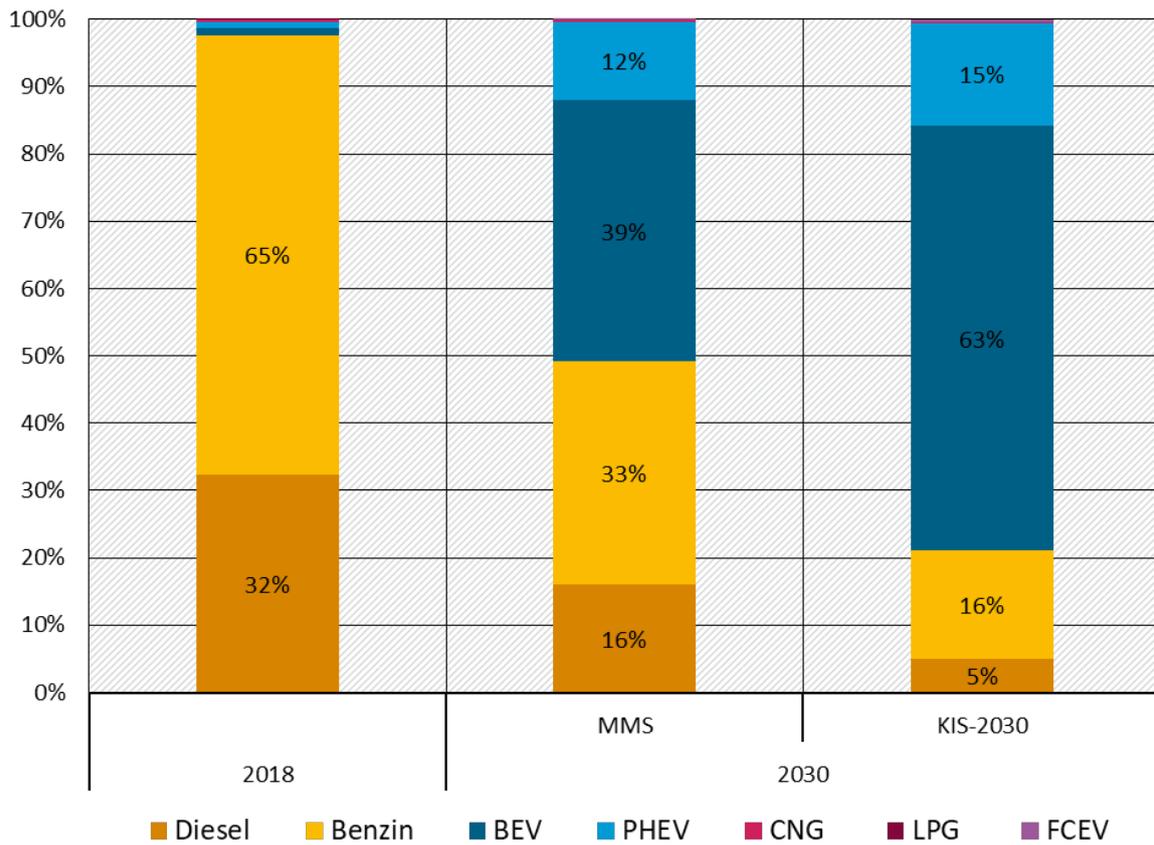
Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

#### 9.4.4.2 Vergleich Antriebstechnologien

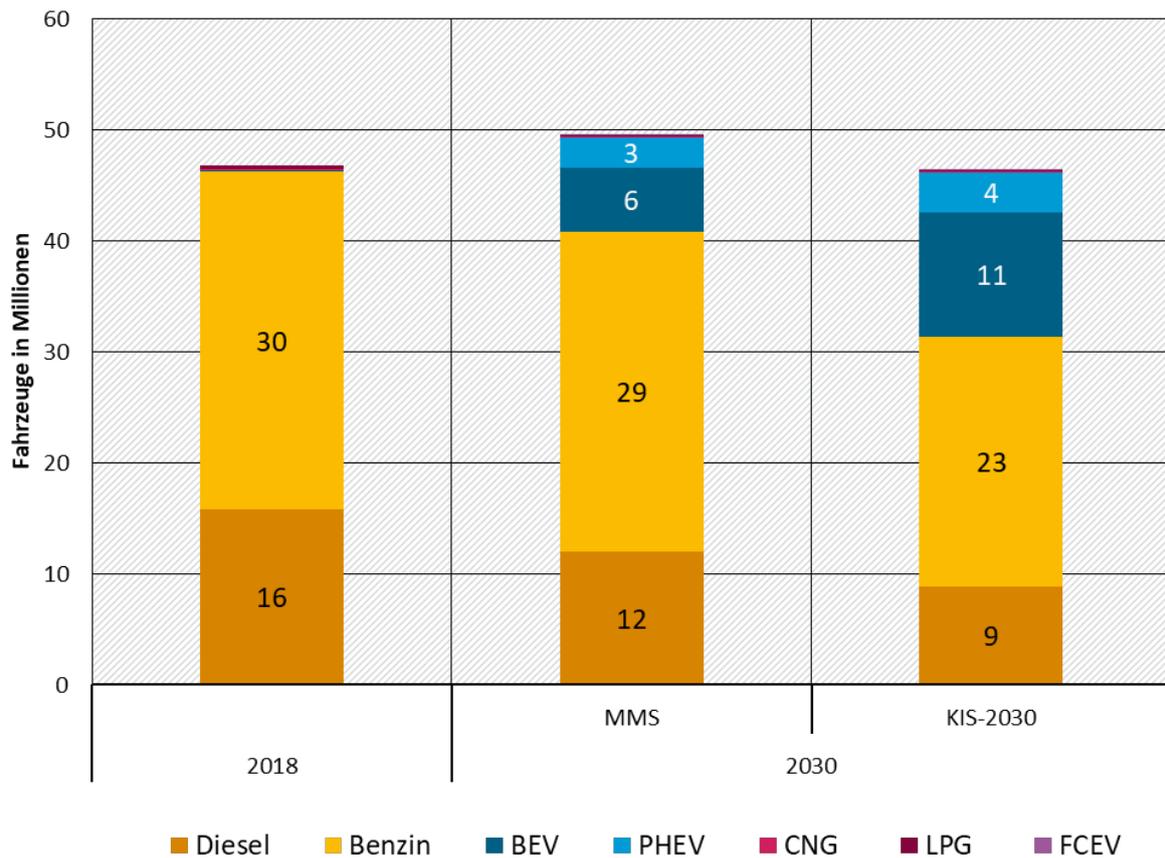
##### Pkw

Bei der Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen (Abbildung 87) wird im KIS-2030 durch die Wirkung der verschiedenen ökonomischen Anreizinstrumente ein erheblich höherer Anteil an batterieelektrischen Fahrzeugen erzielt als im MMS (63 % gegenüber 39 %). Durch die Verlagerung auf den Umweltverbund ist der Bestand an Pkw im KIS-2030 um 3,2 Mio. Fahrzeuge geringer als im MMS und entspricht in etwa dem Pkw-Bestand von 2018 (Abbildung 88).

**Abbildung 87: Vergleich der Pkw-Neuzulassungen zwischen KIS-2030 und MMS**



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

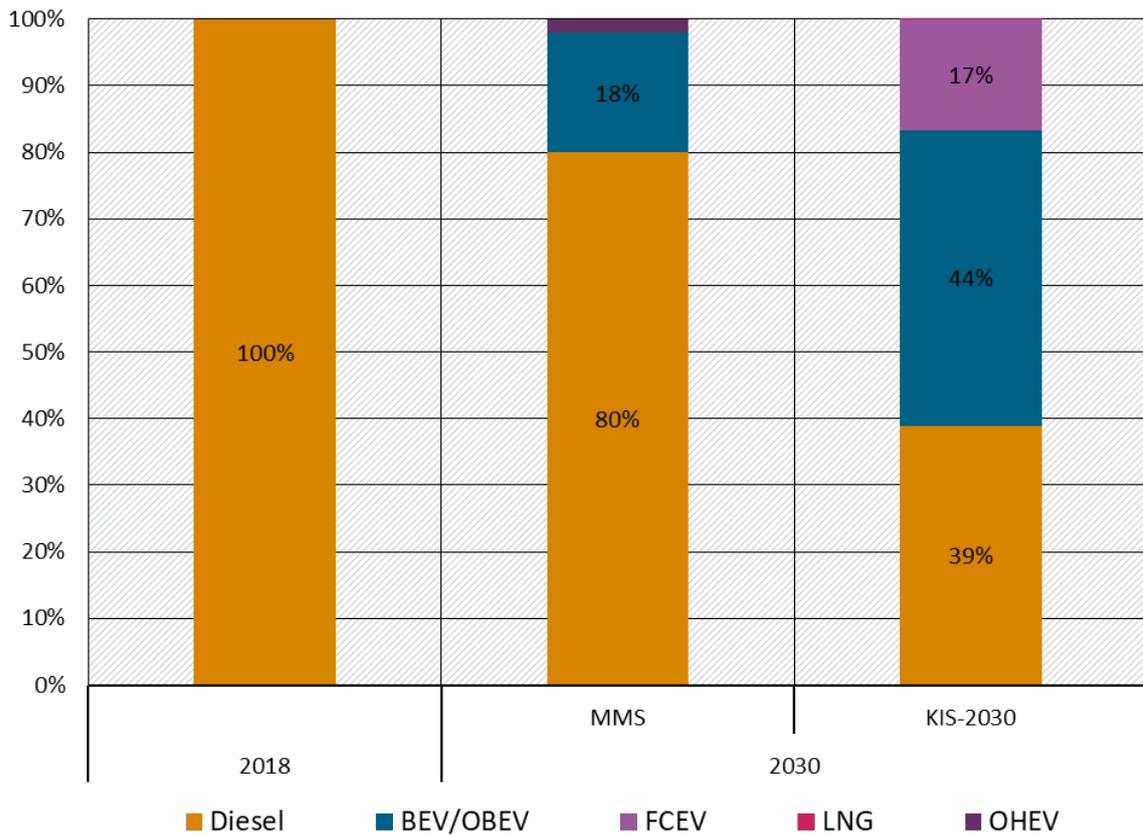
**Abbildung 88: Vergleich der Pkw-Bestände zwischen KIS-2030 und MMS**

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

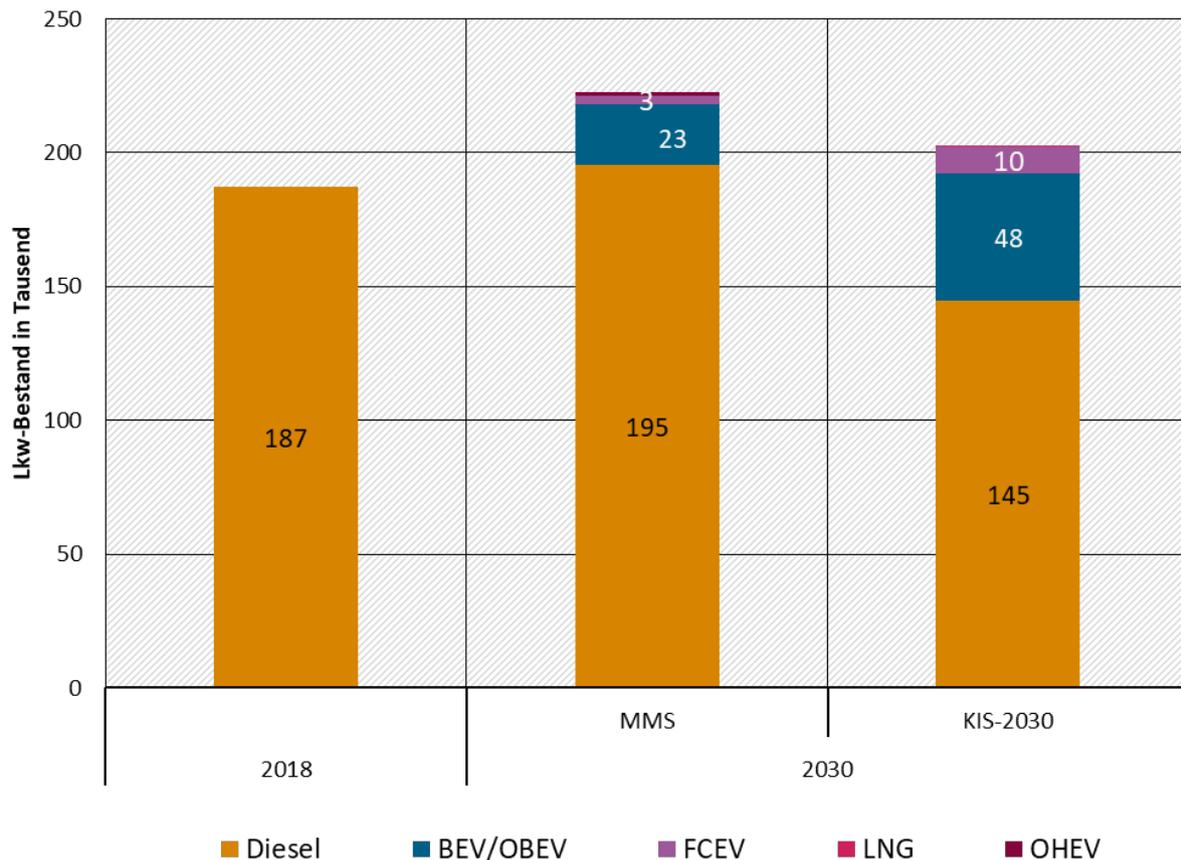
### Lkw

Bei der Entwicklung der Neuzulassungen von Last- und Sattelzügen führen die Instrumente im KIS-2030 zu einem Anteil von 61 % elektrischer Fahrzeuge im Jahr 2030 (Abbildung 89). Zum einen fahren diese mit Wasserstoff (FCEV) und zum anderen mit direkter Stromnutzung aus der Batterie oder Oberleitung (BEV/OBEV). Im MMS liegt der Neuzulassungsanteil von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben im Jahr 2030 bei knapp 18 %. Der Lkw-Bestand liegt im KIS-2030 als Folge der stärkeren Verlagerung auf den Schienen- und Schiffsverkehr ca. 20.000 Fahrzeuge unter dem Bestand im MMS und rund 16.000 Fahrzeuge über dem Bestand von 2018 (Abbildung 90).

**Abbildung 89: Vergleich der Neuzulassungen Last- und Sattelzüge zwischen KIS-2030 und MMS**



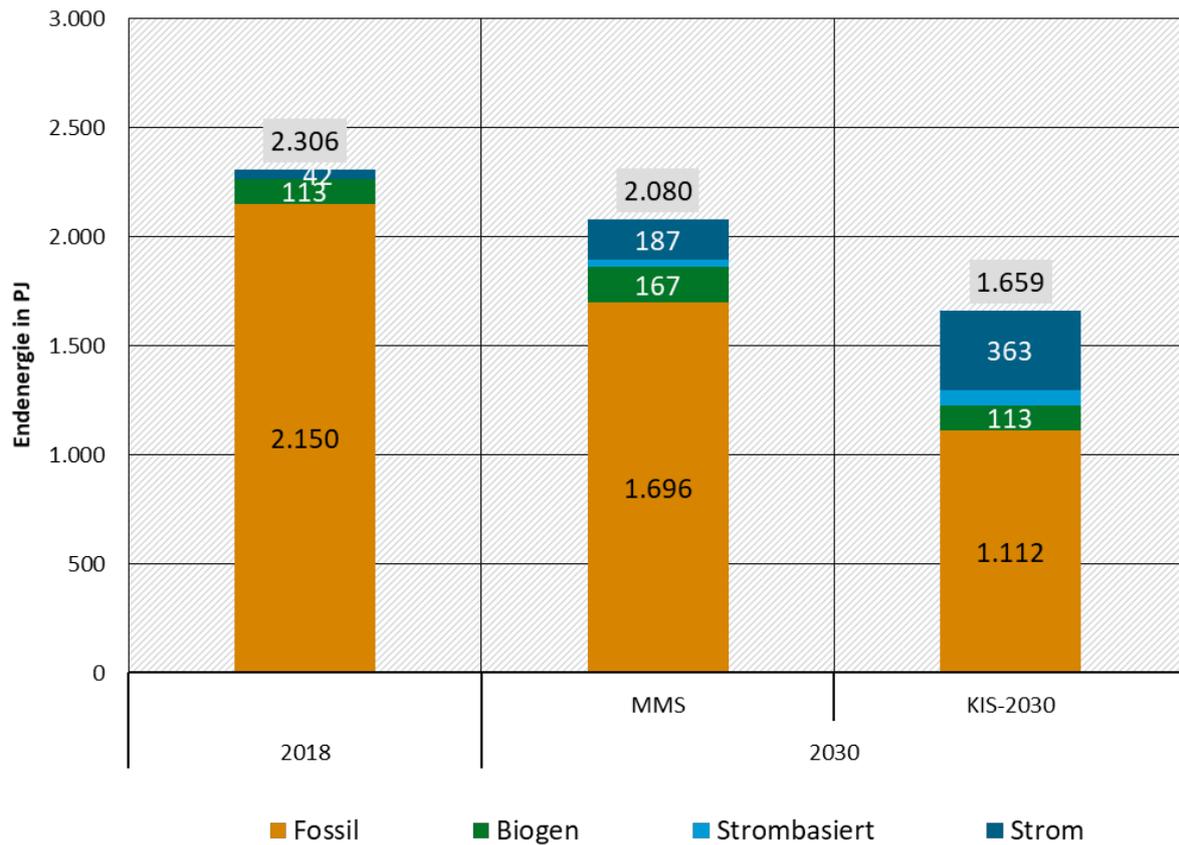
Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

**Abbildung 90: Vergleich der Bestände an Last- und Sattelzügen zwischen KIS-2030 und MMS**

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

#### 9.4.4.3 Vergleich Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch wird im Zeitraum von 2018 bis 2030 im MMS um 9,8 % und im KIS-2030 um 28,1 % reduziert (Abbildung 91). Dies geht vor allem auf die stärkere Elektrifizierung und der damit erheblich höheren Energieeffizienz sowie die geringere Verkehrsnachfrage und die Verlagerung auf den Umweltverbund zurück. Im KIS-2030 wächst der Strombedarf des Verkehrssektors bis 2030 auf 363 PJ, womit sich die Stromnachfrage im Vergleich zum MMS (187 PJ) nahezu verdoppelt. Durch den stärkeren Bedarf an Wasserstoff im Verkehrssektor steigt die Nachfrage nach grünem Wasserstoff. Gleichzeitig reduziert sich dabei die Nutzung von Biokraftstoffen im Verkehrssektor im Vergleich zum MMS um 54 PJ.

**Abbildung 91: Vergleich des Endenergiebedarfs im nationalen Verkehr zwischen KIS-2030 und MMS**

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01 und Destatis Genesis-Datenbank

#### 9.4.4.4 Vergleich Treibhausgasemissionen

Im Vergleich von MMS, KIS-2030 und der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 weist das KIS-2030 den ambitioniertesten Minderungspfad auf und ist das einzige der vorgestellten Szenarien, das im Jahr 2030 das Treibhausgasemissionsziel für den Verkehrssektor erreicht. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind die bei Weitem dominierenden Treibhausgasemissionen des Verkehrs. Weitere Treibhausgasemissionen (CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) sind von sehr geringer Bedeutung. Im Vergleich zum MMS kann mit dem zusätzlichen Instrumentenset des KIS-2030 eine deutlich stärkere Treibhausgas-minderung bis zum Jahr 2030 erreicht werden. Im Jahr 2025 beträgt die zusätzliche Minderung bereits 16,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und steigt bis zum Jahr 2030 auf 42,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq an.

Bereits ein weniger ambitionierter CO<sub>2</sub>-Preispfad (BEHG-Sensitivität) sorgt bei ansonsten gleicher Ausgestaltung des Szenarios dafür, dass das Sektorziel im Jahr 2030 verfehlt wird. Im MMS wird dieses mit 41,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq sogar sehr deutlich verfehlt. Selbst in der ambitioniertesten Ausgestaltung im KIS-2030 werden die Ziele des Klimaschutzgesetzes in den vorangehenden Jahren verfehlt, auch wenn sich die Lücke bis zum Jahr 2030 kontinuierlich verringert, wie in Abbildung 92 dargestellt.

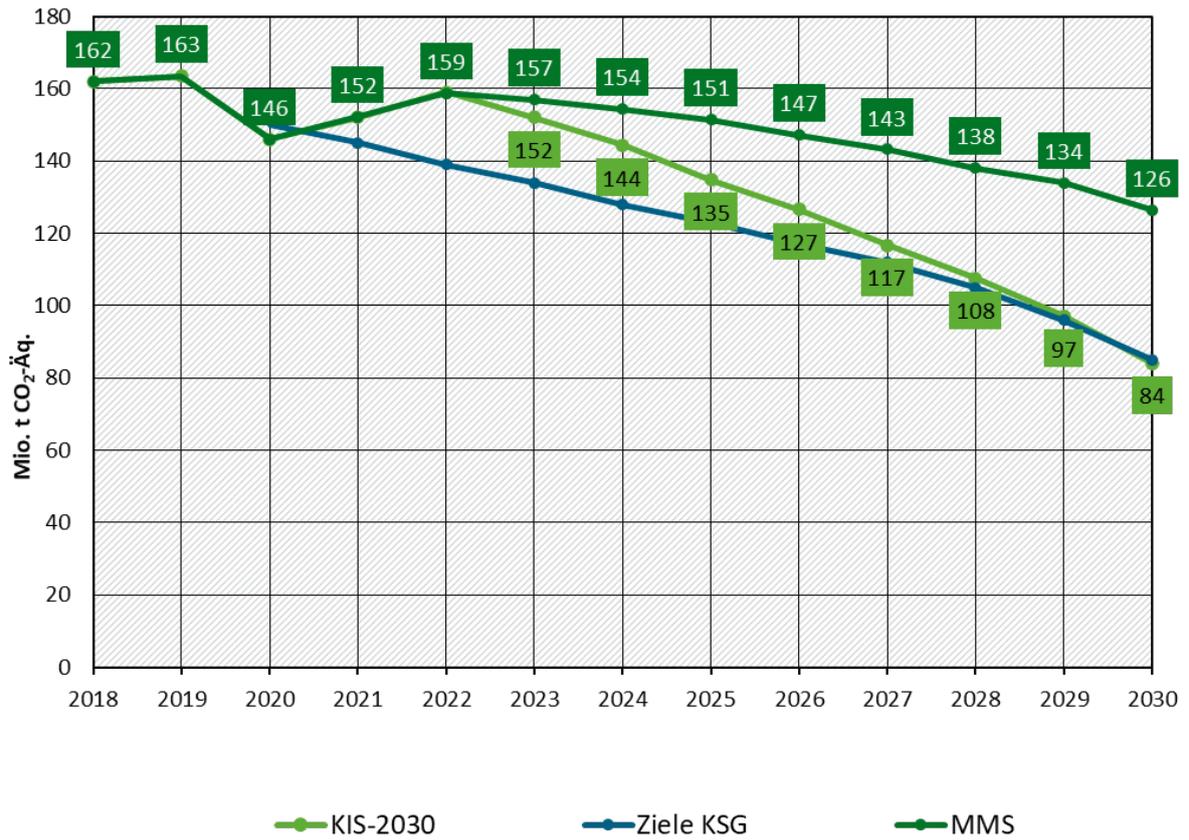
Den Szenarien gemein ist, dass sich die Treibhausgas-minderung zunehmend beschleunigt und sich dabei insbesondere die zunehmende Elektrifizierung des Fahrzeugbestands nach 2025 deutlich bemerkbar macht. So rangiert die Bandbreite der Treibhausgas-minderung gegenüber dem Basisjahr 1990 im Jahr 2025 noch im Bereich von 7,6 % (MMS) bis 17,7 % (KIS-2030) und erhöht sich innerhalb von 5 Jahren auf bereits 22,9 % (MMS) bis 48,7 % (KIS-2030) im Jahr 2030.

**Tabelle 108: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	160,7	158,6	160,3				
MMS				149,6	124,8	98,8	77,7
KIS-2030				133,3	83,1	41,8	21,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				136,0	89,3	48,1	25,3
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	1,7	0,3	0,2				
MMS				0,2	0,2	0,2	0,1
KIS-2030				0,2	0,1	0,1	0,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,2	0,1	0,1	0,1
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	1,5	1,0	1,7				
MMS				1,6	1,4	1,1	0,9
KIS-2030				1,4	0,9	0,4	0,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				1,4	0,9	0,5	0,3
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	163,9	160,0	162,3				
MMS				151,4	126,4	100,1	78,7
KIS-2030				134,9	84,1	42,3	21,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				137,6	90,4	48,7	25,6
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 1990 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018		-2,4	-1,0				
MMS				-7,6	-22,9	-38,9	-52,0
KIS-2030				-17,7	-48,7	-74,2	-87,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-16,0	-44,8	-70,3	-84,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 2005 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018			1,4				
MMS				-5,4	-21,0	-37,4	-50,8
KIS-2030				-15,7	-47,4	-73,5	-86,6
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-14,0	-43,5	-69,6	-84,0

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030

**Abbildung 92: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im KIS-2030 und MMS im Vergleich zu den KSG-Sektorzielen, 2018-2030**



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis von BMVI (2020), TREMOD 6.01, UBA (2020b) und Destatis Genesis-Datenbank

## 10 Landwirtschaft

### 10.1 Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick

**Tabelle 109: Treibhausgasminderungswirkung von Instrumenten im Landwirtschaftssektor im KIS-2030, 2025 und 2030**

Instrumente im KIS-2030	2025	2030
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	
<b>MMS (Thünen-Institut)</b>	<b>67,3</b>	<b>62,4</b>
Modellbedingte Unterschiede	-0,7	-0,8
<b>MMS (Ergebnis Öko-Institut)<sup>a</sup></b>	<b>66,6</b>	<b>62,0</b>
Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen und gezielte Verminderung der Lachgasemissionen sowie Verbesserung der Stickstoffeffizienz <sup>b</sup>	-0,2	
Stärkung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlichen Reststoffen <sup>b</sup>	-0,1	
Förderung von Energieeffizienz und Erneuerbaren in der Landwirtschaft und im Gartenbau <sup>c</sup>	-0,4	-0,7
Förderung des Öko-Landbaus	-0,5	-1,7
Umsetzung der GLÖZ-Standards und Öko-Regelungen der EU-Agrarpolitik	-0,6	-0,8
Verschärfung der DÜV auf mineralischen Böden in Kombination mit Tierwohlförderung	-1,7	-2,3
Verschärfung der DÜV auf organischen Böden (Mooren)	-0,2	-0,4
Moorbodenschutz (N <sub>2</sub> O-Emissionen)	-0,1	-0,3
<b>Kumulierte Treibhausgasminderung der betrachteten Instrumente<sup>d</sup></b>	<b>-4,5</b>	<b>-6,6</b>
<b>KIS-2030</b>	<b>62,0</b>	<b>55,8</b>
<b>KSG-Jahresemissionsmenge</b>	<b>63</b>	<b>56</b>

<sup>a</sup>Das MMS wurde ursprünglich vom Thünen-Institut verfasst. Hier sind die Maßnahmen des MMS mit dem LiSE-Modell des Öko-Instituts nachgebildet worden. Modellbedingt kommt es daher zu geringen Abweichungen der Gesamtemissionen.

<sup>b</sup>Beschleunigung bzw. früherer Beginn als im MMS unterstellt, so ergeben sich Treibhausgaseinsparungen ggü. dem MMS im Jahr 2025, im Jahr 2030 gleicht sich der Effekt wieder aus und es entstehen keine zusätzlichen Treibhausgaseinsparungen.

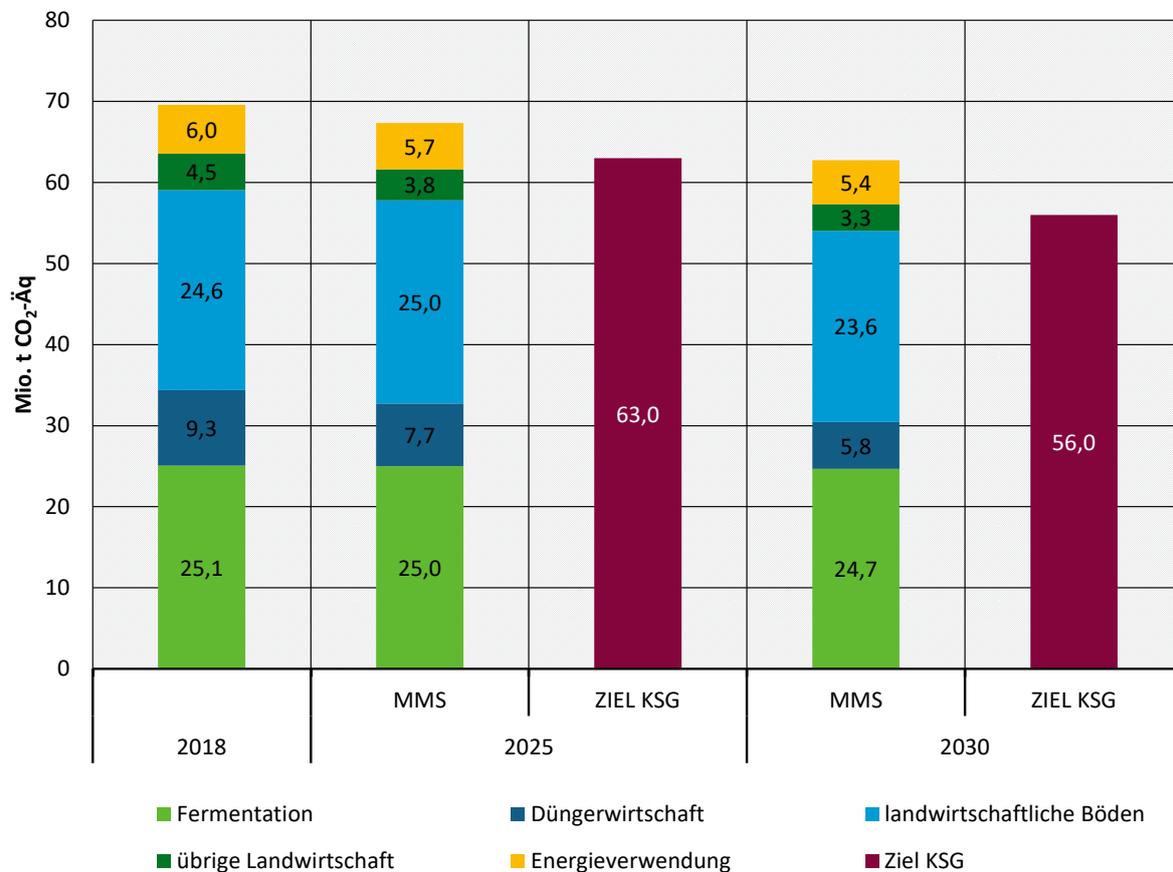
<sup>c</sup>Neben dem Förderprogramm Energieeffizienz wirken auch andere Instrumente wie das EEG, die Marktanzreizförderung oder der CO<sub>2</sub>-Preis. Auf Grund von bestehenden Unsicherheiten bei den Ausgangsdaten (Restgröße in der Statistik) und den geringen Gesamtemissionen sind die Minderungswirkungen auch nicht direkt einzelnen Untermaßnahmen zugeordnet (siehe auch Erläuterungen im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021)). Kosten beziehen sich auf den Förderanteil (Annahme 35 %).

<sup>d</sup>Rundungsbedingte Abweichungen

Quelle: Berechnung Öko-Institut

Im Landwirtschaftssektor verbleibt im MMS im Jahr 2030 eine Lücke<sup>82</sup> von 6,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq gegenüber den Sektorzielen des KSG (Abbildung 93). Diese Lücke muss über zusätzliche Instrumente im KIS-2030 geschlossen werden.

**Abbildung 93: Treibhausgasemissionen aus dem Landwirtschaftssektor im MMS im Vergleich zu den KSG-Sektorzielen, 2025, 2030**



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Öko-Institut et al. (2021)

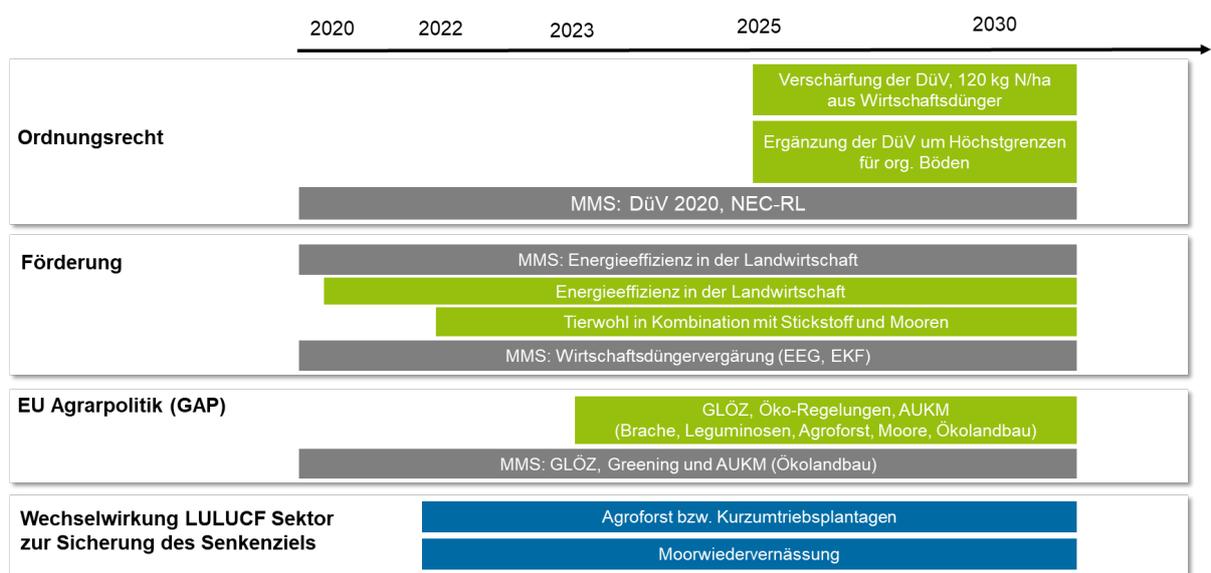
Zur Erreichung der KSG-Sektorziele werden im KIS-2030 neue Instrumente eingeführt bzw. bestehende Instrumente verschärft. Abbildung 94 stellt die betrachteten Klimaschutzinstrumente des MMS und des KIS-2030 dar. Im Bereich des Ordnungsrechts wirkt hauptsächlich die Düngemittelverordnung (DüV), die ab 2025 im KIS-2030 weiter verschärft wird. Hinzu kommen nationale Förderinstrumente (Richtlinie zur Energieeffizienz, Gelder aus dem Energie- und Klimafonds oder auch die Förderung über das EEG). Neu ist im KIS-2030 die Förderung von Tierwohl in Kombination mit weiteren Umwelt- und Klimaskriterien, wie beispielsweise die Verknüpfung der Fördergelder mit einer Obergrenze für die Flächenbindung. Zusätzlich zum MMS sind auch die Instrumente der neuen GAP-Förderperiode 2023-2027, mit weiteren und verschärften GLÖZ-Standards und den Öko-Regelungen (Umweltmaßnahmen in der 1. Säule) berücksichtigt. Die neuen Regelungen verfolgen in erster Linie das Ziel die Biodiversität und an-

<sup>82</sup> Die angewendeten Berechnungsmethoden und Emissionsfaktoren basieren auf der Inventar-Submission 2020, das Basisjahr ist 2018. Zum Zeitpunkt der Berichtsverfassung liegt bereits die Submission 2022 vor, die relevante methodische Änderungen mit sich bringt. Näheres siehe im Methodenteil in Abschnitt 10.2.

dere Umweltleistungen (z. B. Bodenschutz) zu schützen und sind in der Regel Extensivierungsmaßnahmen. Durch Synergieeffekte mit dem Klimaschutz führt die Umsetzung dieser Regelungen aber auch zu Treibhausgasminderungen.

Für die Umsetzung der Senkenziele des LULUCF-Sektors (Kapitel 12) müssen auch Änderungen der Landnutzung erfolgen, die dann Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen des Landwirtschaftssektors haben. Dazu zählen in erster Linie die Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten organischen Böden und die Schaffung von neuen Kohlenstoffsinken auf der Landwirtschaftsfläche durch die Einführung und Ausweitung von Gehölzstrukturen wie beispielsweise Agroforstsystemen aber auch Kurzumtriebsplantagen. Die Instrumente zur Umsetzung dieser Maßnahmen werden in Kapitel 12 genauer beschrieben.

**Abbildung 94: Klimaschutzinstrumente im KIS-2030 im Sektor Landwirtschaft**



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut

## 10.2 Methodik

Hinweis: Mit der Berichterstattung 2022 wurde vom Thünen-Institut eine geänderte Methode für die Berechnung der Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden eingeführt. Für das Jahr 2020 verringern sich diese dadurch um knapp ein Viertel (von knapp 25 auf knapp 19 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) und die gesamten Treibhausgasemissionen des Sektors liegen nun bei 62,4 statt bei 66,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (nach alter Methode), vergl. Vos et al. (2022). Die Methodenänderung hat Auswirkungen auf die gesamte Zeitreihe seit 1990. Ob dadurch das Sektorziel neu bewertet werden wird, ist derzeit noch offen. Wenn diese Methodenänderung keine Verschärfung des Sektorziels für 2030 nach sich zieht, würde damit genau die verbleibende Lücke zum Ziel geschlossen werden.

Im MMS wurde die Landwirtschaft vom Thünen-Institut bearbeitet (Öko-Institut et al. 2021). Das KIS-2030 wurde dagegen mit dem LiSE-Modell<sup>83</sup> des Öko-Instituts berechnet (siehe Anhang B.6.2). In einem ersten Schritt wurde das Modell auf die Daten und Berechnungen des MMS des Thünen-Instituts parametrisiert. Dafür wurden alle Annahmen des MMS in Bezug auf Ertrags- und Leistungssteigerungen auch für das KIS-2030 übernommen (für nähere Details siehe

<sup>83</sup> LiSE steht für Lifestock, Soil and Energy

Öko-Institut et al. (2021)). Gleichzeitig wurden alle Instrumente und Maßnahmen des MMS integriert. Es verbleiben modellbedingte Abweichungen für das Jahr 2030 im Bereich von 0,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, was einer Größenordnung von etwa 1 % entspricht. Erst nach der Kalibrierung des LiSE-Modells auf das MMS wurden in einem zweiten Schritt das KIS-2030 berechnet.

Im KIS-2030 wird die Wirkung verschiedener zusätzlicher Klimaschutzinstrumente gegenüber dem MMS ermittelt. Das LiSE-Modell des Öko-Instituts arbeitet nicht auf Basis ökonomischer Zusammenhänge, sondern ist ein rein naturwissenschaftliches Modell. Zur Übersetzung politischer Instrumente in das Modell, sind daher teilweise modellexterne Überlegungen und Analysen nötig, die deren Wirkung auf die Aktivitätsgrößen sowie Emissionsfaktoren innerhalb des Modells übersetzt.

Die Berechnung der energiebedingten Emissionen des Landwirtschaftssektors erfolgte sowohl im MMS als auch im KIS-2030 mit dem Teilmodul des LiSE-Modells zur Energie. Gegenüber dem MMS gab es keine methodischen Änderungen.

Entsprechend der Inventarmethodik werden jeweils nur die direkten Emissionen bilanziert. Indirekte Emissionen (z. B. für Stromverbrauch oder Fernwärmeverbrauch) werden dort bilanziert, wo sie in die Atmosphäre entweichen (also z. B. bei den Kraftwerken in der Energiewirtschaft).

### **10.3 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung**

Für das KIS-2030 wurden alle Annahmen des MMS in Bezug auf Ertrags- und Leistungssteigerungen übernommen (für nähere Details siehe Öko-Institut et al. (2021)). Allerdings wurde die Entwicklung im MMS nicht nach konventioneller und ökologischer Anbauweise differenziert.

#### **10.3.1 Annahmen zur Entwicklung der Tierbestände und der Instrumentenwirkung**

Im Bereich der Tierhaltung wirkt vor allem die Verschärfung der Düngeverordnung (DüV) mit abgesenkten Ausbringungsobergrenzen für Wirtschaftsdünger in Kombination mit der Förderung des Tierwohls.

Die Ausbringungsobergrenze für Wirtschaftsdünger wird im KIS-2030 für mineralische und organische Böden unterschieden. Auf mineralischen Böden wird sie bis 2030 von 170 kg N auf 120 kg N pro Hektar abgesenkt und auf organischen Böden von 170 kg N auf 80 kg N. Als flankierendes Instrument soll hier die Tierwohlförderung wirken, die sich aktuell noch in der politischen Diskussion befindet. Hier sind v.a. die Förderbedingungen wichtig, um einen Impuls auf die Treibhausgasemissionen auszuüben. Beispielsweise könnte eine Flächenbindung als Förderkriterium ein wesentlicher Schritt in diese Richtung sein.

Die Abschätzung der Instrumentenwirkung basiert auf den statistischen Daten zur Tierhaltung auf Landkreisebene in Kombination mit den Exkretionsraten aus dem Treibhausgasinventar. Welche konkreten Anteile der ausgewiesenen Minderungswirkung über die Förderung und welche über das Ordnungsrecht erreicht werden können, wurde im Rahmen des Szenarios nicht abgeschätzt. Grundsätzlich wird im KIS-2030 von der Gleichzeitigkeit beider Mechanismen zur Aktivierung der Betriebe ausgegangen, um die Tierhaltung im Sinne von Tierwohl und Klimaschutz umzugestalten (Prinzip „Erst Fördern, dann Fordern“).

Die Ermittlung des überschüssigen Wirtschaftsdüngers erfolgt auf Landkreisebene auf Basis der Landwirtschaftszählung 2020 (StÄBL 2022). Aus den Daten zu den Milchkuh-, Rinder- und Schweinebeständen wird der Wirtschaftsdüngeranfall ermittelt und mit den Flächen in Relation gesetzt. Der Anteil, der über den Zielwert von 120 kg Stickstoff pro Hektar hinausgeht, kann entweder in andere Regionen bzw. Landkreise innerhalb Deutschlands exportiert werden oder es

erfolgt eine Abstockung des Tierbestands. Dafür wurden folgende heuristische Annahmen zu Grunde gelegt:

- ▶ Für Milchkühe und sonstige Rinder: 50 % der Zielerfüllung erfolgt über eine Abstockung der Tierbestände, während 50 % über den Export des Wirtschaftsdüngers in andere Regionen Deutschlands erfolgt.
- ▶ Für Schweine wird angenommen, dass 75 % über den nationalen Gülletransfer erfolgt und 25 % über eine Abstockung. Dies basiert auf der Annahme, dass es sich bei den schweinehaltenden Betrieben um Betriebe mit einer geringeren Flächenausstattung handelt, und hier auch heute schon Kapazitäten und Technologie (z. B. für die Gülleaufbereitung) für den Export von Wirtschaftsdünger zur Verfügung stehen und genutzt werden.
- ▶ Die Entwicklung der Anzahl der Milchkühe, der sonstigen Rinder und der Schweine ergibt sich damit aus der Wirkung der Instrumente zur Verschärfung der Düngeverordnung (DÜV) auf mineralischen und organischen Böden in Kombination mit Tierwohlförderung
- ▶ Keine Instrumente für Entwicklung in Bezug auf Geflügel, Pferde, Schafe und Ziegen<sup>84</sup>: Übernahme der Tierzahlen aus dem MMS (Öko-Institut et al. 2021)

### 10.3.2 Annahmen Ökolandbau (Flächenanteil und Tierbestände)

Bis zum Jahr 2030 wird der Anteil der Öko-Landbaufläche auf 30 % der gesamten landwirtschaftliche Nutzfläche erhöht. Für die Umstellung der Tierhaltung werden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Die Erträge im Ökolandbau werden soweit vorhanden aus den Meldungen der Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH (AMI)<sup>85</sup> übernommen. Ertragszuwächse im Ökolandbau folgen den Ertragsentwicklungen des konventionellen Landbaus. Die Milchleistungen im Ökolandbau steigen von heute durchschnittlich 7.400 Liter pro Kuh pro Jahr auf 7.500 Liter pro Kuh pro Jahr im Jahr 2030.
- ▶ Zur Herleitung der absoluten Tierbestandszahlen im Ökolandbau wird angenommen, dass überwiegend heute schon extensiv wirtschaftende Betriebe mit einer geringen Tierbesatzdichte pro Hektar umstellen. Dafür werden für die Milchkuh- und Rinderbestände auf Basis der Regionalstatistik (StÄBL 2022) die Tierbestände ermittelt, die auf Landkreisebene in Regionen mit unter 1,2 Raufutter verzehrende Großvieheinheit (RVG) pro Hektar Grünland stehen. Ausgehend von den ermittelten Milchkuh- und Rinderbeständen wird angenommen, dass 60 % der Tierbestände zukünftig in Öko-Betrieben gehalten werden. Abzüglich der heute schon im Ökolandbau gehaltenen Milchkuh- und Rinderbestände ergibt sich die absolute Anzahl der Öko-Tiere. Dadurch werden bis zum Jahr 2030 2,4-mal so viele Milchkühe wie heute im Ökolandbau gehalten, während sich der Anteil der sonstigen Rinder ggü. heute verdoppelt.

<sup>84</sup> Pferde, Schafe und Ziegen werden oft extensiv und weidebasiert gehalten, weshalb es hier kaum Maßnahmenbedarf gibt. Bei Geflügel ist das gewählte Vorgehen dagegen eher durch die Datengrundlage begründet: Die landkreis aufgelösten Daten zum Geflügelbestand sind nicht nach Geflügelarten aufgeschlüsselt. Daher bestehen Unsicherheiten in Bezug auf die N-Exkretionsraten. Zudem sind einzelne große Geflügelhaltungen durch die Landkreisauflösung nicht sichtbar, aber diese wären bevorzugt die Zielgruppe von Maßnahmen. Daher können die für die anderen Tierbestände berücksichtigten Maßnahmen für Geflügel nicht abgebildet werden.

<sup>85</sup> <https://www.oekolandbau.de/handel/marktinformationen/der-biemarkt/marktberichte/ertraege-im-biologischen-und-konventionellen-landbau/>

- ▶ Verdopplung des Schweine- und Geflügelbestands in der ökologischen Haltung ggü. 2020 bis zum Jahr 2030<sup>86</sup>. Für die übrigen Tiergruppen erfolgte keine explizite Annahme zum Anteil der Tiere im Ökolandbau.
- ▶ Auf Basis der Tierbestände in Öko-Betrieben wird die erforderliche Acker- und Grünlandfläche ermittelt, die für die Versorgung der Öko-Tiere zur Verfügung stehen muss.
- ▶ Nach der Ermittlung der Tierfutterfläche wird die restliche Ökolandbaufläche zur Erreichung des Flächenziels von 30 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche durch Marktfruchtanbau aufgefüllt.

## 10.4 Instrumente und deren Parametrisierung

### 10.4.1 KIS-2030

#### 10.4.1.1 Maßnahmen zur Förderung der Energieeffizienz und des Ausbaus der Erneuerbaren Energien

Energieeffizienz und der Ausbau von Erneuerbaren Energien werden über verschiedene Instrumente gefördert und können auch von landwirtschaftlichen Betrieben in Anspruch genommen werden bzw. wirken auch im Landwirtschaftssektor (z. B. EEG, Marktanreizprogramm, 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. Die Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Einsparungen wirkt dagegen direkt im Landwirtschaftssektor und wird auch quantifiziert. Daneben wirken weitere Instrumente vor allem im Bereich des Ausbaus von erneuerbaren Energien. Auch im Landwirtschaftssektor wird der verstärkte Einsatz von erneuerbaren Energien und einer zunehmenden Elektrifizierung unterstellt. Eine genaue Zuordnung der Wirkungen zu verschiedenen Einzelinstrumenten war im Rahmen der Szenario Betrachtung aber nicht möglich.

#### Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Einsparungen in der Landwirtschaft und Gartenbau (Vorschlag aus Sofortprogramm)

##### Instrumententyp: Finanzielle Förderung

Das bestehende Bundesprogramm „Energieeffizienz“ wird um weitere 15 % aufgestockt. Die Förderquote von 35 % wird dabei beibehalten. Auf diese Weise können weitere Minderungen aus Energieeinsparung und dem Einsatz erneuerbarer Energien erzielt werden.

##### Parametrisierung

Es wird davon ausgegangen, dass für das zusätzliche Fördervolumen gleichermaßen kosteneffiziente Treibhausgaseinsparungen realisiert werden können<sup>87</sup>. Gegenüber dem MMS werden die Mittel entsprechend um die genannten 15 % pro Jahr erhöht und diese Gesamtsumme bis ins Jahr 2040 fortgeschrieben.

<sup>86</sup> Die Entwicklung des konventionellen Tierbestands ergibt sich aus der Entwicklung des Gesamtbestands, der mit weiteren Maßnahmen hinterlegt ist, insbesondere zu Ausbringungsobergrenzen für Wirtschaftsdünger (vgl. Abschnitt 9.3).

<sup>87</sup> Zur Entwicklung des Einsparpotenzials und der Kosteneffizienz zukünftiger Maßnahmen können keine näheren Angaben gemacht werden, da die Datenlage im Bereich der energiebedingten Emissionen in der Landwirtschaft insgesamt auf Schätzannahmen beruht. Die hier zugrunde gelegten Erkenntnisse aus der Evaluierung des Bundesförderprogramms Energieeffizienz sind eine Momentaufnahme, da keine vorhergehende oder nachfolgende Erhebung stattgefunden hat.

### Weitere Instrumente zur Stärkung der Energieeffizienz

Mit einem Anteil von 2/3 an den energiebedingten Emissionen der Landwirtschaft<sup>88</sup>, überwiegen die Emissionen aus dem Kraftstoffeinsatz. Mit der Änderung der Energieeffizienzrichtlinie werden auch diese Emissionen berücksichtigt und es wird der Umstieg auf effizientere Maschinen bzw. elektrisch betriebene Maschinen als auch die Umrüstung auf nachhaltige bzw. selbst erzeugte Biokraftstoffe gefördert.

Daneben sind weitere Instrumente wie die Reform der Agrardieselsubventionen und der Kfz-Steuer für landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge in der Diskussion. Inwieweit die Reform der Agrardieselsubventionen und die Einführung der Kfz-Steuer für landwirtschaftliche Fahrzeuge einen Anreiz zur Modernisierung der Fahrzeugflotten ergeben und damit eine Steigerung der Kraftstoffeffizienz, wurde im Rahmen der Modellierung nicht betrachtet. Genauso wie die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Preises für die Bereiche Wärme und Verkehr ist zu erwarten, dass damit ein weiterer Anreiz zur Verringerung des landwirtschaftlichen Energieverbrauchs vorliegt. Für die landwirtschaftlichen Nutzfahrzeuge liegt das Potenzial hierfür vor allem in der Verringerung der wendenden Bodenbearbeitung, in einer energiesparenden Fahrweise und in der Verbesserung der Maschineneinstellungen (durch engere Wartungsintervalle) oder die Umrüstung auf effizientere Maschinen und den Einsatz von Biokraftstoffen. Eine Reform der Agrardieselsubventionen bzw. eine Kfz-Steuer Reform könnte einen Preisanreiz für diese Maßnahmen setzen. Allerdings muss auch berücksichtigt werden, dass das Einsparpotenzial des Kraftstoffeinsatzes der landwirtschaftlichen Nutzfahrzeuge begrenzt ist. Im Gegensatz zu beispielsweise privatem Pkw-Verkehr kann ein Großteil der Fahrten in der Landwirtschaft nicht vermieden werden, da die Arbeitsabläufe (Bodenbearbeitung, Aufbringung Düngemittel, Ernte, Gülletransport etc.) nicht vermieden werden können.

#### 10.4.1.2 Stickstoff-Maßnahmen

Die Stickstoffmaßnahmen wirken in der Regel dadurch, dass eine Verringerung der betrieblichen Nährstoffsalden eine äquivalente Einsparung von Mineraldüngern zur Folge hat (Einsparung direkter N<sub>2</sub>O-Emissionen) und durch eine Einsparung indirekter N<sub>2</sub>O Emissionen, infolge geringerer Deposition und Auswaschungsverluste.

Wichtige regulatorische Hebel zur Minderung der Stickstofffracht stammen dabei aus dem Düngerecht: Bei der Anwendung von Düngemitteln ist die gute fachliche Praxis (GfP) einzuhalten. Auch dürfen Düngemittel nur so angewandt werden, dass „der Naturhaushalt nicht gefährdet“ wird. Die Konkretisierung dieser beiden unbestimmten Vorgaben im Düngegesetz erfolgt über die Düngeverordnung (DüV) sowie über die Stoffstrombilanzverordnung (StoffBilV), die in den folgenden Punkten dargestellt sind.

##### 10.4.1.2.1 Verschärfung des Stickstoffziels in der Nachhaltigkeitsstrategie und Umsetzung in der Stoffstrombilanz

#### Instrumententyp: Ordnungsrecht

Die Stoffstrombilanzverordnung soll die Nährstoffverluste aus der Landwirtschaft so weit wie möglich vermindern und den nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgang mit Nährstoffen sicherstellen (§ 3 Abs. 1 StoffBilV). Ab spätestens 2023 soll die Stoffstrombilanzverordnung für alle Betriebe ab 20 Hektar oder 50 GVE gelten (d.h. diese müssen betriebliche Stoffstrombilanzen erstellen). Die Stoffstrombilanz soll zur Umsetzung des Ziels in der Nachhaltigkeitsstrategie beitragen, den Stickstoffüberschuss nach der Stickstoff-Gesamtbilanz für Deutschland im Jahr

<sup>88</sup> Nach Zuordnung des Klimaschutzgesetzes werden dem Landwirtschaftssektor auch Teile der energiebedingten Emissionen (Wärmeverbrauch, Kraftstoffeinsatz, CRF Kategorie 1.A.4.c) zugerechnet. Die Emissionen aus dem Stromverbrauch werden dem Stromsektor (Energiewirtschaft bzw. Industrie) zugeschlagen.

2030 auf 70 kg N / ha Landwirtschaftsfläche zu begrenzen. Dafür muss auf Ebene der Betriebe der zulässige Stickstoffsaldo unterhalb einer gesetzlich vorgegebenen Obergrenze liegen. Allerdings wird der erlaubte betriebliche Saldo bisher nicht nach den verschiedenen Betriebstypen differenziert und liegt mit einem erlaubten Überschuss von 175 kg N/ha in der Summe deutlich zu hoch.

Bisher (MMS): Im Maßnahmenprogramm 2030 zum Klimaschutzplan des Bundes wurde beschlossen, dass die Stoffstrombilanzverordnung weiterentwickelt wird und ab dem Jahr 2021 weitere Betriebe verpflichtet werden. Für das MMS werden jedoch keine niedrigeren Bilanzwerte auf Betriebsebene, die für die Abschätzung zugrunde gelegt worden wären, benannt.

Insgesamt wird die Umsetzung der novellierten StoffBiV als träge eingeschätzt, da Datenschutzaspekte und Digitalisierungsaufgaben (Schaffung eines einheitlichen Tools für alle Bundesländer, zentrale Datenhaltung) zu lösen sind, um den Aufwand für die Betriebe und die Behörden in Grenzen zu halten. Außerdem müssen noch zwei fachliche Zielfestlegungen innerhalb der Verordnung erfolgen. Zum einen fehlt die verbindliche Zielfestlegung für den nationalen N-Saldo (bisher Orientierung Zielwert Nationale Nachhaltigkeitsstrategie 70 kg N/ha bis 2030<sup>89</sup>), zum anderen fehlt die Übersetzung der nationalen Zielfestlegung in einen Zielwert für verschiedene Betriebstypen. Das Nachhaltigkeitsziel erhielte auf diese Weise gesetzlich bindenden Charakter.

Bei einer konsequenten Umsetzung der Stoffstrombilanzverordnung mit einer ambitionierten Grenzwertsetzung auf Betriebsebene und entsprechenden Kontrollen und Sanktionen sind kaum zusätzliche Instrumente im Bereich des Stickstoffs notwendig. Es liegt dann in der Hand der Betriebe, welche Maßnahmen umgesetzt werden, um die betrieblichen Obergrenzen einzuhalten. Allerdings erscheint eine kurzfristige, breite Minderungswirkung durch die StoffBiV derzeit eher unwahrscheinlich (s.o.). Daher werden im Folgenden weitere Instrumente und deren Parametrisierung vorgeschlagen.

Im Rahmen der Modellierung mit dem LiSE-Modell wird ein Bottom-Up-Modell verwendet, welches die Treibausgasreduzierung über die Umsetzung der folgenden Instrumente ermittelt.

#### 10.4.1.2.2 Verschärfung/Verbesserung der Düngeverordnung (DüV)

##### **Instrumententyp: Ordnungsrecht**

Die DüV ist bisher das Instrument im Düngepaket, das den Einsatz von Stickstoff mit wenigen Ausnahmen in allen Betrieben verbindlich regelt und bei Nichteinhaltung sogar mit einer Kürzung der Direktzahlungen sanktioniert werden kann. Die im folgenden vorgeschlagenen Änderungen beziehen sich auf eine Verschärfung der bisher schon in der DüV geregelten Sachverhalte.

##### **Anpassung der Ausbringungsbergrenze für den gesamten organischen Dünger – analog zur Umsetzung der Stoffstrombilanz und in Kombination mit einer GV-Bindung**

Nach Gutser et al. (2014) liegt die Obergrenze für die organische N-Ausbringung pro Hektar zwischen 80 und 120 kg N/ha und damit wesentlich unter den heute erlaubten 170 kg N/ha. Daher soll die Anpassung der Ausbringungsbergrenzen für organischen Dünger von heute 170 kg N pro Hektar auf 120 kg N/ha im Jahr 2030 erfolgen, sowie auf 100 kg N/ha bis 2040. Die geringeren Ausbringungsmengen gewährleisten eine bessere Nährstoffausnutzung der Pflanzen. Bei höheren Stickstoffgaben organischer Düngemittel sind Nährstoffverluste deutlich wahrscheinlicher.

<sup>89</sup> Beide Werte hängen miteinander zusammen, da im Idealfall die gewichtete Summe aller einzelbetrieblichen Bilanzen den nationalen Bilanzwert ergibt.

Es wird erwartet, dass die Wirtschaftsdüngerobergrenze in Kombination mit den von Politik und Handel angestrebten Maßnahmen zum Tierwohl mittelfristig zu einer Reduktion der hohen Tierzahlen in den Gebieten führen wird, die bereits heute von einem hohen Stickstoffüberschuss geprägt sind (Hotspots) (Uthes 2022). Siehe dazu auch unter Abschnitt 10.4.1.4.

#### **Parametrisierung**

Die Berechnung erfolgt auf der verfügbaren Datenbasis auf Landkreisebene. Zusätzlich entsteht ein Wirkungsbeitrag durch einen Rückgang der Tierhaltung in den Hotspot-Gebieten. Da das LiSE-Modell keine ökonomischen Zusammenhänge modelliert, kann der Wirkungsbeitrag nur über einen einfachen Ansatz ermittelt werden. Dazu wird vorgegeben, zu welchem Anteil der Nährstoffüberhang durch Wirtschaftsdüngeraufbereitung und -export verringert wird und zu welchem Anteil durch eine Abstockung des Tierbestands (siehe Abschnitt 10.3.1).

#### **Kurzfristige Anpassung der Ausbringungsobergrenze von Wirtschaftsdüngern auf organischen Böden – Reduktion von 170 kg N auf 80 kg N – in Kombination mit Abstockungsprämien**

Heute sind vor allem die Moorgrünländer wichtige Standorte für die Milch- und Rindfleischproduktion, mit teilweise hohen Tierbestandsdichten. Da langfristig diese Standorte nicht mehr für die Tierhaltung zur Verfügung stehen (bzw. nur noch in Form von extensiver Beweidung/Paludikultur), muss neben Förderinstrumenten auch das Ordnungsrecht die entsprechende Richtung weisen. D.h. diese Maßnahme zielt vor allem auf eine Begrenzung / Reduktion der Tiere auf Moorstandorten, indem die Obergrenze für die organische Düngung sich zunächst an einem Wert orientiert, der die Stickstoffausscheidung von ca. 1 Großvieheinheit (GV)/ha nicht übersteigt und dann schrittweise abgesenkt wird. Ein entsprechendes Politikinstrument müsste die Begrenzung schlagbezogen wirksam werden lassen, damit nur die Betriebsfläche auf organischen Böden davon betroffen ist. Aus diesem Grund soll in die DüV die Obergrenze für die Ausbringung von Wirtschaftsdünger auf organischen Böden schrittweise reduziert werden.

Gleichzeitig sollte für diese Standorte auch eine Obergrenze für die Ausbringung der Mineraldüngermenge eingeführt werden. Die Maßnahme soll flankierend zur Flächenbindung der Tierhaltung auf Moorstandorten umgesetzt werden.

#### **Parametrisierung**

Über die Tierzahlen und Leistungsparameter kann die Stickstoffausscheidung bestimmt werden. Die Anpassung soll im Jahr 2023 beginnen und dann schrittweise bis zum Jahr 2030 auf 80 kg N/ha reduziert werden. Differenziert nach dem Anteil organischer und mineralischer Böden in den Landkreisen kommt dann das Abschneidekriterium auf den Moorflächen zum Tragen. Vergleiche dazu auch Abschnitt 10.4.1.6.

#### **Erhöhung der Wirtschaftsdüngerwirksamkeit + 10 % ggü. DüV 2020**

Abhängig vom Wirtschaftsdünger (Festmist, Gülle, Gärreste etc.) enthalten Wirtschaftsdünger Stickstoff in unterschiedlicher Menge und Bindungsart, nämlich organisch gebunden und gelöst als Ammonium. Während der organisch gebundene Anteil erst durch Umsetzungsprozesse im Boden pflanzenverfügbar wird und somit langsam nachgeliefert wird, ist der Ammoniumstickstoff sofort pflanzenverfügbar. Aus diesem Grund ist bei der Ausnutzung i.d.R. der Ammonium-Anteil maßgeblich.

Je geringer die gasförmigen Verluste sind, desto höher ist der Ammoniumgehalt im Wirtschaftsdünger, der im Boden ankommt. Der Gehalt ist abhängig von der Tierart aber auch von den ergriffenen Minderungsmaßnahmen für Ammoniakemissionen in Stall und Lager (optimierte Fütterung, Lagerabdeckungen bzw. gasdichte Gärrestelagerung, bauliche Veränderungen im Stall oder auch die Verwendung von Inhibitoren oder Gülleansäuerung bereits im Stall). Auch eine

optimierte Ausbringungstechnik führt zu geringeren gasförmigen Verlusten. Investive Maßnahmen zur Emissionsminderung werden vielfach gefördert (insbesondere Lagerabdeckungen und Ausbringungstechnik). Für genehmigungspflichtige Betriebe gelten Vorgaben zur Minderung über die TA Luft verbindlich und für den Großteil der Betriebe sind die sofortige Einarbeitung und die Verwendung moderner Ausbringungstechniken durch die DüV gesetzlich vorgeschrieben. Somit ist es folgerichtig, dass auch die Wirtschaftsdüngerwirksamkeit sukzessive weiter erhöht wird. Wird dies nicht berücksichtigt, droht eine Verlagerung der Emissionen (vermehrte Nitrat Auswaschung). In einigen Fällen (Biogasgülle, Schweinegülle) liegt der Ammoniumanteil über der von der DüV ausgewiesenen Mindestausnutzung.<sup>90</sup>

Die Stickstoffausnutzung steigt zudem mit dem Nährstoffhaltevermögen der Böden (geringeres Auswaschungsrisiko) und mit einer hohen Nährstoffaufnahme der Pflanzen (abhängig von Kultur und Zeitpunkt). Entsprechend differenziert sind etwa die Vorgaben in den Niederlanden. Dort liegt auf den auswaschungsgefährdeten Sand- und Lössböden im Süden des Landes der Düngewert von Schweinegülle für einige Kulturen mittlerweile bei 80 %, vgl. Öko-Institut (2020).

Wie auch bei der Mineraldüngung, entscheidet die absolute Ausbringungsmenge auch über die Verluste. Übersteigt die Gabe die Aufnahmefähigkeit von Böden und Pflanzen, kommt es unweigerlich zu Verlusten. Insofern ist diese Maßnahme eng in Verbindung mit Maßnahmen zur Verringerung der Ausbringungsobergrenze für Wirtschaftsdünger zu sehen.

### **Parametrisierung**

Eine Erhöhung der Wirtschaftsdüngerwirksamkeit bei der Berechnung des Nährstoffbedarfs der Pflanze nach der DüV führt zu einer Verringerung des Mineraldüngereinsatzes. Im KIS-2030 wird eine Erhöhung um 10 % für flüssigen Wirtschaftsdünger und um 5 % für Festmist ggü. der DüV 2020 angenommen. Die Wirtschaftsdüngerwirksamkeit wird ab dem Jahr 2030 bis 2040 schrittweise angehoben. (Die Vorgaben im Rahmen der Düngeverordnung bis 2025 sind bereits durch das MMS abgedeckt, auf die das KIS-2030 aufsetzt.)

#### **10.4.1.2.3 Umweltgerechte Anpassung des Düngebedarfs**

Mit der Änderung der DüV 2017/2020 werden nationale verbindliche Werte für den Düngebedarf der verschiedenen Kulturarten ausgegeben. Im Gegensatz zu den davor geltenden Düngeempfehlungen der Bundesländer liegen die neuen nationalen Werte für den Düngebedarf teilweise höher. Vorgeschlagen wird daher eine standortspezifische Ausgestaltung der Düngebedarfswerte. Diese ist auf Basis der früheren Empfehlungen der Länder und neuesten Erkenntnissen auf Versuchsstandorten von den Ländern auszuarbeiten. Die Werte sind zwischen den Fachabteilungen für Landwirtschaft und denen für Umwelt (insbes. Wasser) abzustimmen, bei paritätischer Gremienbesetzung.

In einer Studie aus dem Jahr 2020 hat das Öko-Institut die Düngegesetzgebung in den Niederlanden, Frankreich und Dänemark analysiert (Öko-Institut 2020). Dabei zeigte sich, dass beispielsweise in Dänemark eine Reduzierung des Düngebedarfs zu einer signifikanten Verringerung des Stickstoffüberschusses beigetragen hat. Es wurde auch deutlich, dass die Düngegesetzgebung aller drei Länder Elemente enthalten, die verschiedene Bodentypen und klimatische und hydrologische Gegebenheiten berücksichtigen.

Im Laufe der Arbeiten hat sich gezeigt, dass der Gesamtstickstoffbedarf in Deutschland stark von den Annahmen für Weizen abhängt. Dies liegt an der Größe der Anbaufläche und den gestaffel-

<sup>90</sup> <https://llh.hessen.de/pflanze/boden-und-duengung/wirtschaftsduenger/naehrstoffgehalte-organischer-duenger/>. Dabei muss beachtet werden, dass es sich dabei um Durchschnittswerte für Hessen handelt.

ten Düngeempfehlungen in Abhängigkeit von der angestrebten Weizenqualität. Diese Maßnahme wurde im Rahmen des Szenarios nicht quantifiziert, da die Weizenqualität von vielen Faktoren abhängig ist (z. B. Witterung, Sortenwahl, Anbaumaßnahmen).

#### **10.4.1.3 Klimawirkung der Neugestaltung der GAP**

**Instrumententyp:** Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung

Im Rahmen der GAP haben verschiedene Elemente eine Klimaschutzwirkung. Diese werden im Folgenden dargestellt.

##### **Neu-Anlage von Agroforst-Systemen im Rahmen der Ökoregelungen**

**Instrumententyp:** Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung

Die Anlage von Gehölzkulturen in Form von Agroforstsystemen oder Kurzumtriebsplantagen kann bei entsprechender Ausgestaltung viele positive Effekte haben (Verringerung der Lachgasemissionen durch geringeren Stickstoffeinsatz, Kohlenstoffspeicherung in der Biomasse und im Boden, Windschutz- und Verdunstungsschutz, Verringerung der Bodenerosion etc.). Je nach Gehölzkultur ist eine Nutzung als Wertbaum, Obstbaum, Strukturelement, aber auch für die stoffliche und energetische Biomassenutzung möglich.

Mit Einführung der Förderung wird die Schaffung von Agro-Forstflächen attraktiver. Abhängig von der jährlich neu angelegten Fläche wirkt jedes Jahr die Verringerung der Düngung gegenüber der Vorkultur und der kumulierte Aufbau des Kohlenstoffspeichers in der Vegetation und im Boden. Der Umfang der Neuanlage hängt von der Höhe der Förderung ab, aber auch von der Marktnachfrage z. B. nach Holz aus Kurzumtriebsplantagen und von betriebsinternen Verwendungsmöglichkeiten. Die strengeren LULUCF-Klimaziele können hier förderlich sein.

##### **Parametrisierung**

Um die LULUCF-Ziele zu erfüllen, ist ein bestimmter Anteil an Gehölzkulturen erforderlich, die auch auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu einer zusätzlichen Kohlenstofffestlegung beitragen können. Nach ersten groben Abschätzungen wird im Jahr 2030 zur Sicherung der CO<sub>2</sub>-Senke im LULUCF-Sektor eine Fläche von ca. 400.000 ha Gehölzkulturen erforderlich sein und bis zum Jahr 2040 ca. 750.000 ha. Das entspricht einem Anteil von ca. 3,5 % der Ackerfläche im Jahr 2030 und 6 % im Jahr 2040. Die genaue Höhe wird im Rahmen der LULUCF-Modellierung ermittelt. Welcher Anteil davon als Kurzumtriebsplantage mit energetischer Biomasseverwendung genutzt wird, hängt von der finalen Biomassenachfrage der Sektoren ab und wird im Laufe der Modellierung ermittelt.

##### **Förderung des Ökolandbaus und Ergänzung eines Quotenziels für die ökologische Tierhaltung**

**Instrumententyp:** Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung

##### **Parametrisierung**

Die Beibehaltung und Ausweitung des Ökolandbaus werden weiterhin über die GAP gefördert. Bis zum Jahr 2030 werden die Ziele des Koalitionsvertrags erreicht und ein Flächenanteil von 30 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche für den Ökolandbau genutzt. Zur weiteren Stärkung des Ökolandbaus und auch zur Förderung des Grünlanderhalts ist parallel zu einem Flächenziel auch die Einführung eines Quotenziels für die ökologische Tierhaltung denkbar. Dies ist vor allem mit Blick auf den höheren Grünlandanteil im Ökolandbau wichtig. Im Rahmen dieser Modellierung konnte auf Grund von Zeit- und Kapazitätsgründen keine vertiefte Analyse des regionalen Potenzials für die Öko-Tierhaltung erfolgen (Ausbau Ökolandbau in Ackerbaugebie-

ten versus in extensiven Grünlandgebieten). Daher wurden neben den oben beschriebenen Annahmen keine weiteren Annahmen zur optimalen Entwicklung der Tierbestände im Ökolandbau getroffen und keine explizite Tierquote für den Ökolandbau ermittelt.

### **Ausweitung der nicht-produktiven Flächen**

**Instrumententyp:** Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung

#### **Parametrisierung**

Die GAP sieht unter der Konditionalität eine Ausweisung von 4 % der Ackerfläche als nicht-produktive Fläche vor. Unter den Öko-Regelungen kann dieser Flächenanteil erhöht und finanziell gefördert werden. Aus Biodiversitätsgründen ist auf Ackerland eine Extensivierung zwischen 15 % und 20 % (mindestens 10 %) erforderlich (Oppermann et al. 2020). Davon braucht es ca. 5 % bis 10 % der Fläche, die aus der Produktion genommen werden, wie z. B. die Brache. Bis zum Jahr 2027 sollen über die Öko-Regelungen nach der GAP-Durchführungsverordnung unproduktive Flächen auf weiteren 312.000 ha gefördert werden. Diese Werte werden für das Jahr 2030 übernommen.

### **Vielfältige Fruchtfolgen, Ausweitung des Leguminosenanbaus**

**Instrumententyp:** Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung

Auch eine vielfältige Fruchtfolge mit einem Leguminosenanteil von mindestens 10 % soll über die GAP gefördert werden. Für das Jahr 2030 wird eine Anbaufläche von mindestens 5 % auf der konventionellen Ackerfläche vorausgesetzt. Für die Ökolandbaufläche ist eine Anbaufläche auf 20 % des Ackerlands vorgesehen. Klimawirksam ist der ungedüngte Leguminosenanbau. Hier ist zwar in Bezug auf die Emissionen aus der Bewirtschaftung kein relevanter Unterschied gegenüber Brachen zu sehen, doch können die Leguminosen im Betrieb noch als Futtermittel oder für die menschliche Ernährung verwendet werden. Sie wirken somit auch positiv zur Verringerung des Stickstoffsaldos und im Sinne der Flächeninanspruchnahme.

Die Kulturen werden daher nicht in die ökologischen Vorrangflächen/nicht produktiven Flächen der vorherigen Maßnahmen zugerechnet.

#### **Parametrisierung**

Die Treibhausgaseinsparung wird über die eingesparte Düngung gegenüber der bislang vorherrschenden Belegung der Ackerfläche ermittelt.

#### **10.4.1.4 Schaffung eines Zukunftsfähige-Tierhaltung-Gesetzes/ Tierhaltungstransformationsgesetz**

Analog zum Kohleausstiegsgesetz könnte auch die Zukunft der Tierhaltung gesetzlich geregelt werden. Dabei soll die Reduktion der Tierbestände auf ein Maß gesenkt werden, mit dem die langfristigen Klimaschutzziele im Klimaschutzgesetz (KSG) für die Landwirtschaft erfüllt werden können. Das Gesetz soll parallel auch die Erfordernisse für einen Umbau der Tierhaltung aus Sicht des Tierwohls und zur Reduktion regionaler Stickstoffemissionen aufnehmen. Die bereits erfolgten Arbeiten der Borchert-Kommission sollten hier möglichst integriert werden. Über Tierwohl und damit verbundene Investitionen in die Stallplätze ist eine Verringerung des Tierbestands möglich.

Der Prozess soll notwendige Fragen klären (technischer & juristischer Natur) und in der Formulierung eines Gesetzesentwurfs münden. Im Einzelnen sind folgende Aspekte zu behandeln:

- ▶ Einführung einer Flächenbindung der Tierhaltung für landwirtschaftliche Betriebe (für den Bestand sowie für neu gegründete Betriebe mit einem degressiven Verlauf über die Zeit) und einer Bindung der Wiederkäuerhaltung an die Grünlandfläche.

- ▶ Flankierend wirken Abstockungsprämien und strengere Obergrenzen für die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern zur Hinleitung auf das Ziel.
- ▶ Einführung einer absoluten Tierobergrenze pro Betrieb, flächenunabhängig.

Dafür können bereits bestehende Instrumente genutzt werden. Allerdings müssen alle bestehenden Instrumente und Prozesse konsistent auf das Sektorziel der Landwirtschaft ausgerichtet werden. Dazu zählen sowohl das Baurecht, die Raumplanung, die Investitionsförderung für Stallneubauten, die TA Luft, das EEG, die GAP, die DüV, der Tierschutz oder Transferzahlungen insgesamt. Bestehende Instrumente können durch neue Instrumente ergänzt werden, wie z. B. die Einführung einer Abstockungsprämie, die sicherstellt, dass die verringerten Tierhaltungskapazitäten nicht unkontrolliert an anderer Stelle neu eingerichtet werden<sup>91</sup>. Für den weiteren Prozess sollte die Obergrenze pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche abgeleitet werden. Als Bezugsgröße könnte die leistungsbezogene Höhe der Stickstoffausscheidungen (Wirtschaftsdünger) herangezogen werden (Uthes 2022). Dabei sind nach Möglichkeit auch die Umweltziele zum Stickstoff einzubeziehen.

### Parametrisierung

Die Wirkung von Einzelmaßnahmen wie z. B. Grünlandbindung für Wiederkäuer und die Abstockung der Tierbestände auf Moorstandorten können grundsätzlich quantifiziert werden. Die Modellrechnung rechnet jedoch nicht auf der Ebene von Einzelbetrieben, die für das Instrument notwendige Bezugsgröße kommt daher nicht zur Anwendung. Die Potenziale werden daher auf regionaler Ebene ermittelt. Es bleibt zu erwarten, dass die Potenziale bei Betrachtung der Betriebsebene aber deutlich höher liegen würden.

#### 10.4.1.5 Weiterer Ausbau der Förderung der Wirtschaftsdüngervergärung

**Instrumententyp:** Kurzfristig ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung, für größere Betriebe, langfristig über Ordnungsrecht

Die Maßnahme baut auf dem MMS auf, in dem eine sehr hohe Wirtschaftsdüngervergärung von 70 % angenommen wird.

### Parametrisierung

Im KIS-2030 werden die prozentualen Vergärungsraten aus dem MMS übernommen.

#### 10.4.1.6 Förderung der Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten Mooren

Ein Großteil der Minderungswirkungen bei der Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten Mooren wirkt im LULUCF-Sektor<sup>92</sup>. Da die Änderung der Bewirtschaftung aber in den landwirtschaftlichen Betrieben notwendig ist, werden hier ein paar zusätzliche finanzielle Förderinstrumente vorgeschlagen, die sich überwiegend auf die GAP beziehen. Es wird davon ausgegangen, dass diese hohe Überschneidung mit den bisherigen Vorschlägen im KIS-2030 aufweisen. Diese werden bereits näher in den Abschnitten zu Stickstoff (Abschnitt 10.4.1.2.2) und Tierbestände (Abschnitt 10.4.1.4) behandelt.

Finanzielle Förderung über die Öko-Regelungen oder 2. Säule der GAP: Förderung der Umwandlung von Ackerland auf organischen Böden in extensives Dauergrünland im Rahmen der Öko-Regelungen unter der GAP. Die Zahlung von Flächenprämien erfolgt dabei in Anlehnung an bisherige Maßnahme in der 2. Säule (Umwandlung von Ackerland in extensives Dauergrünland).

<sup>91</sup> Vergleiche dazu auch Uthes (2022).

<sup>92</sup> Nämlich die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Mineralisierung der organischen Bodensubstanz. Im Landwirtschaftssektor werden lediglich die Lachgasemissionen dieser Böden bilanziert, die in deutlich geringerem Maße entstehen als das CO<sub>2</sub>.

Dabei wird die Zahlung an eine Flächenbindung der Wiederkäuer auf Moorstandorten gebunden ( $\leq 1$  GV/ha Grünland). Auf diese Weise soll der Tierbesatz von Wiederkäuern auf Moorstandorten langsam abgesenkt werden. Diese Maßnahme soll auf die langfristige Wiedervernässung dieser Flächen hinleiten. Sie ist somit ein erster wichtiger Schritt auf diesem Weg, bewirkt aber eine deutlich geringere CO<sub>2</sub>-Reduktion als die vollständige Vernässung dieser Flächen.

- ▶ Finanzielle Förderung über die Öko-Regelung oder 2. Säule der GAP: Abstockungsprämie zur Reduktion der Tierbestände auf Moorstandorten auf 1 GV/ha. Diese Maßnahme wirkt in Kombination mit der Verschärfung der Ausbringungsobergrenzen für organischen Dünger auf Moorstandorten.
- ▶ Finanzielle Förderung über die GAP: Bei Bewirtschaftungsumstellung auf extensives Dauergrünland, geringe GV/ha und Nutzung als Paludikultur, erfolgt die Aufnahme der Moorflächen in die Flächenkulisse der benachteiligten Gebiete unter der GAP und der Erhalt entsprechender Zahlungen für die betroffenen Flächen.
- ▶ Instrumente und Annahmen zur Wasserstandsanehebung und Nutzung als Paludikulturen fallen in den LULUCF-Sektor. Mit dem Landwirtschaftssektor erfolgt im Modell eine Kopplung der Flächen. Das bedeutet, dass ein Abgleich erfolgt, in welchem Ausmaß die bisherige Bewirtschaftung und das Halten von Tieren auf Moorstandorten zurückgehen, weil sie durch die Paludikulturnutzung und Wiedervernässung nicht mehr möglich sind.

#### 10.4.1.7 Instrumente auf der Konsumseite

Auch auf der Nachfrageseite existieren verschiedene Instrumente, um den Konsum von tierischen Produkten zu reduzieren. Bisher fehlt bei den meisten Instrumenten aber die Umsetzung in die Praxis. Dazu zählen zum einen die Erhöhung von Abgaben zur Konsumlenkung, aber auch Maßnahmen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen und im Bereich der Bildung und Information:

- ▶ Kurzfristige Mehrwertsteuererhöhung auf tierische Produkte
- ▶ Langfristig Treibhausgasbepreisung von Lebensmitteln
- ▶ Vermeidung von Lebensmittelabfällen
- ▶ Information/Bildung

Minderungswirkungen auf der Konsumseite werden hier nicht quantifiziert. Die Reduktion der Lebensmittelabfälle verringert den Druck auf die Fläche. Die beiden Preisinstrumente sollen eine Verschiebung des Konsums zu mehr pflanzenbasierten Lebensmitteln auslösen. Ebenso verhält es sich mit vermehrter Ernährungsbildung.

#### 10.4.2 MMS

Im zuvor veröffentlichten MMS des Projektionsberichts 2021 wurden die folgenden Instrumente berücksichtigt:

- a) Düngeverordnung (DüV) 2020
- b) Begrenzung der N-Gesamtbilanz für Deutschland im Jahr 2030 auf 70 kg N / ha Landwirtschaftsfläche
- c) Umsetzung der NEC-Richtlinie

- d) Erhöhung des Anteils gasdicht gelagerter Gülle aus der Rinder- und Schweinehaltung auf 70 Prozent
- e) Ausbau des Ökolandbaus
- f) Erarbeitung einer Gesamtstrategie zur Verringerung der Emissionen aus der Tierhaltung
- g) Nitrifikationshemmstoffe

Eine Beschreibung der Instrumente und Maßnahmen sowie deren Parametrisierung kann Öko-Institut et al. (2021) entnommen werden.

## 10.5 Ergebnisse

### 10.5.1 KIS-2030

#### 10.5.1.1 Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche

Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche bildet die Ausgangsbasis für die Szenario-Berechnungen. Bis 2030 gehen ca. 0,2 Mio. ha Ackerland und Grünland für die Ausweitung der Flächen für Siedlungen und Infrastruktur verloren (siehe Tabelle 127 in Kapitel 12, Anstieg von Siedlungsflächen). Diese Entwicklung setzt sich auch bis 2040 fort. Ca. 0,25 Mio. ha landwirtschaftlich genutzte organische Böden werden bis zum Jahr 2030 wiedervernässt bzw. mit erhöhten Wasserständen in Form von Paludikulturen<sup>93</sup> weiter bewirtschaftet (siehe Tabelle 127 in Kapitel 12, Anstieg von Feuchtgebietsflächen). Die Flächenentwicklung erfolgt auf Basis der LULUCF-Modellierungen und ist für die Einhaltung der Senkenziele des LULUCF-Sektors relevant (vergleiche Abbildung 107).

Bis zum Jahr 2030 wird das neue Flächenziel des Ökolandbaus aus dem Koalitionsvertrag von 30 % Ökolandbau im KIS-2030 erreicht. In welchem Verhältnis die Umstellung auf Ackerland oder Grünland stattfindet, ist abhängig von den Umstellungsraten der Betriebe mit Wiederkäuerhaltung. Auf Grund der getroffenen Szenario-Annahmen (Abschnitt 10.3) ändert sich in diesem Szenario das Verhältnis von Ackerland zu Grünland im Ökolandbau und der Ackeranteil steigt.<sup>94</sup>

**Tabelle 110: Entwicklung der landwirtschaftlich genutzten Flächen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030**

	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. ha				
Ackerland mineralisch	11,4	11,3	11,2	11,2	11,1
Ackerland organisch	0,34	0,32	0,30	0,18	0,10
Dauergrünland mineralisch	3,84	3,80	3,77	3,77	3,77
Dauergrünland organisch	0,88	0,79	0,66	0,58	0,47
Dauerkulturen	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19

<sup>93</sup> Paludikultur: nasse Nutzung in Form von Schilfanbau, Erlen oder extensiver Weide bei hohen Grundwasserständen.

<sup>94</sup> Angesichts des kurzen Zeitraums zwischen der Veröffentlichung des Koalitionsvertrags und der Berechnung des Szenarios war eine vertiefte Betrachtung der Zielsetzung (30 % Öko-Landbau) und der Auswirkungen auch in intensiver genutzten Grünlandregionen nicht möglich. Inwieweit die Annahme zum Verhältnis Ackerbau:Grünland realistisch und zielführend ist und inwieweit der tierlose Öko-Landbau großflächig funktionieren kann, sollte in weiteren Studien beleuchtet werden.

	2018	2025	2030	2035	2040
Paludikulturen	0	0,12	0,23	0,39	0,54
<b>Gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche</b>	<b>16,6</b>	<b>16,5</b>	<b>16,4</b>	<b>16,3</b>	<b>16,2</b>
davon Ackerland im Ökolandbau*	0,73	1,8	3,1	3,1	3,1
davon Dauergrünland im Ökolandbau*	0,83	1,4	1,6	1,6	1,6
davon Dauerkulturen im Ökolandbau*	0,02	0,07	0,12	0,12	0,12

Anmerkung: \*Die Differenzierung für die Ökolandbau-Zahlen bezieht sich auf das Jahr 2020

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

### 10.5.1.2 Entwicklung der Tierbestände

Die Entwicklung der Tierbestände ist ein wesentlicher Emissionstreiber. Neben den hohen direkten Emissionen (Methan) aus der tierischen Verdauung und den Emissionen (Methan und Lachgas) der Exkremente aus Stall und Lager, führt auch der hohe Stickstoffeinsatz für die Erzeugung des Tierfutters zu hohen indirekten Emissionen. Daneben sind auch die Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzung der organischen Böden, vor allem auf Grünland<sup>95</sup>, vorrangig mit der Tierhaltung verbunden. Tabelle 111 zeigt die Entwicklung der Tierbestände im KIS-2030. Gegenüber 2018 sinken die Milchkuhbestände bis zum Jahr 2030 um 9 %, die Bestände der sonstigen Rinder um 12 % und die der Schweine um 8 %, während die Geflügelbestände um 3 % steigen. Bis zum Jahr 2040 sinken die Tierbestände weiter, u.a. durch eine weitere Verschärfung der Instrumente und die Einführung zusätzlicher Instrumente (insbesondere durch die fortschreitenden Vernässung der Moorstandorte und eine Bindung von Wiederkäuern an Grünlandfläche). Der Rückgang der Milchkuh-, Rinder- und Schweinebestände ist auf die Verschärfung der Wirtschaftsdüngerausbringung auf mineralischen Böden und auf Moorstandorten zurückzuführen. Darüber hinaus ist erwartbar, dass auch Marktentwicklungen zur weiteren Entwicklung der Tierbestände beitragen und sich der rückläufige Trend aus den letzten Jahren fortsetzen wird. Im Rahmen des KIS-2030 erfolgte hierzu aber keine weitere Betrachtung.

Bis zum Jahr 2030 steigen die Tierbestände, die im Ökolandbau gehalten werden, kontinuierlich an. Nach 2030 bleibt die absolute Zahl dieser Tiere konstant.

**Tabelle 111: Entwicklung der Tierbestände zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Anzahl in 1.000 bzw. 1.000 Stallplätze						
Milchkühe	6.355	4.236	4.101	3.875	3.739	3.664	3.589
davon: im Ökolandbau			226	381	535	535	535
Andere Rinder	13.133	8.800	7.848	7.270	6.912	6.784	6.656
davon: im Ökolandbau			635	956	1.277	1.277	1.277
Schweine (ohne Saugferkel)	26.502	22.743	22.019	21.110	20.200	19.291	18.381
davon: im Ökolandbau			232	348	464	464	464
Geflügel	113.879	120.560	175.200	177.921	180.176	180.176	180.176

<sup>95</sup> Ein Großteil davon wird im LULUCF-Sektor berichtet.

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
davon: im Ökolandbau			10.364	15.546	20.727	20.727	20.727
Pferde	499	508	429	439	441	441	441
Schafe und Ziegen	3.356	2.813	1.991	1.825	1.716	1.716	1.716

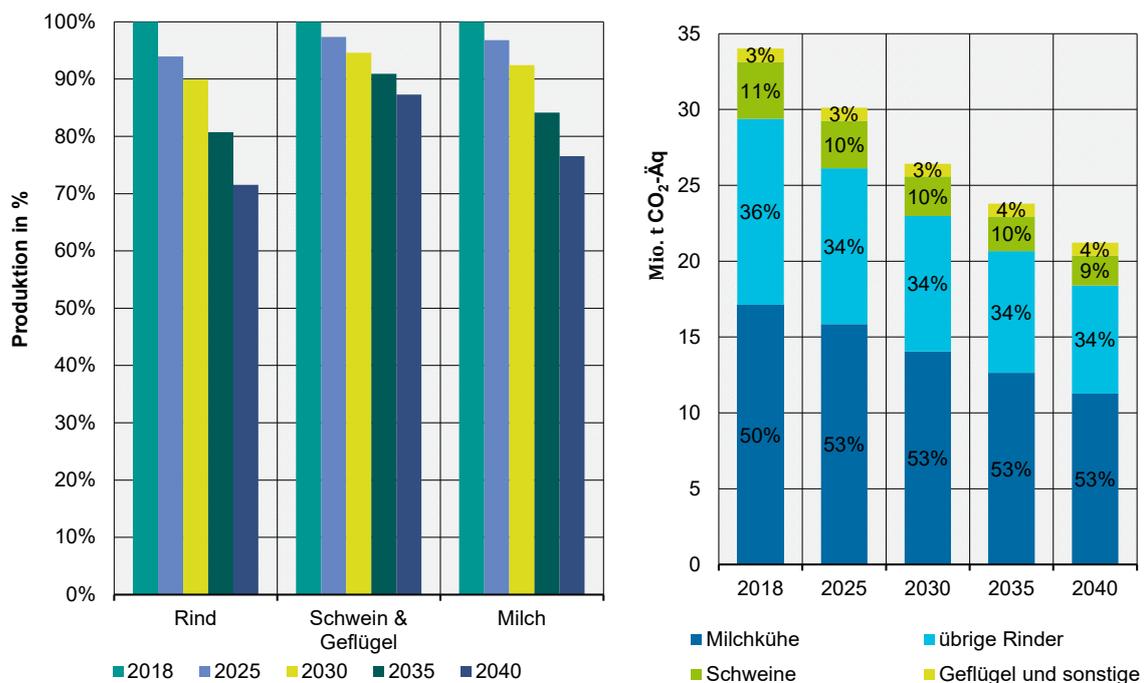
Anmerkung: Die Differenzierung für die Ökolandbau-Zahlen bezieht sich auf das Jahr 2020

Quelle: (UBA 2020c), Thünen-Baseline (Haß et al. 2020), Modellrechnungen Öko-Institut

Verbunden mit dem Rückgang der Tierbestände ist auch ein Rückgang der Produktion tierischer Produkte. Der Rückgang der Produktion folgt dabei insgesamt der Entwicklung der Tierbestände. Gleichzeitig kommt es aber auch zu einer Überlagerung mit der Zunahme der Ökotierhaltung, die durch eine geringere Milchleistung und geringere Zuwachsraten in der Mast charakterisiert ist. Vor allem bei der Milchproduktion führt die Ausweitung der Ökolandwirtschaft zu einer Stagnation und schließlich zu einem leichten Leistungsrückgang pro Tier im gesamten Bestand.

Emissionsseitig ist die Reduktion der Tierbestände für die Zielerreichung relevant. Allein die direkten Emissionen (CH<sub>4</sub> aus der Verdauung und N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> aus dem Wirtschaftsdüngermanagement) reduzieren sich bis 2030 um 6,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq ggü. 2018. 80 % der Emissionsreduktion ist dabei auf den Rückgang der Wiederkäuerbestände zurückzuführen (Abbildung 95).

**Abbildung 95: Entwicklung der Produktion tierischer Produkte und der direkten Treibhausgasemissionen aus der Tierhaltung nach Tierart, 2018 bis 2040**



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

Zur Vermeidung von Leakage-Effekten sind die produktionsseitigen Instrumente zwingend mit konsumseitigen Instrumenten zu ergänzen<sup>96</sup>. Denn während heute bei Milch und Schweinefleisch ein sehr hoher Selbstversorgungsgrad vorliegt (117 % und 125 %), werden Rind- und Geflügelfleisch angesichts der steigenden Nachfrage bereits zum Teil importiert (Selbstversorgungsgrad 95 % und 97 %), vergleiche BLE (2021). Das könnte kurzfristig die Rücknahme des verminderten Mehrwertsteuersatzes für Tierprodukte sein sowie mittelfristig die Einführung einer Treibhausgasbepreisung für Lebensmittel. Zusätzlich können aber auch Tierwohlmaßnahmen und eine verschärfte Stickstoffpolitik zu steigenden Verbraucherpreisen für tierische Lebensmittel führen. Wichtig ist es, dass die Preisaufschläge bzw. Teuerungsraten nicht nur die heimische Produktion treffen. Andernfalls führt die Verringerung der Produktion tierischer Produkte zu zusätzlichen Importen und die Verlagerung von Emissionen ins Ausland.

### 10.5.1.3 Entwicklung der Stickstoffeinsätze

Die Entwicklung des Stickstoffeinsatzes wird von der Flächenentwicklung, den Anbaukulturen, der Ertragsentwicklung, den Ökolandbau-Zielen und dem Umfang der unproduktiven Flächen beeinflusst. Bis zum Jahr 2030 sinken die Stickstoffeinträge durch die Reduktion des Tierbestands, dem Rückgang der Gärreste aus der Energiepflanzennutzung und der Verringerung des Mineraldüngereinsatzes um knapp 20 % ggü. 2018 (siehe Tabelle 112).

Zur Flächenentwicklung der Landwirtschaft im KIS-2030 müssen auch Änderungen der Landnutzung einbezogen werden (basierend auf der Modellierung des LULUCF-Modells). Das betrifft insbesondere die organischen Böden. Für die Erreichung des LULUCF-Sektorziels für das Jahr 2030 ist im KIS-2030 eine Wiedervernässung bzw. nasse Nutzung von ca. 20 % der landwirtschaftlich genutzten organischen Böden erforderlich.

**Tabelle 112: Entwicklung der Stickstoffeinsätze 1990 und 2040 im KIS-2030**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	1000 t Stickstoff						
Mineraldüngereinsatz	2.164	1.778	1.497	1.267	1.023	966	966
Wirtschaftsdüngereinsatz	1.183	978	1.013	933	909	836	762
Weideausscheidungen	219	154	144	112	109	106	103
Gärrückstände aus Energiepflanzen	0	46	299	250	141	134	128
Ernterückstände	486	588	503	603	599	587	578
<b>Gesamt Stickstoff</b>	<b>4.030</b>	<b>3.520</b>	<b>3.436</b>	<b>3.166</b>	<b>2.781</b>	<b>2.628</b>	<b>2.538</b>
Entwässerte organische Böden	1.244	1.246	1.219	1.114	967	753	575

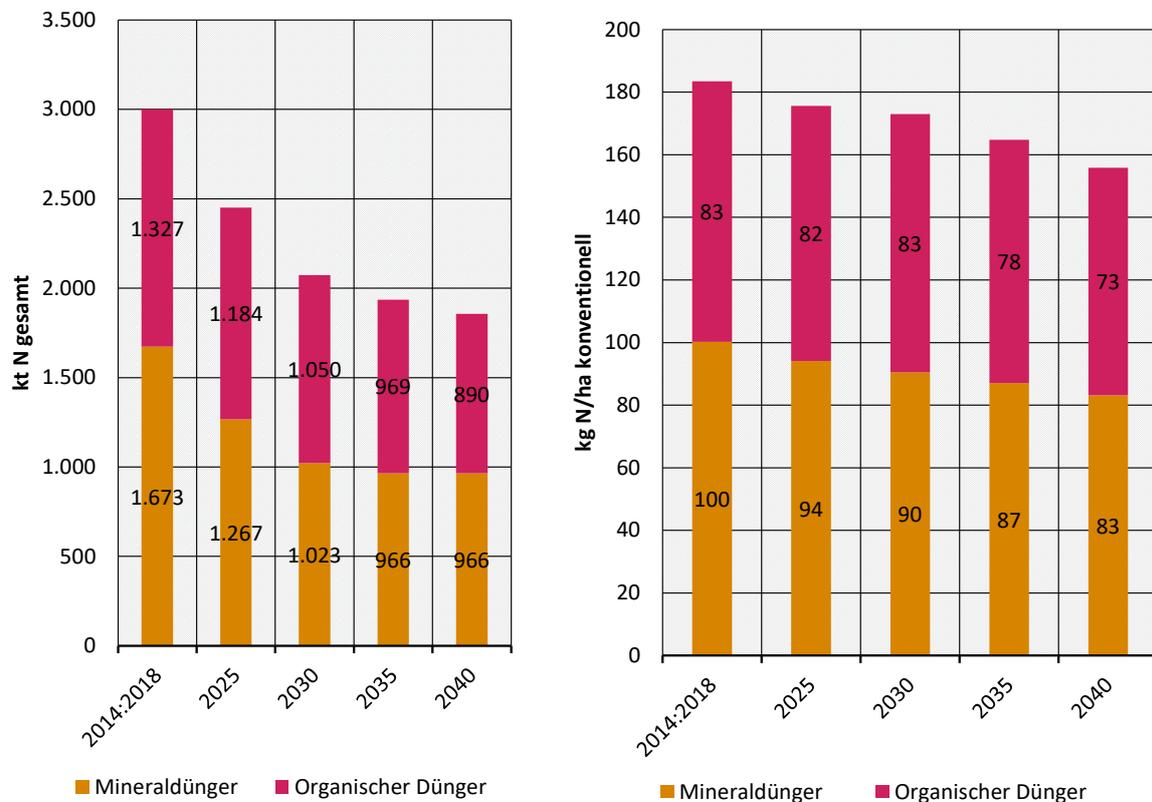
Quelle: (UBA 2020c), Thünen-Baseline (Haß et al. 2020), Modellrechnungen Öko-Institut

Auf der konventionellen Fläche reduziert sich der Stickstoffeinsatz aus Mineraldünger und organischem Dünger (Energiepflanzen und Wirtschaftsdüngerausbringung) um lediglich 6 % ggü. dem Mittel der Jahre 2014:2018 (siehe Abbildung 96). Hier wirkt u.a. die Ausweitung der unproduktiven Flächen und die Ausweitung des Leguminosenanbaus durch die Umsetzung der GLÖZ-Standards und der Öko-Regelungen in der neuen GAP-Förderperiode. Weiterhin wirken die Effekte der neuen DüV (u.a. Erhöhung der N-Wirksamkeit der Wirtschaftsdünger, Einsatz emissi-

<sup>96</sup> Konsumseitige Maßnahmen wurden im Rahmen des Vorhabens zwar benannt, aber nicht genauer betrachtet.

onsarmer Geräte zur Ausbringung des Wirtschaftsdüngers). Durch die erwartete Ertragszunahme im KIS-2030 wird ein Teil der Stickstoffreduktion aber durch die Erhöhung des Stickstoffbedarf der Kulturen wieder aufgehoben. Der gesamte Stickstoffeinsatz aus Mineraldünger und Wirtschaftsdünger sinkt bis 2030 aber wesentlich stärker. Dies ist vor allem auf die Ausweitung des Ökolandbaus, aber auch auf den Rückgang der landwirtschaftlichen Nutzfläche durch die Ausweitung von Infrastruktur und Siedlungen als auch auf die Wiedervernässung und veränderte Nutzung der organischen Böden als Paludikulturen zurückzuführen.

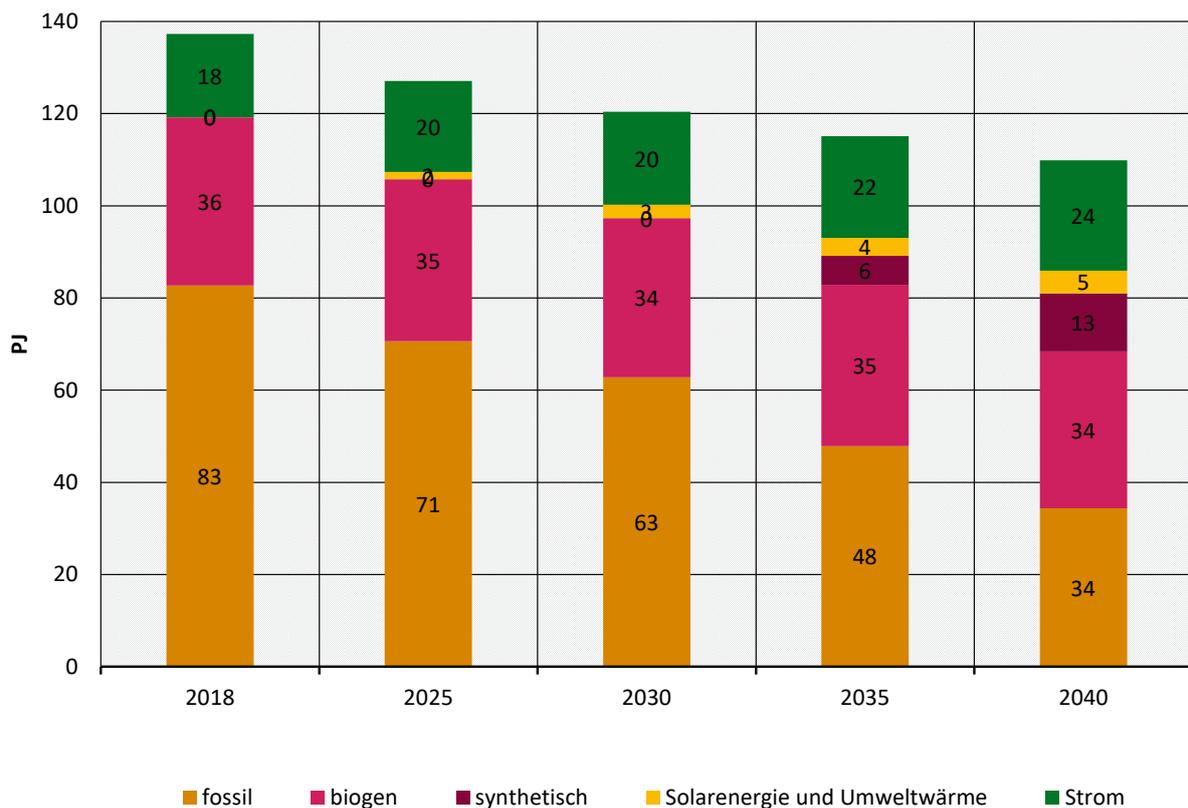
**Abbildung 96: Entwicklung des Stickstoffeinsatzes 2018 bis 2040**



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

#### 10.5.1.4 Entwicklung der energiebedingten Emissionen

Bis zum Jahr 2030 sinkt die Energienachfrage im Landwirtschaftssektor durch eine Ausweitung der Energieeffizienz, aber auch durch den zuvor beschriebenen Rückgang der Tierbestände und die Ausweitung von unproduktiven Flächen. Die Energienachfrage sinkt damit von 137 PJ im Jahr 2018 auf 120 PJ im Jahr 2030, was ca. 12 % entspricht. Durch die Fortführung der Instrumente können bis zum Jahr 2040 weitere 10 PJ ggü. 2030 eingespart werden. Gleichzeitig sinkt der Einsatz der fossilen Energieträger; der Anteil der regenerativen Energieträger und der Stromeinsatz steigen an (Abbildung 97).

**Abbildung 97: Entwicklung der Energienachfrage des Sektors Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**


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

Durch die Ausweitung der Energieeffizienz, den Rückgang der fossilen Energieträger und die Ausweitung der erneuerbaren Energien sinken die Emissionen der energiebedingten Treibhausgase bis zum Jahr 2030 gegenüber 2018 um ca. 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf 4,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Bis zum Jahr 2040 können die Emissionen um weitere 1,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq reduziert werden. Der Großteil der Emissionsreduktion erfolgt durch die Ausweitung der Energieeffizienz und dem Einsatz von erneuerbaren Energieträgern bzw. einem Wechsel zu Strom im Bereich der stationären Quellen. Im Bereich des mobilen Kraftstoffeinsatzes ist eine Emissionsreduktion schwieriger. Neben einer verbesserten Fahrweise, Effizienzgewinnen im Bereich der Motoren hängt die Emissionsreduktion vor allem an dem Einsatz von alternativen Kraftstoffen (Biokraftstoffe, Biomethan, PTL). Hier ist bis 2030 das Potenzial allerdings begrenzt, da vor allem der Verkehrssektor einschließlich dem Luft- und Schiffverkehr auf bestehende Potenziale zugreift.

**Tabelle 113: Entwicklung der energetischen Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Stationäre Quellen	6,0	2,4	1,8	1,4	1,0	0,7	0,6
Mobile Quellen	4,5	3,5	4,2	3,9	3,7	2,9	2,2
Fischerei	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Gesamt</b>	<b>10,6</b>	<b>5,9</b>	<b>6,2</b>	<b>5,3</b>	<b>4,7</b>	<b>3,7</b>	<b>2,8</b>

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

Anmerkung: Für die Zuordnung nach Klimaschutzgesetz werden die energiebedingten Emissionen aus der Wärmenutzung und dem Kraftstoffeinsatz hier berichtet. Die Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen sind in Anhang A.2 zu finden.

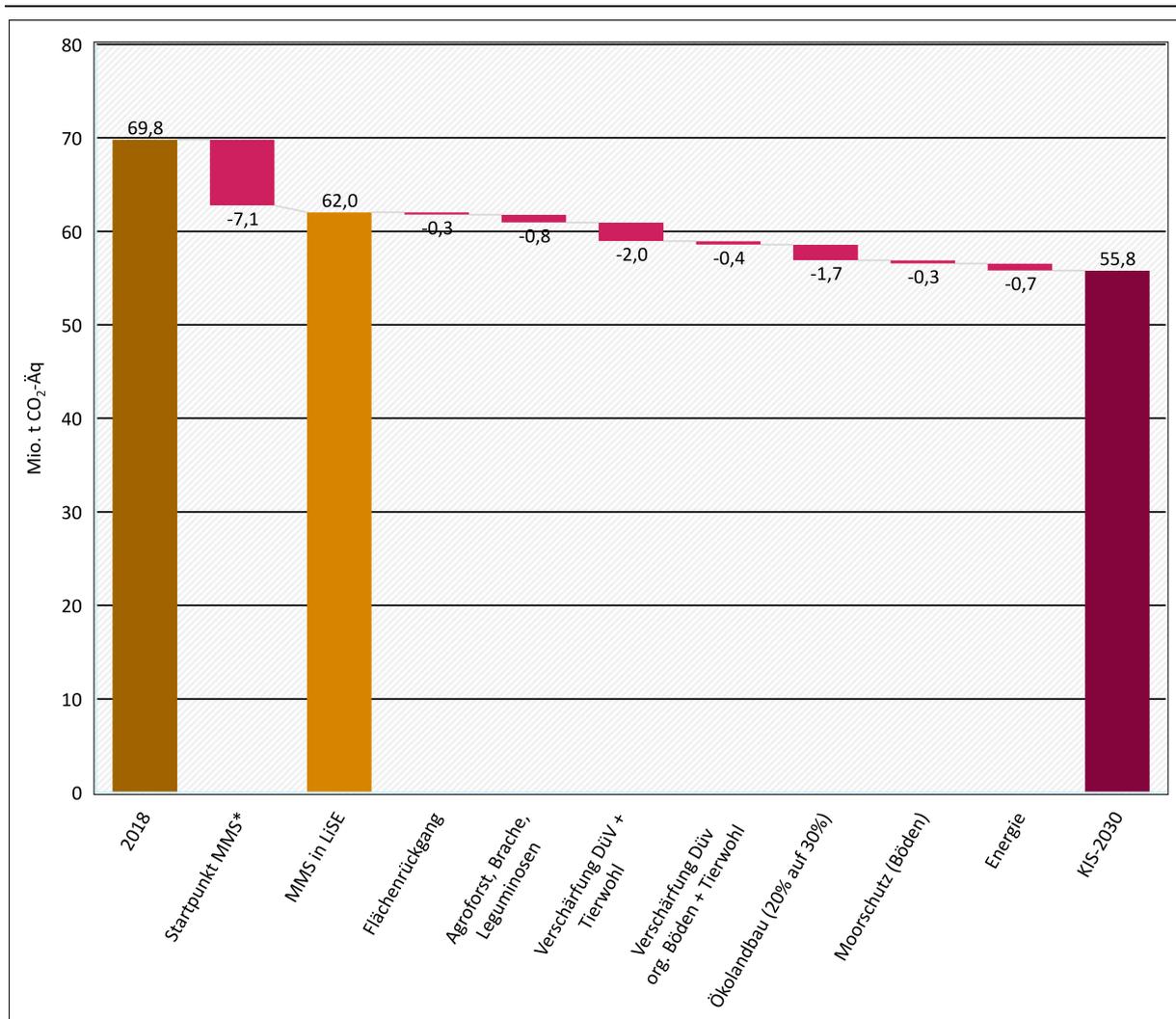
### 10.5.1.5 Treibhausgasminderungswirkung der zusätzlichen Instrumente

Um die Sektorziele des Landwirtschaftssektors im KIS-2030 zu erreichen, sind weitere Instrumente erforderlich, die über die Instrumente des MMS hinausgehen bzw. diese verschärfen. Abbildung 98 zeigt die Minderungswirkung der Instrumente die im KIS-2030 zur Zielerreichung führen. Wesentliche Instrumente sind die Verschärfung der DüV durch eine Reduktion der Wirtschaftsdüngerausbringungsobergrenze auf mineralischen und organischen Böden (2,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq) und die Ausweitung des Ökolandbaus (1,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq).

Neben der Verschärfung des bestehenden Ordnungsrechts (v.a. die DüV) müssen flankierend weitere Instrumente zur Umsetzung etabliert werden. Dabei ist vor allem auch finanzielle Förderung notwendig, die die Betriebe in die Lage versetzt, die mitunter weitreichenden Anpassungen vorzunehmen, mit denen (auch) die Ziele des Klimaschutzes abgesichert werden. Dazu zählen beispielsweise die in der Diskussion befindlichen Instrumente zum Tierwohl, die durch eine Knüpfung der Förderung an Tierbestandsdichten unterstützend wirken können. In Moorgebieten sind zusätzliche Instrumente nötig, um durch eine Wiedervernässung die hohen flächenspezifischen Emissionen zu reduzieren. Hier ist daher die Zahlung von „Flächenentlastungsprämien“ zu diskutieren, die eine Abstockung des Tierbestands und den Umstieg auf eine nasse Nutzung oder mitunter auch den kompletten Ausstieg von Betrieben zum Ziel haben könnten. Deren Wirkung ist im Modell stark von der Wirkung der DüV überlagert und deshalb hier nicht explizit ausgewiesen.

Mit der Umsetzung der neuen GAP in Kombination mit erhöhten Flächenzielen für Agroforstsysteme können Emissionen in Höhe von ca. 0,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq eingespart werden. Die zusätzlichen Agroforstflächen sind für die Zielerreichung des LULUCF-Sektors erforderlich. Weitere Emissionen in Höhe von ca. 0,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq können durch die Steigerung der Energieeffizienz und dem Ausbau des Einsatzes von erneuerbaren Energien im Bereich der Wärmenutzung und des Kraftstoffeinsatzes eingespart werden. Durch den Flächenrückgang und die Wiedervernässung von Moorstandorten können im Landwirtschaftssektor (N<sub>2</sub>O) in Summe ca. 0,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq eingespart werden. Der Großteil der Emissionen, die eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die verringerte Torfmineralisierung, fällt dabei in die Bilanz des LULUCF-Sektors.

Mit den dargestellten Instrumenten ist eine Minderungswirkung im KIS-2030 ggü. dem MMS von 6,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq zu erwarten. Damit können die KSG-Sektorziele 2030 erreicht werden.

**Abbildung 98: Minderungswirkungen der zusätzlichen Instrumente im KIS-2030 ggü. dem MMS, 2030**

Anmerkung: \*Startpunkt MMS bildet den Ausgangspunkt des Projektionsberichts 2021 (Mit-Maßnahmen-Szenario) mit dem Öko-Instituts-Landwirtschaftsmodell (LiSE) modelliert. Hier gibt es modellbedingte Abweichungen in Höhe von 1 % ggü. dem vom Thünen-Institut modellierten Mit-Maßnahmen-Szenario des Projektionsberichts 2021.

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

### 10.5.1.6 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Die folgende Tabelle zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen für den Sektor Landwirtschaft gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz (Quellgruppe 3 Landwirtschaft plus Teil-Quellgruppe 1.A.4.c Stationäre und mobile Feuerung in Land- und Forstwirtschaft und in der Fischerei) bis zum Jahr 2040.

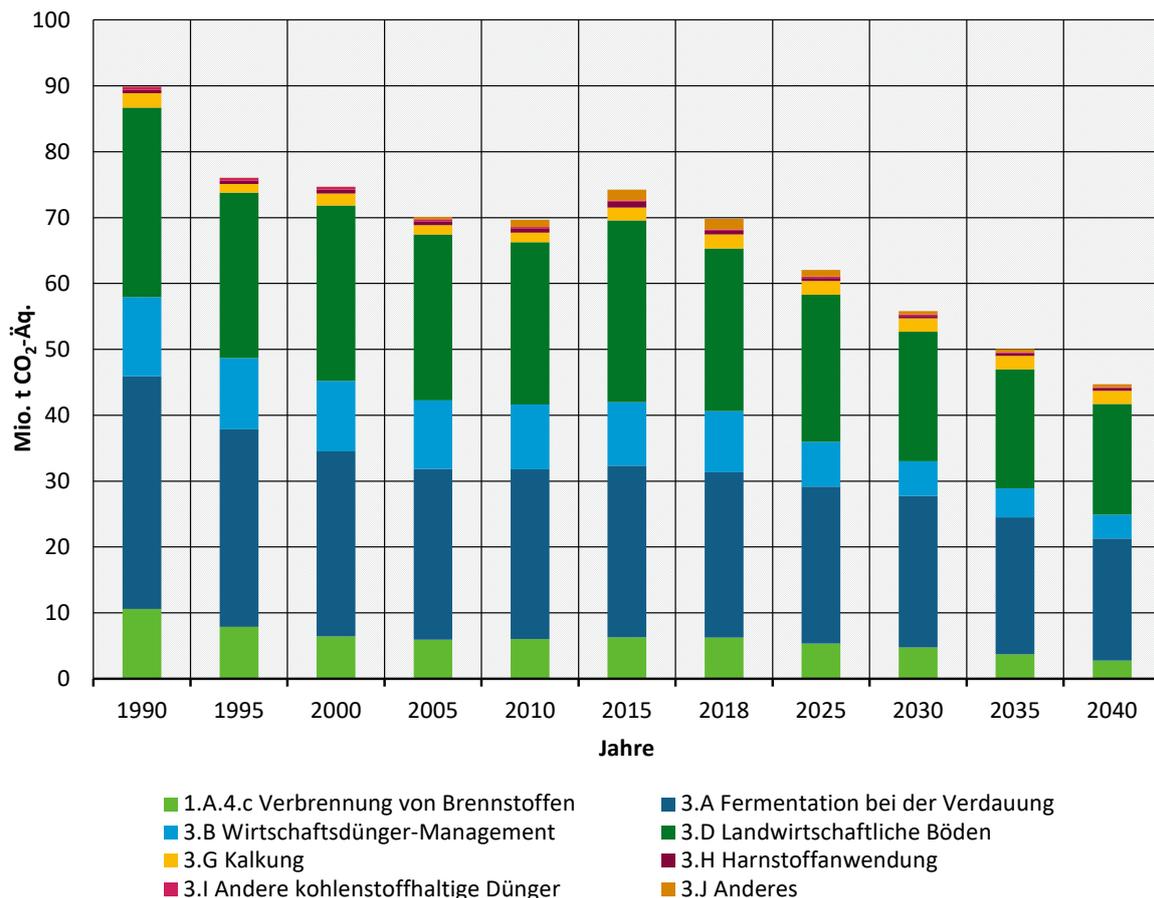
Mit den neu eingeführten Instrumenten im KIS-2030 und den bereits bestehenden Instrumenten des MMS sinken die Treibhausgase von 69,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2018 auf 55,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 (Tabelle 114 und Abbildung 99). Damit können die Sektorziele gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz sowohl 2025 als auch 2030 erreicht werden.

**Tabelle 114: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft nach Teil-Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Verbrennung von Brennstoffen (CRF 1.A.4.c)	6,2	5,8	5,7	5,6	5,5	5,3	5,2	5,1	5,0	4,8	4,8	3,7	2,8
Fermentation bei der Verdauung	25,1	23,9	23,9	23,9	23,8	23,8	23,7	23,5	23,3	23,2	23,0	20,8	18,5
Wirtschaftsdünger-Management	9,3	7,9	7,6	7,4	7,1	6,8	6,5	6,2	5,9	5,6	5,2	4,4	3,6
Landwirtschaftliche Böden	24,6	22,8	22,5	22,2	21,9	22,3	21,9	21,5	21,2	20,8	19,7	18,1	16,8
Kalkung	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0
Harnstoffanwendung	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
Andere kohlenstoffhaltige Dünger	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2
Anderes	1,6	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5
<b>Gesamt</b>	<b>69,8</b>	<b>64,4</b>	<b>63,5</b>	<b>62,7</b>	<b>61,9</b>	<b>62,0</b>	<b>60,8</b>	<b>59,7</b>	<b>58,6</b>	<b>57,5</b>	<b>55,8</b>	<b>50,1</b>	<b>44,7</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		68	67	66	65	63	62	61	59	57	56		
Abweichung vom Sektorziel		-3,6	-3,5	-3,3	-3,1	-1,0	-1,2	-1,3	-0,4	0,5	-0,2		

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

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

**Abbildung 99: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft nach Teil-Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

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

### 10.5.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Im Landwirtschaftssektor wurde keine BEHG-Sensitivität gerechnet, da das Modell keine Elastizitäten abbildet. Zudem machen die energiebedingten Emissionen aus der Landwirtschaft im Jahr 2030 des KIS-2030 nur 2,6 % der BEHG-Emissionen aus.

Die Emissionen der Landwirtschaft der Sensitivität sind entsprechend identisch zum KIS-2030 (Abschnitt 10.5.1).

### 10.5.3 MMS

Die Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft (inkl. Energie) gehen im MMS des Projektionsberichts 2021 bis 2030 insgesamt um 11 % gegenüber 2018 zurück (31 % ggü 1990), vergleiche Öko-Institut et al. (2021). Der größte Minderungsbeitrag entfällt dabei auf die Ausweitung der Güllevergärung und die gasdichte Lagerung der Gärreste. Weitere wichtige Treiber sind die verbesserte Stickstoffausnutzung sowie ein Rückgang des Einsatzes von Energiepflanzen für die Biogasproduktion. Damit gehen verringerte Ammoniakemissionen und verringerte Stickstoffeinsätze einher. Im Bereich der Energienutzung führt ein verringerter und effizienterer Einsatz von Brennstoffen zu einer weiteren Treibhausgasminderung. Im Tierbestand ist lediglich ein leichter Rückgang im Bestand von Milchkühen, Rindern und Schweinen zu verzeichnen, gleichzeitig steigt die Milchproduktion an, wodurch die Treibhausgasminderung aus der Bestandsreduktion etwas abgeschwächt wird.

Gegenüber dem Sektorziel aus dem KSG verbleibt im MMS eine Lücke<sup>97</sup> von 6,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq bestehen. Zwischen 2030 und 2040 werden im MMS keine nennenswerten Minderungen mehr erreicht. Der größte Minderungsbeitrag entsteht hier bei der Verbrennung von Brennstoffen, während alle anderen Quellgruppen als stagnierend angenommen werden (Tabelle 115).

**Tabelle 115: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft nach Teil-Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Verbrennung von Brennstoffen (CRF 1.A.4.c)	6,2	6,0	5,9	5,9	5,8	5,8	5,7	5,7	5,6	5,5	5,4	5,1	4,8
Fermentation bei der Verdauung	25,1	24,1	24,3	24,5	24,6	24,8	25,0	24,9	24,9	24,8	24,7	24,7	24,7
Wirtschaftsdünger-Management	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0	7,7	7,3	7,0	6,6	5,8	5,8	5,8
Landwirtschaftliche Böden	24,6	23,9	24,1	24,4	24,6	24,8	25,0	24,7	24,5	24,2	23,6	23,5	23,5
Kalkung	2,1	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Harnstoffanwendung	0,6	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Andere kohlenstoffhaltige Dünger	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anderes	1,6	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	0,9	0,8	0,8	0,7	0,5	0,5	0,5
<b>Gesamt</b>	<b>69,8</b>	<b>67,2</b>	<b>67,2</b>	<b>67,2</b>	<b>67,3</b>	<b>67,3</b>	<b>67,3</b>	<b>66,4</b>	<b>65,5</b>	<b>64,6</b>	<b>62,8</b>	<b>62,4</b>	<b>62,0</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		68	67	66	65	63	62	61	59	57	56		
Abweichung vom Sektorziel		-0,8	0,2	1,3	2,3	4,3	4,4	4,5	5,6	6,7	6,8		

Quelle: (Öko-Institut, et al. 2021, Tabelle )

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

#### 10.5.4 Vergleich der Szenarien

Im KIS-2030 werden die Sektorziele für die Landwirtschaft aus dem KSG erreicht. Damit ist im Jahr 2030 die Minderung doppelt so hoch wie im MMS (14 statt 7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq gegenüber 2018).

Die zusätzlichen Treibhausgasreduzierungen im KIS-2030 gehen auf die folgenden Veränderungen gegenüber dem MMS zurück. Die Beiträge beziehen sich dabei auf die Differenz zwischen den beiden Szenarien im Jahr 2030:

<sup>97</sup> Dieser Wert basiert auf der hier verwendeten Berechnungsmethode. Näheres zur geänderten Methode für die Berechnung der Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden im jüngsten Inventar ist im Methodenteil in Abschnitt 10.2 ausgeführt.

- ▶ Den größten Anteil hat eine zusätzliche Extensivierung der Landwirtschaft. Diese besteht aus einer zusätzlichen Ausweitung des Ökolandbaus von 20 auf 30 % der landwirtschaftlichen Fläche. Weiterhin nimmt die ungedüngte Fläche zu, einerseits durch eine Ausdehnung der ökologischen Vorrangflächen gegenüber dem MMS (sowie auch gegenüber 2018), andererseits durch die Etablierung von weniger stickstoffintensiven Agroforstsysteme und die Ausweitung des Leguminosenanbaus (ungedüngt). Zusätzlich führt ein besserer Moorschutz dazu, dass Ackerflächen auf Moorstandorten in extensiv genutztes Grünland umgewandelt und Moorgrünland wiedervernässt wird. Im Bereich der Düngung führt eine strengere Ausbringungsobergrenze für Wirtschaftsdünger und damit eine bessere Ausnutzung des Stickstoffs zu einer verbesserten N-Effizienz.  
In Bezug auf die Stickstoffverwendung gehen die Mengen im MMS weniger stark zurück als im KIS-2030 (2 % gegenüber 19 %). Dies liegt am höheren Wirtschaftsdüngeranfall angesichts der höheren Tierbestände im MMS, sowie an den höheren N-Frachten über die Erntereste, bedingt durch höhere Erträge im MMS. Hier kommt vor allem die Ertragsdifferenz im Ökolandbau in Kombination mit den unterschiedlich hohen Anteilen dieser Wirtschaftsweise in den zwei Szenarien zum Tragen. Insgesamt werden über diese Instrumente etwa weitere 4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq eingespart.
- ▶ Die strengeren Ausbringungsobergrenzen für Wirtschaftsdünger führen auch dazu, dass der Bestand von Milchkühen, Rindern und Schweinen im KIS-2030 gegenüber dem MMS im Jahr 2030 leicht rückläufig ist (7 % bei Milchkühen und Rinder, 6 % bei Schweinen). Das wirkt sich sowohl in Bezug auf die Emissionen aus der Verdauung als auch beim Wirtschaftdünger-Management aus. Hier werden im KIS-2030 2,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq weniger emittiert als im MMS.
- ▶ Durch eine umfangreichere Förderung von Energieeffizienz und -einsparung sowie die Förderung des Einsatzes erneuerbarer Energien werden weniger fossile Brennstoffe verbrannt. Das führt zu einer Einsparung von 0,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq ggü. dem MMS im Jahr 2030.

**Tabelle 116: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	13,5	8,1	8,8				
MMS				8,4	8,0	7,7	7,3
KIS-2030				7,8	7,1	6,0	5,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				7,8	7,1	6,0	5,0
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	43,7	33,2	32,8				
MMS				31,1	29,0	29,0	29,0
KIS-2030				29,3	26,9	24,0	21,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				29,3	26,9	24,0	21,2
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Entwicklung 1990 – 2018	32,7	28,8	28,2				
MMS				27,9	25,7	25,7	25,7
KIS-2030				24,9	21,8	20,0	18,5
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				24,9	21,8	20,0	18,5
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	89,9	70,1	69,8				
MMS				67,3	62,8	62,4	62,0
KIS-2030				62,0	55,8	50,1	44,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				62,0	55,8	50,1	44,7
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 1990 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018		-22,0	-22,3				
MMS				-25,1	-30,2	-30,6	-31,0
KIS-2030				-31,0	-37,9	-44,3	-50,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-31,0	-37,9	-44,3	-50,2
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 2005 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018			-0,4				
MMS				-4,0	-10,5	-11,0	-11,5
KIS-2030				-11,5	-20,4	-28,6	-36,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-11,5	-20,4	-28,6	-36,2

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für das MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für das KIS-2030

## 11 Abfallwirtschaft und Sonstiges

Mit der Zielverschärfung des KSG von 5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq auf 4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq muss auch der Abfallsektor bis zum Jahr 2030 weitere Minderungen erbringen. Durch eine Ausweitung und Intensivierung der bereits im MMS vorhandenen Instrumente wird das neue Ziel des Abfallsektors im KIS-2030 erreicht.

### 11.1 Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick

**Tabelle 117: Treibhausgas-Minderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, 2021-2030**

Szenario/Instrument	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq										
MMS	8,2	7,9	7,5	7,1	6,7	6,4	6,0	5,7	5,4	5,0
Förderprogramm zur Ausweitung der Deponiebelüftung und Optimierung der Gasfassung	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-0,9
Vermeidung von Lebensmittelabfällen	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
KIS-2030	8,1	7,7	7,2	6,8	6,3	5,8	5,4	4,9	4,5	4,0
KSG-Jahresemissionsmengen	9	8	8	7	7	6	6	5	5	4

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

### 11.2 Methodik

Die Berechnung des KIS-2030 erfolgt analog zum Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) mit dem Waste\_Mod-Modell des Öko-Instituts (siehe Anhang B.6.3). In dem modularen Abfallmodell werden alle Emissionskategorien der UNFCCC-Berichterstattung abgebildet.

### 11.3 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Für allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung wird auf den Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) verwiesen.

## 11.4 Instrumente und deren Parametrisierung

### 11.4.1 KIS-2030

#### 11.4.1.1 Ausweitung und Beschleunigung der Deponiebelüftung

Bei der Deponiebelüftung werden die Methanemissionen aus der Deponierung reduziert. Dabei wird Luft durch Leitungssysteme in den Deponiekörper eingetragen und damit das Methanbildungspotenzial verringert.

Im Rahmen der Kommunalrichtlinie wird die Deponiebelüftung zur Reduktion des Methanbildungspotenzials seit 2019 auch auf großen Deponien gefördert. Für den Zeitraum bis 2030 soll das Förderprogramm entsprechend finanziell ausgestattet werden, um möglichst viele Deponien schon vor 2030 mit Deponiebelüftungsmaßnahmen zu erfassen.

#### Parametrisierung

Im MMS wird angenommen, dass ab dem Jahr 2021 bis zum Jahr 2029 Projekte mit einem Minderungspotenzial von ca. 350.000 t CO<sub>2</sub>-Äq/a durchgeführt werden. Im KIS-2030 muss die Anzahl der Projekte erhöht werden. Um das neue Sektorziel von 4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq bis 2030 zu erreichen, muss die Zahl der Deponiebelüftungsprojekte ggü. dem MMS wesentlich verstärkt werden. Zur Zielerreichung müssen im Zeitraum 2021 bis 2029 Projekte mit einem Minderungspotenzial von ca. 800.000 t CO<sub>2</sub>-Äq durchgeführt werden. Bei einer jährlichen Minderung von ca. 50.000 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr entspräche das ca. 16 Projekten.

#### 11.4.1.2 Änderung der Deponieverordnung

Um bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen, muss auch das maximale Potenzial des Abfallsektors genutzt werden. Dafür sind vorrausichtlich auch nach 2030 noch Maßnahmen zur Deponiebelüftung notwendig. Sollten die in Abschnitt 11.4.1.1 geforderten Maßnahmen nicht im anvisierten Umfang umgesetzt werden, wird eine Verpflichtung zur Belüftung geeigneter Deponien in der Deponieverordnung festgeschrieben, um die in Abschnitt 11.4.1.1 gesetzten Ziele fristgerecht zu erreichen. Dies kann durch eine Änderung der Deponieverordnung und der verpflichtenden Einführung der Deponiebelüftung auf geeigneten Deponien erfolgen.

#### 11.4.1.3 Reduktion von Lebensmittelabfällen und -verlusten

Als sektorübergreifende Maßnahme wird im Klimaschutzprogramm 2030 die Reduktion der Lebensmittelabfälle genannt. Die Bundesregierung hat eine Nationale Strategie zur Reduzierung der Lebensmittelverschwendung beschlossen, mit dem Ziel, die Lebensmittelabfälle auf Einzelhandels- und Verbraucherebene bis 2030 zu halbieren. Während der Treibhausgasminderungseffekt dieser Maßnahme in anderen Sektoren schwer zu quantifizieren ist, wirkt diese Maßnahme direkt auf die Emissionen des Abfallsektors. Die Nationale Strategie setzt auf die Einbeziehung aller betroffenen Akteure entlang der Produktions- und Lieferkette und zunächst auf freiwillige Maßnahmen und Vereinbarungen. Je nach Erfolg dieser Maßnahmen könnten weitere Instrumente eingeführt werden. In Betracht kommen auch Instrumente, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette wirksam werden, wie z. B. die Abschaffung von gesetzlichen wie außergesetzlichen Handelsnormen (z. B. für Obst und Gemüse) oder ein Wegwerfverbot von unverkauften und weiterhin verzehrbaren Lebensmitteln im Einzelhandel.

#### Parametrisierung

Im MMS werden bis zum Jahr 2030 25 % der Lebensmittelabfälle aus dem Einzelhandel, den Haushalten und der Außer-Hausverpflegung vermieden, das entspricht 24 kg Lebensmittelabfälle pro Person. Eine Vermeidung von 50 % der Lebensmittelabfälle in diesen Sektoren sowie

die Vermeidung von Lebensmittelverlusten in den Sektoren Primärproduktion und Verarbeitung entsprechend der Ziele der Sustainable Development Goals (SDG 12.3) werden angestrebt. Für die Berechnung des KIS-2030 wird daher angenommen, dass von den insgesamt 12 Mio. t Lebensmittelabfällen bis zum Jahr 2040 50 % reduziert werden.

#### 11.4.2 MMS

Im zuvor veröffentlichten MMS des Projektionsberichts 2021 wurden die folgenden Instrumente berücksichtigt:

- a) Deponieverordnung
- b) Kreislaufwirtschaftsgesetz
- c) Förderung der Deponiebelüftung
- d) Förderung von Technologien zur optimierten Erfassung von Deponiegasen in Siedlungsabfällen
- e) Reduktion von Lebensmittelabfällen

Eine Beschreibung der Instrumente und Maßnahmen sowie deren Parametrisierung kann Öko-Institut et al. (2021) entnommen werden.

### 11.5 Ergebnisse

#### 11.5.1 KIS-2030

Wesentliche Minderungen werden im KIS-2030 durch die Ausweitung der Deponiebelüftung erzielt. Dadurch sinken die CH<sub>4</sub>-Emissionen gegenüber dem MMS weiter. Im Bereich der biologischen Abfallbehandlung und der Abwasserbehandlung sind nur noch geringe Emissionsminderungen möglich. Bis zum Jahr 2030 sinken die CH<sub>4</sub>-Emissionen ggü. 1990 um 91 %, bis 2030 können Minderungen von 95 % ggü. 1990 erzielt werden.

**Tabelle 118: Entwicklung der Methanemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 in kt CH<sub>4</sub>**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Ablagerung von Abfällen auf Deponierung	1.368	762	303	169	81	34	27
Biologische Abfallbehandlung	1,0	19	29	27	27	27	26
Abwasserbehandlung	106	30	22	21	21	21	20
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	NO, NE	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Gesamte Methanemissionen</b>	<b>1475</b>	<b>812</b>	<b>354</b>	<b>218</b>	<b>129</b>	<b>81</b>	<b>73</b>
ggü. 1990 in %		-44,9	-76,0	-85,2	-91,2	-94,5	-95,0
ggü. 2005 in %			-56,4	-73,1	-84,1	-90,1	-91,0

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

Die Reduktion der Lachgasemissionen fällt dagegen etwas geringer aus, obwohl auch hier ggü. 1990 wesentliche Minderungen durch Verbesserungen in der Abwasserbehandlung stattfanden.

Weiteres Minderungspotenzial im Bereich der N<sub>2</sub>O-Emissionen ist allerdings begrenzt, da technische Standards in der Abfall- und Abwasserbehandlung in Deutschland schon auf einem hohen Niveau sind. Ggü. 1990 sinken die N<sub>2</sub>O-Emissionen bis zum Jahr 2030 um 43 %, bis 2040 um 45 %.

**Tabelle 119: Entwicklung der Lachgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 in kt N<sub>2</sub>O**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Biologische Abfallbehandlung	0,1	0,8	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9
Abwasserbehandlung	4,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	NO, NE	0,9	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Gesamte Lachgasemissionen</b>	<b>4,8</b>	<b>3,3</b>	<b>3,0</b>	<b>2,8</b>	<b>2,7</b>	<b>2,7</b>	<b>2,6</b>
ggü. 1990 in %		-30,7	-38,8	-41,6	-43,3	-44,1	-45,2
ggü. 2005 in %			-11,7	-15,7	-18,1	-19,4	-20,9

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

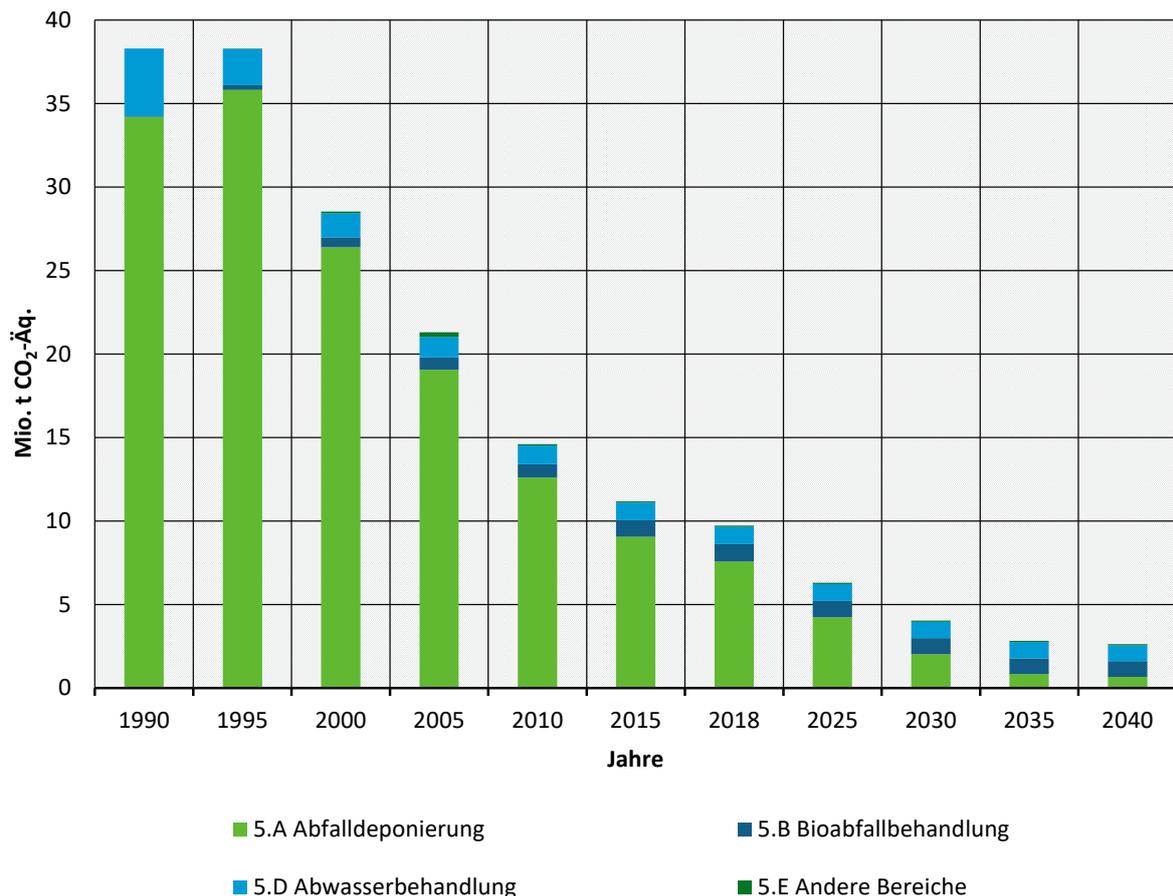
Die Gesamtemissionen des Abfallsektors werden von den CH<sub>4</sub>-Emissionen aus der Ablagerung von Abfällen auf Deponien dominiert. Folglich ist die Reduktion dieser Emissionen auch der stärkste Treiber für die Zielerreichung des Klimaschutzgesetzes bis 2030. Während die Emissionen der anderen Abfallbehandlungen und der Abwasserbehandlung nahezu konstant bleiben, sinken die Emissionen aus der Deponierung erheblich. Damit kann das Ziel des Klimaschutzgesetzes in Höhe von 4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq bis 2030 erreicht werden. Bis zum Jahr 2040 sinken die Emissionen aus dem Abfallsektor auf 2,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

**Tabelle 120: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Ablagerung von Abfällen auf Deponierung	7,6	6,0	5,6	5,1	4,7	4,2	3,8	3,3	2,9	2,5	2,0	0,8	0,7
Biologische Abfallbehandlung	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
Abwasserbehandlung	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Gesamt</b>	<b>9,7</b>	<b>8,1</b>	<b>7,7</b>	<b>7,2</b>	<b>6,8</b>	<b>6,3</b>	<b>5,8</b>	<b>5,4</b>	<b>4,9</b>	<b>4,5</b>	<b>4,0</b>	<b>2,8</b>	<b>2,6</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		9	8	8	7	7	6	6	5	5	4		
Abweichung vom Sektorziel		-0,9	-0,3	-0,8	-0,2	-0,7	-0,2	-0,6	-0,1	-0,5	0,0		

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

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

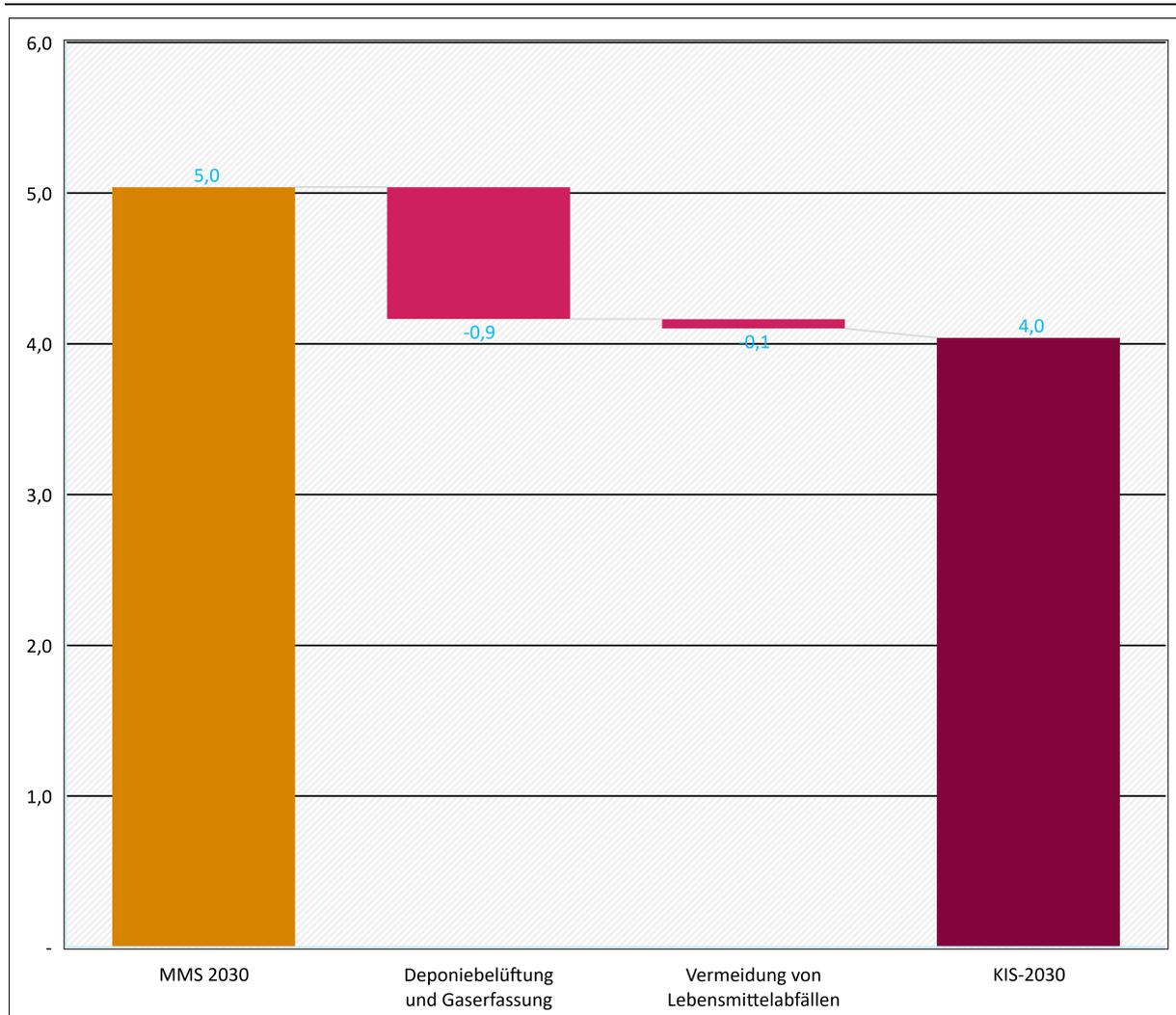
**Abbildung 100: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

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

### Minderungswirkungen der zusätzlichen Instrumente

Wesentliche Minderungen können im Abfallsektor über die Reduktion der CH<sub>4</sub>-Emissionen aus der Deponierung erzielt werden. Neben der Deponiebelüftung ist auch die Ausweitung der optimierten Gaserfassung als Instrument im Maßnahmenprogramm 2030 enthalten. Der Großteil der erforderlichen zusätzlichen Minderungen für die Erreichung der Klimaziele im Abfallsektor wird über eine Intensivierung dieser Maßnahmen erzielt (Abbildung 101). Die wesentlichen Emissionsreduktion im Bereich des Abfallsektors werden damit durch die Behandlung von alten Abfällen, die vor 2005 auf Deponien abgelagert wurden, erzielt. Im Bereich des heutigen Abfallaufkommens und der Abwasserbehandlung sind die Minderungsoptionen begrenzt, da die technische Abfallbehandlung in Deutschland bereits auf einem hohen Niveau ist.<sup>98</sup> Allerdings besteht im Bereich der Abfallvermeidung weiteres Reduktionspotenzial, was auch in diesem Sektor sichtbar wird. Dazu zählt in erster Linie die Vermeidung von Lebensmittelabfällen. Durch eine Reduktion des Abfallaufkommens sinken auch die Emissionen aus der Abfallbehandlung vor allem bei der Vergärung.

<sup>98</sup> Die Bereiche der Abfallverbrennung und des Recycling werden in der Energiewirtschaft und in der Industrie berücksichtigt und sind für den Abfallsektor nach der Zuordnung der Treibhausgasinventarlogik nicht relevant.

**Abbildung 101: Minderungswirkungen der zusätzlichen Instrumente im KIS-2030 im Abfallsektor ggü. dem MMS, 2030**

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

### 11.5.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Für den Abfallsektor wurde keine BEHG-Sensitivität gerechnet. Die Ergebnistabellen sind daher identisch mit den Ergebnissen des KIS-2030.

### 11.5.3 MMS

Im MMS sinken die Treibhausgasemissionen bis 2030 auf 5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Damit wird das Sektorziel 2030 um 1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq überschritten. Gegenüber 1990 werden bis 2030 bereits wesentliche Treibhausgasreduktionen erreicht. Dies lässt sich vor allem auf das Verbot der Ablagerung von organischen Abfällen auf Deponien ab 2005 zurückführen als auch eine Optimierung der Abwasserbehandlung in den 90er Jahren.

**Tabelle 121: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Ablagerung von Abfällen auf Deponierung	7,6	6,1	5,7	5,3	4,9	4,6	4,2	3,9	3,5	3,2	2,9	1,8	1,3
Biologische Abfallbehandlung	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Abwasserbehandlung	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Gesamt</b>	<b>9,7</b>	<b>8,2</b>	<b>7,9</b>	<b>7,5</b>	<b>7,1</b>	<b>6,7</b>	<b>6,4</b>	<b>6,0</b>	<b>5,7</b>	<b>5,4</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,4</b>
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		9	8	8	7	7	6	6	5	5	4		
Abweichung vom Sektorziel		-0,8	-0,1	-0,5	0,1	-0,3	0,4	0,0	0,7	0,4	1,0		

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut, et al.)

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

#### 11.5.4 Vergleich der Szenarien

Tabelle 122 zeigt die Treibhausgasemissionen des Abfallsektors im Vergleich der Szenarien. Die größten Unterschiede treten bei den CH<sub>4</sub>-Emissionen auf. Im Jahr 2030 liegen die CH<sub>4</sub>-Emissionen im KIS-2030 um 1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (24 %) unter den CH<sub>4</sub>-Emissionen des MMS.

Bei den N<sub>2</sub>O-Emissionen bestehen dagegen nur geringe Unterschiede zwischen den Szenarien. Insgesamt wird im MMS im Jahr 2030 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 86,8 % gegenüber 1990 erreicht; im KIS-2030 beträgt diese Reduktion 89,4 %.

**Tabelle 122: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	36,9	20,3	8,8				
MMS				5,9	4,2	3,1	2,5
KIS-2030				5,5	3,2	2,0	1,8
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				5,5	3,2	2,0	1,8
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	1,4	1,0	0,9				

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
MMS				0,9	0,9	0,9	0,9
KIS-2030				0,8	0,8	0,8	0,8
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,8	0,8	0,8	0,8
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	38,3	21,3	9,7				
MMS				6,7	5,0	4,0	3,4
KIS-2030				6,3	4,0	2,8	2,6
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				6,3	4,0	2,8	2,6
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 1990 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018		-44,4	-74,6				
MMS				-82,4	-86,8	-89,7	-91,2
KIS-2030				-83,6	-89,4	-92,6	-93,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-83,6	-89,4	-92,6	-93,2
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>	<b>Veränderung ab 2005 in %</b>						
Entwicklung 1990 – 2018			-54,3	-68,4	-76,3	-81,5	-84,1
MMS				-70,4	-81,0	-86,8	-87,7
KIS-2030				-68,4	-76,3	-81,5	-84,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-68,4	-76,3	-81,5	-84,1

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030

## 12 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)

In diesem Berichtsteil werden Ausschnitte aus dem Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) übernommen. Da der LULUCF-Sektor in Projektionsbericht 2021 vom Thünen-Institut ausgearbeitet wurde, werden die entsprechenden Stellen als Zitate markiert.

### 12.1 Instrumentenwirkung des KIS-2030 im Überblick sowie Auswirkungen methodischer Änderungen

**Tabelle 123: Auswirkungen methodischer Änderungen gegenüber MMS, 2025 und 2030**

Maßnahme	2025	2030
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq		
MMS (Projektionsbericht 2021)	16,9	22,3
Methodenwechsel: Abbildung MMS in FABio-Land (inkl. Übernahme der Ergebnisse zum Waldmodell und zu Holzprodukten)	-1,5	-1,4
Methodenwechsel: Waldmodellierung und Holzprodukte	-28,6	-39,6
MMS (nach Methodenwechsel)	-13,2	-18,7

Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut

Anmerkungen: Siehe Details zum Methodenwechsel in Abschnitt 12.2.

**Tabelle 124: Treibhausgasminderungswirkung der Instrumente des KIS-2030 gegenüber MMS, 2025 und 2030**

Maßnahme	2025	2030
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq		
MMS (nach Methodenwechsel)	-13,2	-18,7
Erhalt von Dauergrünland	0,0	0,0
Mehr Moorbodenschutz	-1,1	-2,3
Humusaufbau (Agroforst, Kurzumtriebsplantagen)	-2,0	-3,9
Siedlungsflächen: Netto-Flächenneuanspruchnahme verringern	-0,1	-0,2
KIS-2030	-16,4	-25,1
KSG-Ziel	Keine Angaben	-25,0

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Anmerkungen: Moorbodenschutz umfasst den Moorbodenschutz auf landwirtschaftlichen Flächen, die Einstellung des Torfabbaus (in Kombination mit der Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten) sowie die Optimierung bestehender Feuchtgebiete.

**Tabelle 125: Ziele für die Treibhausgasbilanz im LULUCF-Sektor im Bundes-Klimaschutzgesetz**

Maßnahme	2030	2040	2045
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq			
LULUCF-Ziele im Bundes-Klimaschutzgesetz	-25,0	-35,0	-40,0

Quelle: Bundes-Klimaschutzgesetz

## 12.2 Methodik

Im KIS-2030 wurde der LULUCF-Sektor vom Öko-Institut und im MMS im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) von Thünen-Institut modelliert. Im Folgenden wird die Modellierung im KIS-2030 beschrieben und auf Unterschiede zur Modellierung im MMS hingewiesen. Es ist zu betonen, dass aufgrund methodischer Änderungen das MMS und das KIS-2030 nur eingeschränkt vergleichbar sind.

### 12.2.1 LULUCF-Modellierung

Die Flächenentwicklungen im LULUCF-Sektor sowie Emissionsquellen und -senken werden mit dem LULUCF-Modell FABio-Land<sup>99</sup> des Öko-Instituts modelliert. In FABio-Land sind alle Landnutzungskategorien abgebildet, die in der deutschen Berichterstattung berücksichtigt sind: Wald, Ackerland, Grünland, Gehölze (Hecken etc.), terrestrische Feuchtgebiete, Gewässer, Torfabbau, Siedlung und sonstige Flächen. Die Flächen werden nach mineralischen und organischen Böden, sowie neuen Flächen (Übergangszeit 20 Jahre) und bestehenden Flächen (älter als 20 Jahre) differenziert. Zudem ist in FABio-Land die Flächenkategorie „Wiedervernässte Moorstandorte“ aufgenommen. Hier können für Acker- und Grünland auf organischen Böden und für Torfabbauflächen unterschiedliche Vernässungsintensitäten über Wasserstufen (mäßig feuchtes Moorgrünland (WS 2) bis nasses Moorgrünland (WS 5)) eingestellt werden. Eine Nutzung der vernässten Flächen ist möglich (z. B. Paludikultur). Außerdem wird die Flächenkategorie „Kurzumtriebsplantage“ unterschieden. Als weitere Kategorie werden Holzprodukte ausgewiesen.

Die historischen Emissionsfaktoren zu den Flächenkategorien stammen aus den CRF-Tabellen (UBA 2020c, Submission 2020) und Flächenänderungskoeffizienten vom Thünen-Institut<sup>100</sup>. Für die Flächenkategorie wiedervernässte Moorstandorte werden die Emissionskoeffizienten je Wasserstufe aus (Reichelt und Lechtape 2019) angenommen.<sup>101</sup>

Als Ausgangspunkt wird die historische Entwicklung der Flächennutzung (Flächenänderungskoeffizienten) und der zugehörigen Emissionen je Flächenkategorie (Emissionsfaktoren) in Deutschland fortgeschrieben. Dabei hat sich für die Emissionsfaktoren in bisherigen Arbeiten der Mittelwert der letzten fünf Jahre als sinnvoller Kompromiss zwischen der Nutzung aktueller Daten und der Vermeidung einer hohen Variabilität erwiesen. Berechnungen in FABio-Land erfolgen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr und reichen bis zum Jahr 2050. Um die Auswirkung von Maßnahmen in Szenarien zu modellieren, können auf dieser Basis durch ein Steuerungsmodul die Flächenänderungen einzelner Flächenkategorien angesteuert werden (z. B. Umbruchverbot für Grünland, anteilige Wiedervernässung von Ackerland auf organischen Böden). Zudem besteht die Möglichkeit, Emissionsfaktoren über die Zeitachse zu verändern (z. B. Änderung der Waldbewirtschaftung ohne Flächenumwandlung).

<sup>99</sup> FABio = Forestry and Agriculture Biomass Model.

<sup>100</sup> Nicht veröffentlichte Daten des Thünen-Instituts mit einer jährlichen Auflösung. Diese Daten sind notwendig, da in den CRF-Tabellen die Flächenänderungen für neue Flächen nur als 20-jähriges Mittel ausgewiesen werden.

<sup>101</sup> In diesen Emissionskoeffizienten sind N<sub>2</sub>O-Emissionen nicht erfasst.

Emissionen für die lebende Biomasse der Waldfläche<sup>102</sup> und für langlebige Produkte werden nicht direkt in FABio-Land modelliert, sondern über eine Schnittstelle können Ergebnisse aus externen Modellen eingelesen werden (z. B. WEHAM des Thünen-Instituts, SIFOP, FABio-Forest). In KIS-2030 werden Ergebnisse aus SIFOP (s. u.) in die LULUCF-Modellierung integriert. Die Treibhausgasbilanz von Holzprodukten kann ebenfalls aus einer externen Quelle eingelesen oder direkt in FABio-Land fortgeschrieben werden.

Eine zweite Schnittstelle übergibt Daten zur Flächenentwicklung von Ackerland, Grünland und vernässten Flächen an das Agrarmodell LiSE (siehe Abschnitt 10.2), um so eine Konsistenz zwischen den beiden Modellen zu gewährleisten.

Als wichtigste Ausgabeparameter von FABio-Land sind zu nennen:

- ▶ Flächenkulisse und Flächenänderungen (Mio. ha je Flächenkategorie),
- ▶ Treibhausgasemissionen (Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq je Flächenkategorie).

Im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) wird der LULUCF-Sektor im MMS mit den Modellierungstools des Thünen-Instituts abgebildet.

### 12.2.2 Wald-Modellierung

In Hennenberg et al. (2021) wird das Fortschreibungstool "simple forest projection tool" (SIFOP) entwickelt. Mit SIFOP kann die Entwicklung der Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse der Waldfläche in Abhängigkeit von der Holzentnahme und von Annahmen zur Intensität von Waldschäden fortgeschrieben werden.

SIFOP baut auf das aktuelle Treibhausgasinventar aus dem Jahr 2021 (UBA 2021a) auf, in dem als methodische Weiterentwicklung die Emissionen der lebenden Biomasse der Waldfläche mit dem Holzeinschlag in einen Zusammenhang gestellt wird. In Abbildung 102 ist die zeitliche Entwicklung des Holzeinschlags und der Senkenleistung der lebenden Biomasse der Waldfläche für den Zeitraum von 2002 bis 2007 mit starken Schäden (2002 Orkan Janette, 2003 Dürre, 2007 Orkan Kyrill) und von 2008 bis 2017 mit geringeren Schäden dargestellt. Der Begriff „Schäden“ umfasst Schäden durch Windwurf, Käferkalamitäten und Trockenheit, aber auch Wachstumsdepressionen aufgrund ungünstiger Witterungsbedingungen. Wird die Senkenleistung der lebenden Biomasse der Waldfläche gegen den Holzeinschlag aufgetragen, zeigt sich für beide Zeiträume ein starker linearer Zusammenhang, der aus der angewandten Methode im Treibhausgasinventar resultiert.

Mit diesem aus historisch berichteten Daten abgeleiteten Zusammenhang kann die Senkenleistung der lebenden Biomasse auf der Waldfläche in Abhängigkeit von Holzeinschlag und angenommenen Schäden geschätzt werden (Abbildung 102): Wird mehr Holz eingeschlagen, verringert sich die Senkenleistung der Waldfläche. Wird weniger Holz eingeschlagen, steigt die Senkenleistung der Waldfläche. Zudem zeigt sich, dass in dem Zeitraum mit starken Schäden die generelle Senkenleistung der lebenden Biomasse der Waldfläche geringer ist als in dem Zeitraum mit geringen Schäden. Aus diesem Zusammenhang werden Schadenssituationen abgebildet und in SIFOP integriert:

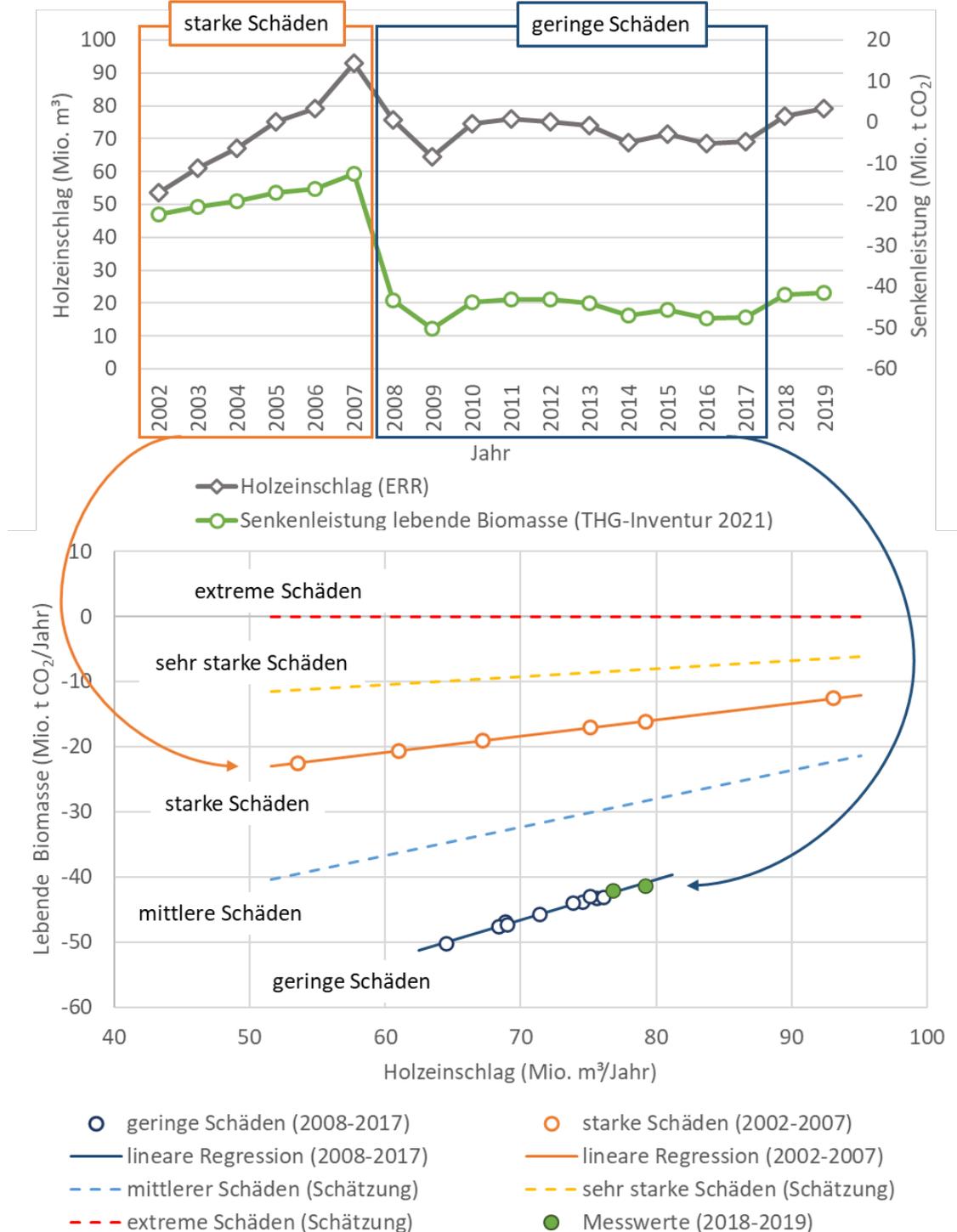
- ▶ In Jahren mit geringen Schäden kann eine hohe Senkenleistung der lebenden Biomasse auf der Waldfläche erwartet werden (Datenbasis 2008 bis 2017).

<sup>102</sup> Alle übrigen Emissionsfaktoren wie für Boden, Totholz und Streu werden auf Basis der historischen Entwicklung fortgeschrieben.

- ▶ Mittlere Schäden: Es wird eine Intensität der Schäden angenommen, die im Mittel zwischen der Situation von geringen und starken Schäden liegt (eigene hypothetische Annahme).
- ▶ In Jahren mit starken Schäden ist die zu erwartende Senkenleistung der lebenden Biomasse auf der Waldfläche deutlich geringer (Datenbasis 2002 bis 2007).
- ▶ Sehr starke Schäden: Es wird eine Situation angenommen, die durch stärkere Schäden als in den Jahren 2002 bis 2007 geprägt ist, aber noch eine geringe Senkenleistung erreicht (eigene hypothetische Annahme).
- ▶ Extreme Schäden: Es wird angenommen, dass extreme Schäden dazu führen, dass die lebende Biomasse keine Senkenleistung erbringt (eigene hypothetische Annahme).

Für die Jahre 2018 und 2019 wurden im Treibhausgasinventar aus dem Jahr 2021 (UBA 2021a und CRF-Tabellen) eine Senkenleistung entsprechend des Zusammenhangs in den Jahren 2008-2017 zugeordnet, da die Daten der Bundeswaldinventur 4 (BW-4) noch nicht vorliegen. Es ist aber zu erwarten, dass die Werte aufgrund der sehr starken Schäden (Trockenheit, Sturm, Käferkalamitäten) in den Jahren 2018 bis 2020 deutlich korrigiert werden. Wo im Zeitraum 2018 bis 2022 die Senkenleistung tatsächlich liegen wird, ist deshalb unklar. Mit Ergebnissen der Auswertung der BWI 4 ist frühestens ab dem Jahr 2023 zu rechnen. Aus diesem Grund wurden die Jahre 2018 und 2019 nicht in die Korrelation zu geringen Schäden berücksichtigt.

**Abbildung 102: Zusammenhang zwischen Holzeinschlag und Änderungen der lebenden Biomasse auf der Waldfläche ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Emissionen**



Quelle: Darstellung in Hennenberg et al. (2021). Holzeinschlag 2002 bis 2019 nach Jochem et al. (2020); Treibhausgasemissionen der lebenden Biomasse auf der Waldfläche nach Treibhausgasinventar-Submission 2021 (UBA 2021a und CRF-Tabellen). ERR = Einschlagsrückrechnung.

Geradengleichungen:

- geringe Schäden:  $y = 0,621 x - 89,82$
- mittlere Schäden:  $y = 0,436 x - 62,74$
- starke Schäden:  $y = 0,251 x - 35,94$
- sehr starke Schäden:  $y = 0,125 x - 18,08$
- extreme Schäden:  $y = 0$

Die Fortschreibung in SIFOP berücksichtigt keine räumlichen Unterschiede in Deutschland und auch keine dynamische Veränderung der Waldbestände entlang der Zeitachse. Durch diese vereinfachten Annahmen nimmt die Unsicherheit der Fortschreibung entlang der Zeitachse zu und SIFOP sollte nicht für eine Fortschreibung über das Jahr 2050 hinaus verwendet werden. Gegenüber anderen Modellen (z. B. WEHAM oder FABio-Forest) besteht aber in SIFOP der Vorteil, dass die Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse der Waldfläche für unterschiedliche Schadniveaus und in Abhängigkeit des Holzeinschlags fortgeschrieben werden kann (siehe Hennenberg et al. 2021).

### 12.2.3 Vergleich zur Methode der Modellierung im MMS

Im MMS wurde vom Thünen-Institut für den LULUCF-Sektor eine Fortschreibungsmethode verwendet, die ebenfalls auf den historischen Daten aus den Treibhausgasinventaren aufbaut. Für die Fortschreibung der Treibhausgasbilanz der Waldfläche werden vom Thünen-Institut Ergebnisse aus dem WEHAM-Modell herangezogen (siehe Details in Öko-Institut et al. (2021)).

Im Grundzug ist FABio-Land mit der Methode des Thünen-Instituts vergleichbar. Da die Methode des Thünen-Instituts aber auf regional hoch aufgelöste Daten zugreift, in FABio-Land hingegen mit deutschlandweiten Mittelwerten modelliert wird, können Unterschiede in den Ergebnissen der Modelle auftreten. Zur Abschätzung möglicher Abweichungen wurde das MMS anhand der Angaben im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) in FABio-Land parametrisiert. Dabei wurde für den Wald das WEHAM-Basiszenario eingebunden. Der Vergleich zeigt, dass in FABio-Land die Treibhausgasbilanz im Jahr 2030 um -1,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq von den Berechnungen des Thünen-Instituts abweicht (Abbildung 107 in Abschnitt 12.5.4).

Im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) werden für die Modellierung des Waldes deutliche methodische Herausforderungen herausgestellt:

*„Die Berichterstattung für den Sektor LULUCF im Waldbereich wurde für den Inventarbericht 2021 verbessert. Entsprechende Änderungen konnten für diesen Projektionsbericht noch nicht übernommen werden und sind mit Vorlage des nächsten Projektionsberichtes beabsichtigt. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Waldentwicklung gemäß den Inventardaten von der projizierten Entwicklung zurückliegender Projektionsberichte abweicht. Die Senkenleistung des Waldes und somit des gesamten LULUCF-Sektors war erheblich niedriger projiziert worden als in der Kohlenstoffinventur 2017 festgestellt. Dies ist u.a. methodisch bedingt. Eine Überprüfung der zugrunde gelegten Annahmen und Szenarien sowie die Anpassung und Weiterentwicklung der Modellierungswerkzeuge für den Wald ist für den nächsten Bericht beabsichtigt. Die dürre- und insektenkalamitätsbedingten Waldschäden und die dadurch bedingten Einschläge der letzten Jahre sind in den Projektionen methodisch bedingt nicht berücksichtigt.“*

*Die in diesem Projektionsbericht für den Sektor LULUCF enthaltenen Projektionen sind daher speziell für die Entwicklung der Waldsenke zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht hinreichend aussagekräftig. Eine verbesserte Datenlage zur Waldentwicklung, die u.a. auch die vollständigen Auswirkungen der Schadensereignisse der Jahre 2018-2021 auf den Wald mit enthalten wird, ist mit den Ergebnissen der nächsten Bundeswaldinventur zu erwarten. Ergebnisse liegen voraussichtlich Ende 2024 vor. Zudem sollen neuerer Technologien (u.a. Fernerkundung) verstärkt zum Einsatz kommen, um die Datengrundlage ggf. auch zwischen den Waldinventuren verbessern zu können“ (Öko-Institut et al. 2021).*

Vor diesem Hintergrund wurde als methodische Weiterentwicklung der Wald mit SIFOP abgebildet (s. Abschnitte 12.2.2 und 12.4.1.4). Dies führt zu einer sehr deutlichen Abweichung der Ergebnisse der Treibhausgasbilanz im MMS für Wald und Holzprodukte von -39,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (Abbildung 107 in Abschnitt 12.5.4).

## 12.3 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Siehe Angaben im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021).

## 12.4 Instrumente und deren Parametrisierung

### 12.4.1 KIS-2030

Im MMS werden bereits Maßnahmen und Instrumente vorgestellt. Diese werden hier übernommen und – wo nötig – weitergehende Maßnahmen und Instrumente hinzugenommen. Außerdem werden im KIS-2030 die Annahmen bis zum Jahr 2040 weiterentwickelt, wohingegen im MMS nach 2030 keine zusätzlichen Annahmen abgebildet werden.

Die berücksichtigten Instrumente stellen meist eine Mischung aus finanzieller Förderung und Ordnungsrecht dar. Auch ökonomische Instrumente, akteurspezifische Lenkungswirkungen sowie Informationen zur Bildung spielen eine Rolle.

Weitere Instrumente, die die Bioenergienachfrage steuern, sind in Abschnitt 5.1.6 zusammengestellt. Diese Instrumente spielen in den Sektoren, die Bioenergie nutzen, eine Rolle. Im LULUCF-Sektor werden z.T. die Potenzialgrenzen für Bioenergie beeinflusst (z. B. Nutzungsintensität im Wald versus Senkenleistung der Waldfläche).

#### 12.4.1.1 Grünlanderhalt

- ▶ Grünlanderhalt wird in der neuen GAP ähnlich wie in der alten GAP ausgestaltet. Dies führt dazu, dass die Grünlandfläche konstant bleibt (Pfad wie im Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021)).
- ▶ *„Die Grünlanderhaltung im Rahmen der Greening-Auflagen der GAP wird in Deutschland dergestalt umgesetzt, dass Betriebe, die Direktzahlungen erhalten und den Greening-Auflagen unterliegen, vor einer Umwandlung von Dauergrünland eine behördliche Autorisierung einholen müssen. Handelt es sich dabei um Dauergrünland, das bereits vor dem 01.01.2015 existierte, haben sie darüber hinaus eine gleichgroße Ersatzfläche nachzuweisen, auf der neues Dauergrünland etabliert werden muss. Die quantitative Erhaltung des Dauergrünlands wird durch weitere Regelungen einer Reihe von Bundesländern unterstützt. Wie die Flächennutzungsstatistik zeigt, ist der Rückgang der Dauergrünlandfläche inzwischen zum Erliegen gekommen. In der neuen Förderperiode nach 2020 soll die Dauergrünlanderhaltung laut Klimaschutzprogramm im Rahmen der „Konditionalität“ als Umweltauflage aller flächen- und tierbezogenen Maßnahmen der ersten und zweiten Säule der EU-Agrarpolitik in wirksamer Form fortgesetzt werden. Dies wird durch die gezielte Förderung extensiven Dauergrünlands im Rahmen der zweiten Säule der GAP unterstützt. BMEL plant weiterhin die Erarbeitung einer Grünlandstrategie, in der konkrete Handlungsfelder zur Erhaltung des Grünlandes und Stärkung einer nachhaltigen Grünlandnutzung benannt werden sollen. Die Vorlage der Strategie ist für Mitte 2021 geplant“ (Öko-Institut et al. 2021).*

#### Parametrisierung

Die Entwicklung der Grünlandflächen wird wie im MMS auf Basis der historischen Daten fortgeschrieben.

#### 12.4.1.2 Humusaufbau in der Landwirtschaft, Neuanlage von Agroforstsystemen

- ▶ Das Instrument **„Humuserhalt und -aufbau im Ackerland“** ist im Klimaschutzprogramm 2030 vorgesehen. *„Neu oder verstärkt gefördert werden sollen Fruchtfolgen für die Humus-*

mehrung, die Erhaltung bereits hoher Humusgehalte, die Anlage von Gehölzen und Agroforstsystemen sowie eine freiwillige Zertifizierung im Rahmen betrieblicher Audits von humusmehrenden Bewirtschaftungsmaßnahmen. Weiterhin sollen Beratungswerkzeuge entwickelt werden. Angaben zur konkreten Ausgestaltung und Umsetzung, die eine Quantifizierung der Wirkungen erlauben, liegen noch nicht vor“ (Öko-Institut et al. 2021). Dieses flankierende Instrument wird – wie im MMS – nicht bilanziert.

- ▶ Eine Ausnahme ist die Neuanlage von Agroforstsystemen in Rückkopplung mit dem Landwirtschaftssektor: wenn auf mineralischen Böden neue Agroforstsysteme angelegt werden, wird diese Umnutzung der landwirtschaftlichen Fläche auch im LULUCF-Sektor berücksichtigt. Das Instrument selbst ist aber in der Landwirtschaft verortet.
- ▶ Die Einbringung von Biokohle (engl. biochar) in Böden wird als Klimaschutzmaßnahme und zur Bodenverbesserung diskutiert z. B. (Wiesmeier et al. 2020). Nach der aktuellen Studienlage ist der Klimaschutzeffekt in Deutschland nicht eindeutig und es bestehen zudem Risiken für die Bodenfruchtbarkeit (DON et al. 2018). Aus diesen Gründen wird die Einbringung von Biokohle in Böden nicht weiter betrachtet.

### Parametrisierung

Die Umnutzung von Ackerland mineralischen Böden hin zu Agroforstsystemen wird entsprechend der Angaben aus der Landwirtschaftsmodellierung durchgeführt.

#### 12.4.1.3 Moorbodenschutz

Die Instrumente zum Moorbodenschutz unterteilen sich in den Schutz von Moorböden und in die Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten (inkl. der Wiedervernässung von Torfabbauflächen):

- ▶ „Der **Schutz von Moorböden** wird im Klimaschutzprogramm 2030 Kap. 3.4.7.3 „Schutz von Moorböden einschließlich Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten“ als Maßnahme beschrieben. Dafür sollen bestehende rechtliche und förderrechtliche Rahmenbedingungen angepasst, neue förderrechtliche Instrumente geschaffen und Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen intensiviert werden. Alle moorreichen Länder haben bereits Moorschutzprogramme aufgestellt und fördern Moorschutzprojekte mit Finanzierungen aus dem Europäischen Landwirtschaftsfond für die Entwicklung des ländlichen Raumes (ELER) und aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), z.T. untersetzt mit konkreten flächenbezogenen Zielen. Daneben sieht die auf der in Abstimmung befindlichen „Bund-Länderzielvereinbarung zum Moorbodenschutz“ beruhende Moorschutzstrategie (BMU 2020) eine Reduzierung der Emissionen aus organischen Böden um 5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr bis 2030 vor. Die Umsetzung von Moorschutzprojekten wird daher als Maßnahme des MMS abgebildet. Die Abschätzung der Wirkungen erfolgt auf Basis einer Fortschreibung der in der aktuellen Finanzierungsperiode für den Moorschutz verfügbaren Budgets und der Kosten und Flächenumfänge bereits umgesetzter Projekte. Dabei werden neu eingeplante Finanzmittel des Bundes für den Moorbodenschutz berücksichtigt. Weiterhin soll laut Klimaschutzprogramm 2030 im Rahmen der 1. Säule der GAP ein ambitioniert ausgestalteter GLÖZ-Standard (GLÖZ = Standard zum guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand landwirtschaftlicher Flächen) einem angemessenen Schutz von Feuchtgebieten und Torfflächen geschaffen werden. Da die konkrete Ausgestaltung noch unklar ist, werden mögliche Effekte nicht quantifiziert“ (Öko-Institut et al. 2021).
- ▶ Anders als im MMS wird im KIS-2030 eine Fortführung des Instruments über das Jahr 2030 hinaus angenommen. Zudem werden über den gesamten Zeitraum verstärkt Ackerflächen

auf organischen Böden<sup>103</sup> für den Moorbodenschutz herangezogen. Diese Flächennutzung ist mit dem Landwirtschaftssektor rückgekoppelt und steht so im Einklang mit der dort abgebildeten inländischen Produktion an Nahrungs- und Futtermitteln sowie Bioenergiesubstraten. Ab dem Jahr 2030 wird eine kontinuierliche Steigerung der Anhebung der Wasserstände auf vernässten Flächen vorgenommen. Der ambitioniertere Moorbodenschutz kann mit einer Erhöhung der Mittel in den genannten Instrumenten erreicht werden.

- ▶ Als konkrete Aktivitäten sind umfangreiche Planungen und Entwicklungen nötig, um eine Moorvernässung in die Fläche zu bringen. Dazu zählen wasserrechtliche Planungen, Mikroflurbereinigungen (zusammenhängende Flächenkulisse erreichen), Baumaßnahmen zur Wiedervernässung, Entschädigungspläne für Landwirte und Ankauf von Flächen, Nutzungsmodelle für Paludikulturen, etc. Vorbereitende Aktivitäten sind in den nächsten Jahren mit geringeren Kosten verbunden. Hohe Kostenaufwendungen werden nötig, sobald die Vernässung umgesetzt wird. Es erscheint sinnvoll, einen Moorschutzfond über die nächsten Jahre mit kontinuierlichen Zahlungen zu füllen, um dann z. B. ab 2025 mit sicher bereitstehenden Mitteln relevante Flächenzahlen wiedervernässen zu können.
- ▶ Die oben genannten Instrumente basieren auf einer Förderung. Ein Bonus-System ist generell gerechtfertigt, damit Kosten bei der Umstellung der Flächennutzung abgedeckt werden können. Um die Motivation der Landwirte zu steigern, auf ihren Flächen Moorbodenschutz zu betreiben, kann auch ein Bonus-Malus System hilfreich sein.<sup>104</sup> So könnte mit einer CO<sub>2</sub>-Steuer auf Emissionen aus den organischen Böden oder mit dem Streichen der GAP-Förderung bei klimaschädigender Bewirtschaftung die Motivation der Landwirte gesteigert werden, eine geförderte Moorschutzmaßnahme in Anspruch zu nehmen.
- ▶ Der Torfabbau in Deutschland wird bis 2030 etwas mehr als halbiert und bis 2040 auf null reduziert (Pfad wie im Projektionsbericht 2021). Die Flächen werden nach Einstellung der Nutzung wiedervernässt. *„Die **Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten**<sup>105</sup> wird im Klimaschutzprogramm 2030 Kap. 3.4.7.3 als Maßnahme festgelegt. Versuchstätigkeit und Forschung zu Ersatzstoffen sollen gestärkt und Beratungsmöglichkeiten für Betriebe, die Information der Öffentlichkeit über Alternativen zu torfhaltigen Blumenerden und Schulungen spezieller Verwendungskreise etabliert werden. In der Herstellung von Blumenerden ist ein Ersatz der Torfverwendung leichter möglich, im Bereich der Kultursubstrate für den gewerblichen Gartenbau ist eine Reduzierung möglich, für vollständig torffreie Alternativen besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Bis 2026 soll kein Torf im Hobbybereich mehr eingesetzt und 2030 eine Reduzierung von 70 % im Erwerbsgartenbau erreicht werden“* (Öko-Institut et al. 2021). Die Reduzierung der Torfverwendung findet parallel zur Reduzierung des Torfabbaus statt. So wird sichergestellt, dass die erreichte Treibhausgasminderung durch die Reduzierung des Torfabbaus nicht durch zusätzliche Torfimporte aufgehoben wird. Eine Reduktion der Torfverwendung, die über die Reduktion des Torfabbaus hinausgeht, reduziert den Torfimport. Dies führt zu einer Treibhausgasminderung in den Herkunftsländern.

<sup>103</sup> Im Jahr 2018 waren in Deutschland 342.100 ha des Ackerlands (2,7 % der Ackerfläche) und 970.500 ha des Grünlands (7,7 % der Grünlandfläche) organische Böden (CRF-Tabellen).

<sup>104</sup> Greifwald Moor Center: Vortragsfolien zu „Anreize für Paludikultur zur Umsetzung der Klimaschutzziele 2030 und 2050“. Expert\*innen-Workshop, 09.06.2021, BMU-ReFoPlan-Vorhaben, FKZ 3719425090, 2019-2021

<sup>105</sup> Erläuterung des Öko-Instituts: In der Treibhausgasbilanz in Deutschland wird die Treibhausgasminderung durch die Einstellung des Torfabbaus auf der Torfabbaufäche bilanziert. Damit diese Minderung auch wirksam wird, muss in Kombination die Torfverwendung reduziert werden, da es ansonsten zu verstärkten Importen an Torf und so zu einer Verlagerung des Torfabbaus in andere Länder kommen würde. Das Instrument „Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten“ ist stets als Kombination dieser Punkte zu verstehen.

- ▶ Es wird angenommen, dass ab 2020 keine neuen Konzessionen für den Abbau von Torf in Deutschland vergeben werden, so dass der Torfabbau in Deutschland bis zum Jahr 2040 ausläuft.
- ▶ Torf selbst gehört zu den so genannten Grundeigentümergebietsschätzen, die nicht unter das Bundesberggesetz (BBergG) fallen. Die Abgrabung von Torf sowie die Renaturierungspflichten nach Beendigung des Abbaus sind auf Bundeslandebene geregelt.<sup>106</sup> Es sollen keine Konzessionen für neue Torfabbauflächen bewilligt bzw. bestehende verlängert werden. Es sollte auf Bundeslandebene geprüft werden, ob ein vorzeitiger Ausstieg aus dem Torfabbau bei Beibehaltung der Renaturierungspflicht möglich ist (z. B. Verhältnismäßigkeit bei Übergangsfristen einhalten, um Entschädigungszahlungen zu vermeiden).

### Parametrisierung

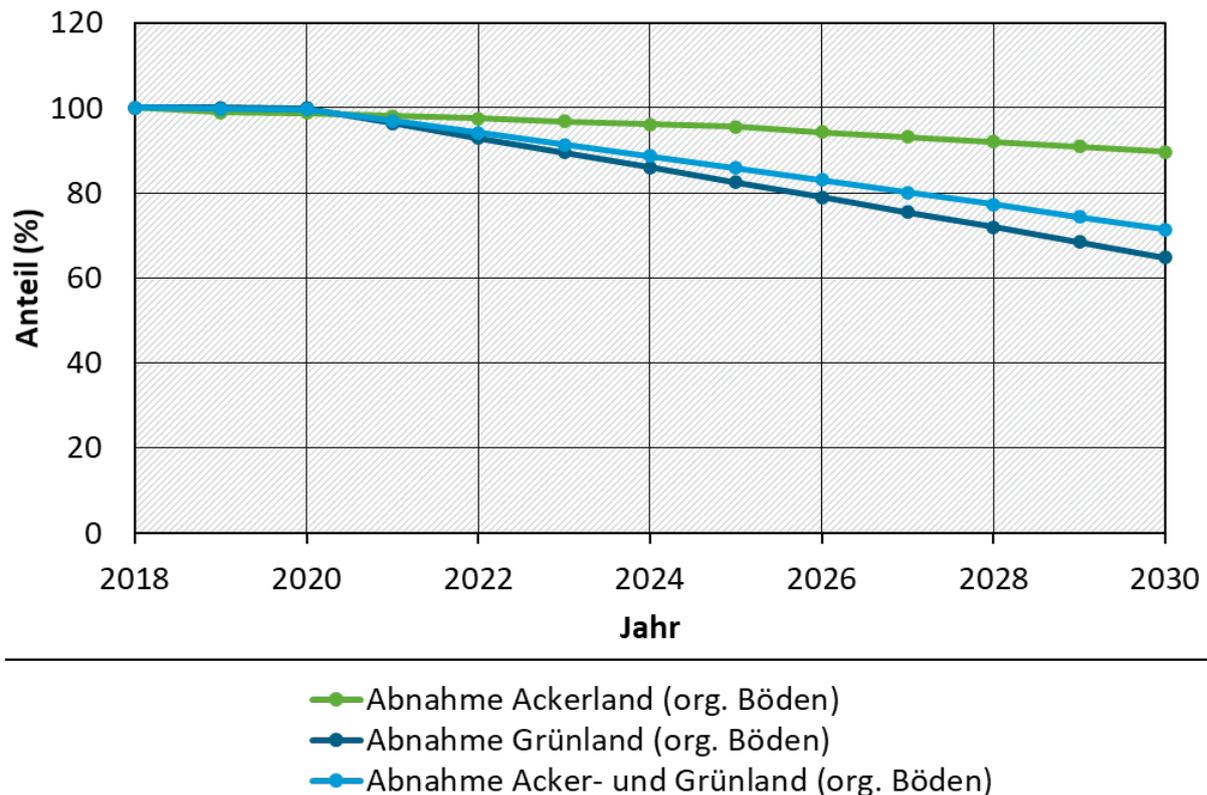
- ▶ Vernässung entwässerter Feuchtgebietsflächen<sup>107</sup> und deren Optimierung: Verringerung der Emissionen bis 2030 um 80 % und Fortschreibung bis 2040.
- ▶ Umwandlung von Ackerland auf organischen Böden zu Grünland:
  - bis 2030: 22.822 ha; bis 2040: 176.962 ha
- ▶ Summe der Vernässung von Acker- und Grünland auf organischen Böden:
  - bis 2030: 35.189 ha Ackerland; 333.014 ha Grünland
  - bis 2040: 240.822 ha Ackerland; 670.616 ha Grünland

Die Abnahme der trocken genutzten organischen Böden in der Landwirtschaft ist in Abbildung 103 dargestellt.

- ▶ Summe der vernässten Torfabbauflächen: bis 2030 11.584 ha; in 2040: 18.520 ha
- ▶ Bewirtschaftung vernässter Flächen:
  - 2030: 45 % frisches Moorgrünland; 15 % feucht bis sehr feuchtes Moorgrünland; 20 % sehr feuchtes Moorgrünland; 20 % nasses Moorgrünland
  - 2040: 0 % frisches Moorgrünland; 20 % feucht bis sehr feuchtes Moorgrünland; 40 % sehr feuchtes Moorgrünland; 40 % nasses Moorgrünland

<sup>106</sup> Als Beispiele Regelungen zu Torfabbau und Wiederherstellungsmaßnahmen in zwei Bundesländern: Niedersachsen: Niedersächsisches Ausführungsgesetz zum Bundesnaturschutzgesetz (NAGBNatSchG); Nordrhein-Westfalen: Gesetzes zur Ordnung von Abgrabungen (Abgrabungsgesetz)

<sup>107</sup> Im 2018 waren terrestrische Feuchtgebiete mit einer Fläche von 68.600 ha für über 1,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq verantwortlich (CRF-Tabellen), da ihr Wasserstand nicht optimal gemanagt wurde.

**Abbildung 103: Entwicklung der trocken genutzten organischen Böden in der Landwirtschaft in KIS-2030, 2018-2030**

Quelle: Berechnung Öko-Institut in FABio-Land.

#### 12.4.1.4 Waldbewirtschaftung

Um die im KSG genannte Senkenleistung im LULUCF-Sektor zu erreichen, sind fünf Instrumente, die ineinandergreifen und z.T. mit den holznutzenden Sektoren in Wechselwirkung stehen, zu nennen (Tabelle 126).

Mit dem Förderbereich 5 „Forsten“ der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK) werden bereits zahlreiche Aktivitäten der Waldbewirtschaftung gefördert.<sup>108</sup> Laut dem Klimaschutz Sofortprogramm 2022<sup>109</sup> der Bundesregierung soll zudem in der GAK ein Modell zur Honorierung der Klimaschutzleistung des Waldes eingeführt werden, mit dem Waldbesitzende einen Anreiz für den Erhalt und die Vergrößerung der Senke in Wäldern und in langlebigen Holzprodukten erhalten.

**Tabelle 126: Instrumente zur Waldbewirtschaftung und mögliche Förderung**

Instrument	Bestehende und zu entwickelnde Maßnahmen und Instrumente
Die Senkenleistung der Waldfläche soll erhalten werden. Dies soll durch einen Vorratsaufbau in ökologisch stabilen Wäldern unterstützt werden.	Die im Klimaschutz Sofortprogramm 2022 geplante Honorierung der Klimaschutzleistung des Waldes soll sehr gezielt waldbauliche Maßnahmen in ökologisch stabilen Wäldern fördern, die zu einem Vorratsaufbau führen. Hierzu zählt vor allem die Extensivierung der Nutzung

<sup>108</sup> <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/laendliche-Regionen/Foerderung-des-laendlichen-Raumes/GAK/Foerderbereich5.pdf?blob=publicationFile&v=2>

<sup>109</sup> <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/klimaschutz-sofortprogramm-2022.pdf?blob=publicationFile&v=1>

Instrument	Bestehende und zu entwickelnde Maßnahmen und Instrumente
	<p>(höhere Zieldurchmesser, extensivere Durchforstung). Die Honorierung soll klar zweckgebunden an die Aktivität des Forstbetriebs sein. Eine pauschale Flächenprämie wird als nicht zielführend abgelehnt. Diese waldbaulichen Maßnahmen sollen einen Fokus auf Waldbestände setzen, mit denen nur geringe ökonomische Erträge erwirtschaftet werden können, um die Kosten der Förderung niedrig zu halten. So kann eine extensivere Nutzung von Baumbeständen, die nur für minderwertige Nutzungen (Papier, Pappe, Verpackungsholz, Bioenergie) geeignet sind, im Wald belassen oder später geerntet werden, um den Vorrat und damit die Senkenleistung der Waldfläche zu erhöhen.</p> <p>Eine umfassende Treibhausgasbilanzierung<sup>110</sup> für die zu erwartenden Produkte soll zudem unterstützen, welcher Grad einer Extensivierung von Waldbeständen für den Klimaschutz sinnvoll und damit förderfähig ist (vgl. langlebige Produkte sowie Fehrenbach et al. 2022).</p> <p>Im Vertragsnaturschutz im Förderbereich 5 „Forsten“ in der GAK ist bereits ein Nutzungsverzicht förderfähig (E.1.2.1). Eine Ausgestaltung des neuen Förderinstruments könnte hieran angelehnt werden (siehe auch den Verweis im Klimaschutzprogramm 2030<sup>111</sup> der Bundesregierung auf „klimawirksame Vertragsnaturschutz-Maßnahmen“).</p>
<p>Ökologisch labile Wälder werden hin zu ökologisch stabilen Wäldern umgebaut.</p>	<p>Im Förderbereich 5 „Forsten“ in der GAK ist in der Maßnahmengruppe A „naturnahe Waldbewirtschaftung“ der Waldumbau bereits förderfähig. Wie im Klimaschutz Sofortprogramm 2022 genannt werden die Mittel aufgestockt.</p>
<p>Beim Auftreten von Extremereignissen (Sturm, Dürre) soll mit Sofortmaßnahmen erreicht werden, dass weniger geschädigte Beständen keinen Schaden nehmen. Hier spielt insbesondere das Eindämmen von Käferkalamitäten eine Rolle, um die Absterberate von Bäumen niedrig zu halten.</p>	<p>In der Maßnahmengruppe F „Förderung von Maßnahmen zur Bewältigung der durch Extremwetterereignisse verursachten Folgen im Wald“ im Förderbereich 5 „Forsten“ in der GAK besteht hierzu eine Förderkulisse. Wie im Klimaschutz Sofortprogramm 2022 genannt, werden die Mittel aufgestockt. Die bestehenden „Maßnahmen zur bestands- und bodenschonenden Räumung von Kalamitätsflächen“ (F.1.0) soll um die Förderung eines engmaschigen Monitorings des Käferbefalls ergänzt werden, um Forstbetriebe zu unterstützen, einen Käferbefall frühzeitig zu erkennen und gezielt kleinräumig Gegenmaßnahmen durchzuführen.</p>
<p>Mit einer vermehrten Nutzung von Holz als langlebiges Produkt soll die Senkenleistung in den Holzprodukten erhöht werden.</p>	<p>Die Nutzung langlebiger Produkte muss einerseits in den Sektoren, die die Produkte nutzen, angereizt werden (Abschnitt 5.1.6). Andererseits muss auf Seiten der forstwirtschaftlichen Produktion und auf Seiten der Holzindustrie die Verarbeitung des Holzes unterstützt werden, um die Produktion langlebiger Holzprodukte zu ermöglichen. Mit der Charta für Holz 2.0<sup>112</sup> besteht der Rahmen für einen Dialogprozess, u.a. zum verstärkten Einsatz von Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft als Beitrag zum Klimaschutz. Mit dem Waldklimafonds und den Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe bestehen hierzu Förderinstrumente (z. B. Förderung von Fach- und Verbraucherinformation,</p>

<sup>110</sup> Eine umfassende Treibhausgasbilanzierung umfasst Prozessemissionen, Änderung der Senkenleistung der Waldfläche, Änderung der Senkenleistung des Holzproduktspeichers sowie Substitutionseffekte der substituierten nicht biogenen Produkte (siehe Fehrenbach et al. (2022)).

<sup>111</sup> <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klimamassnahmen-data.pdf>

<sup>112</sup> <https://www.charta-fuer-holz.de/charta-service/mediathek>

Instrument	Bestehende und zu entwickelnde Maßnahmen und Instrumente
	Ideenwettbewerben, Modell-/Demonstrationsvorhaben). Ein deutlicher Förderfokus soll auf die klimafreundliche und innovative Holzverwendung insbesondere im Bereich des Bauens mit Holz, sowie auf die stoffliche Verwendung von Laubholz, der Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung gesetzt werden. Anreize für eine Nutzung in langlebigen Produkten müssen aber immer in Rückkopplung mit Effekten auf die Waldsenke betrachtet werden. Bei der Umsetzung soll mit einer umfassenden Treibhausgasbilanzierung <sup>110</sup> bewertet werden, ob ein Nutzungspfad für den Klimaschutz von Vorteil ist (vgl. Maßnahme zur Senkenleistung der Waldfläche). Deutlich positive Effekte sind erst zu erwarten, wenn zudem Treibhausgasminderungen durch die Substitution emissionsintensiver nicht-biogener Produkte erreicht werden. Diese sind aber nicht dem LULUCF-Sektor, sondern anderen Sektoren zurechnen.
Aufforstung von Ackerflächen	Durch die Veränderungen in der Landwirtschaft (z. B. weniger Futtermittelanbau) können Ackerflächen auf mineralischen Böden frei werden. Wenn diese Flächen nicht weiter für einen Anbau von Bioenergie oder Markfrüchten für den Export genutzt werden sollen, können sie aufgeforstet werden. Eine Förderung kann über eine Aufstockung der GAK-Mittel in der Maßnahmengruppe D „Erstaufforstung“ erfolgen, mit der eine Waldmehrung durch Aufforstung aus der landwirtschaftlichen Nutzung ausscheidender oder brachliegender Flächen unterstützt wird.

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Öko-Institut

Als flankierende Instrumente sind z. B. ein optimiertes Monitoring, ein optimiertes Wildtiermanagement, eine verstärkte internationale Zusammenarbeit in der Sicherstellung von nachhaltiger Waldbewirtschaftung weltweit, die Stärkung des Holzkompetenzzentrums zur Vermeidung von Verlagerungseffekten und eine verstärkte Waldbauforschung zu nennen. Eine Quantifizierung des Klimaschutzbeitrags dieser flankierenden Instrumente sind aber im Rahmen des MMS und KIS-2030 nicht möglich (vgl. Öko-Institut et al. (2021)).

Es bestehen mit anderen Sektoren bzw. innerhalb des LULUCF-Sektors folgenden Rückkopplungen.

- ▶ In Rückkopplung mit Landwirtschaft: wenn auf mineralischen Böden Ackerflächen frei werden, können diese Flächen aufgeforstet werden.
- ▶ Anbindung an Bioenergie: die Extensivierung der Waldfläche verändert die Menge an Bioenergie, die anderen Sektoren zur Verfügung steht.
- ▶ Die Entwicklung des Holzproduktspeichers ist an den Holzeinschlag gekoppelt.

Darüber hinaus sind in Abschnitt 5.1.6 Instrumente in anderen Sektoren angeführt, die die Holznutzung und damit die Waldbewirtschaftung beeinflussen.

### Parametrisierung

In KIS-2030 wird die Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse auf der Waldfläche in SIFOP mit den folgenden Annahmen abgebildet:

- ▶ Annahme der Schadenssituation:
  - Bis zum Jahr 2018 werden die berichteten Daten verwendet (UBA 2020c).

- Um die Extremjahre 2019 und 2020 und Nachwirkungen in den zwei Folgejahren abzubilden, werden die folgenden Situationen angenommen (vgl. Abbildung 102): starke Schäden in 2019, extreme Schäden in 2020, sehr starke Schäden in 2021 und starke Schäden in 2022.
  - Ab dem Jahr 2023 werden mittlere Schäden angenommen (vgl. Abbildung 102). Dies entspricht einem Schadniveau, das 1,5 mal höher ist als die Schäden, die im Zeitraum von 2002 bis 2017 auftraten.
- Annahmen zum Holzeinschlag:
- Für den Holzeinschlag werden bis zum Jahr 2019 berichtete Daten herangezogen (Abbildung 102).
  - Im Jahr 2020 wird aufbauend auf vorläufigen Einschlagszahlen ein Holzeinschlag von 88,4 Mio. m<sup>3</sup> angenommen (vgl. Hennenberg et al. 2021).
  - Im Nachgang zu den drei Extremjahren wird angenommen, dass die Holzentnahme im Jahr 2021 auf 81,8 Mio. m<sup>3</sup> und im Jahr 2022 auf 76,4 Mio. m<sup>3</sup> sinkt.
  - Im Jahr 2023 wird eine Holzentnahme von 72,1 Mio. m<sup>3</sup> (6,6 m<sup>3</sup>/ha) als Mittelwert der Jahre 2008 bis 2017 eingesetzt. Diese Einschlagsintensität wird ab dem Jahr 2024 fortgeschrieben. Dabei verändert sich der absolute Holzeinschlag in Abhängigkeit von der Entwicklung der Waldfläche in FABio-Land (s.o.).
- Für die Treibhausgasbilanz der Holzprodukte werden folgenden Annahmen getroffen:
- In den Jahren mit starken Störungen stieg die Holzentnahme und parallel die Senkenleistung der Holzprodukte. In Anlehnung an diesen Zusammenhang wird mit der erhöhte Holzentnahme in den Jahren 2020 und 2021 auch eine erhöhte Senkenleistung des Holzspeichers von -7 bzw. von -6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq angenommen. Ab dem Jahr 2022 wird die Senkenleistung des Holzspeichers als Mittelwert der Jahre 2008-2017 angenommen und bis 2050 auf 5,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq erhöht, um eine steigende Nutzung langlebiger Holzprodukte als Schätzwert abzubilden.

#### 12.4.1.5 Siedlungsfläche

Die tägliche Netto-Neuinanspruchnahme an Siedlungsfläche wird gesenkt: 2030 auf 20 ha/Tag, 2050 auf 0 ha/Tag. Das Ziel dieses Instruments ist vor allem, den Nutzungsdruck auf Flächen zu mindern und so eine steigende Einschränkung für z. B. die Wiedervernässung organischer Böden zu verhindern.

Die Reduktion der Flächeninanspruchnahme für Siedlungen steht in einem komplexen rechtlichen Umfeld des Baugesetzes und des Raumplanungsrechts auf Bundes-, Länder- und kommunaler Ebene. Mögliche ordnungsrechtliche Instrumente sind z. B. Begründungs- oder Rechtfertigungspflicht der Länder bei der Inanspruchnahme der Freiraumflächen, eine vorrangige Innenbereichsentwicklung und eine Genehmigungspflicht für Bebauungspläne im Außenbereich. Auch ein Umwandlungsverbot von Flächen mit hohen Kohlenstoffvorräten wie Wald, Grünland oder Flächen mit organischen Böden zu Siedlungsfläche ist sinnvoll. Als ein ökonomisches Instrument kommt eine Flächenkontingentierung für die Inanspruchnahme von Freiflächen und der Handel mit Flächenkontingenten in Frage (vgl. Brandt et al. 2003, Penn-Bressel et al. 2003, Köck et al. 2007).

## Parametrisierung

Ausgehend von 77,5 ha/Tag wird die Netto-Neuinanspruchnahme an Siedlungsfläche bis 2030 auf 20,0 ha/Tag und bis 2050 auf 0 ha/Tag gesenkt. Zwischen diesen Zeitschritten wird linear interpoliert. Im Jahr 2040 liegt die Netto-Neuinanspruchnahme an Siedlungsfläche bei 10,0 ha/Tag.

### 12.4.2 MMS (Thünen-Institut)

Im zuvor veröffentlichten MMS des Projektionsberichts 2021 wurden die folgenden Instrumente berücksichtigt:

- a) Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke bis 2030 auf unter 30 ha/Tag
- b) Erhalt von Dauergrünland
- c) Schutz von Moorböden
- d) Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten
- e) Humuserhalt und -aufbau im Ackerland
- f) Erhaltung und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder und Holzverwendung

Eine Beschreibung der Instrumente und Maßnahmen sowie deren Parametrisierung kann Öko-Institut et al. (2021) entnommen werden.

## 12.5 Ergebnisse

### 12.5.1 KIS-2030

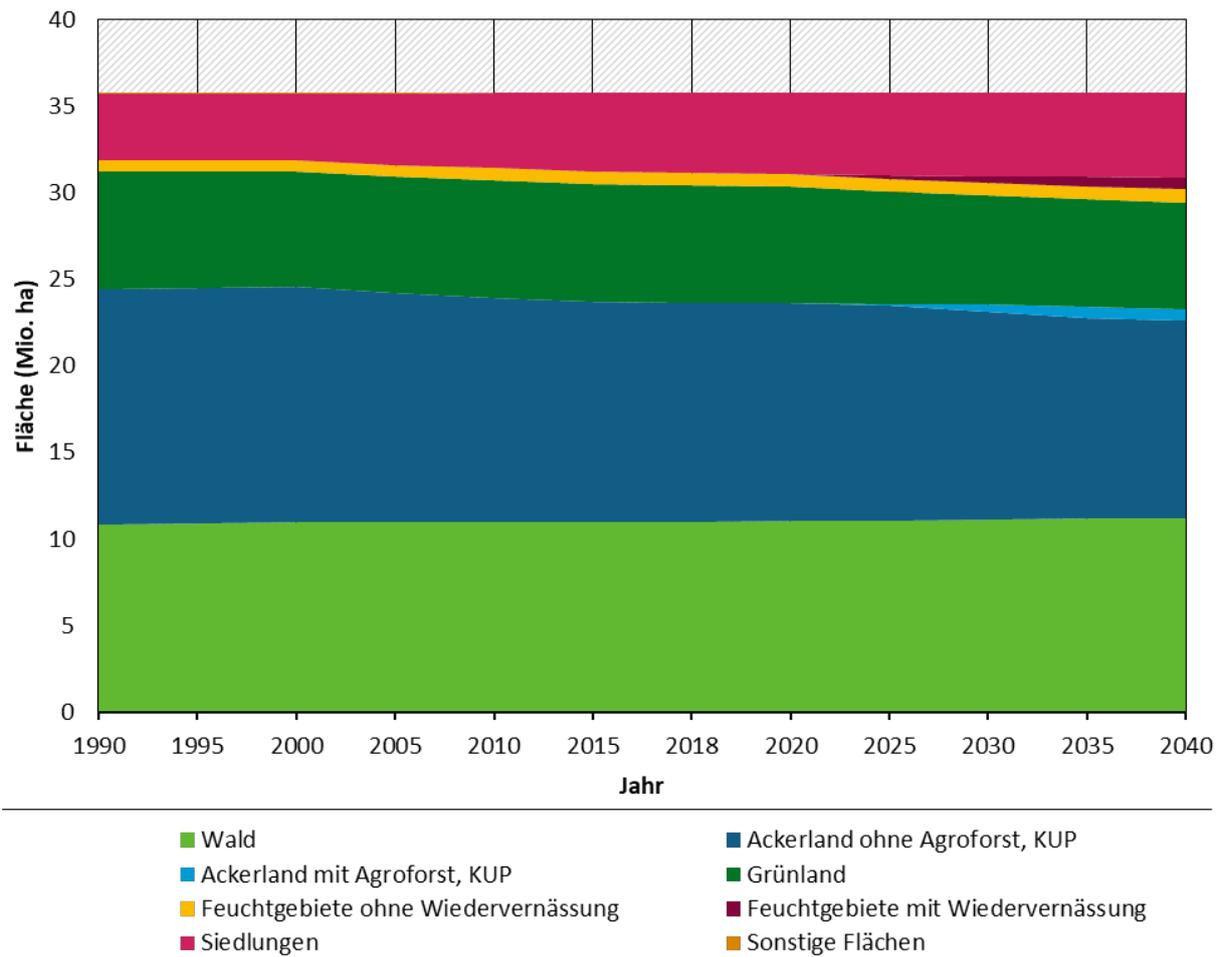
Die Entwicklung der Flächenkulisse im KIS-2030 ist in Tabelle 127 und Abbildung 104 dargestellt. Die Waldfläche zeigt aufgrund der Fortschreibung der historischen Dynamik eine leichte Zunahme. Eine deutliche Zunahme ist für Feuchtgebiete zu erkennen. Dies resultiert durch die Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten organischen Böden (siehe Feuchtgebiete mit Wiedervernässung in Abbildung 104). Im Gegenzug nehmen die Acker- und Grünlandflächen ab. Diese Abnahme wird bis zum Jahr 2030 zudem durch die Zunahme der Siedlungsfläche verstärkt. Dieser Effekt verringert sich nach dem Jahr 2030 deutlich, da die Netto-Flächenneuinanspruchnahme entlang der Zeitachse abnimmt. Hervorzuheben ist zudem die Zunahme an Ackerflächen, die als Agroforst oder Kurzumtriebsplantagen genutzt werden (Abbildung 104).

**Tabelle 127: Entwicklung der Aktivitätsdaten [1000 ha] des LULUCF-Sektors von 1990 bis 2040**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Wald	10.833	10.938	10.997	11.077	11.127	11.158	11,200
Ackerland	13.593	13.240	12.657	12.512	12.423	12.235	12.103
Grünland	6.804	6.765	6.772	6.478	6.265	6.210	6.142
Feuchtgebiete	649	676	738	930	1.127	1.310	1.450
Siedlungen	3.844	4.124	4.590	4.759	4.818	4.848	4.870
Sonstiges	68	47	37	34	30	29	25
∑ LULUCF*	35.790	35.790	35.790	35.790	35.790	35.790	35.790

\* gesamte Landfläche in Deutschland

Quelle: UBA (2020c), Modellrechnungen Öko-Institut.

**Abbildung 104: Flächenentwicklung im KIS-2030**

Quelle: UBA (2020c), Modellrechnungen Öko-Institut.

Die Entwicklung der Treibhausgasbilanz im LULUCF-Sektor im KIS-2030 ist in Tabelle 128 und Abbildung 105 zusammengestellt. Als Senken, in denen CO<sub>2</sub> festgelegt wird, sind die Waldfläche und in geringerem Umfang die Holzprodukte zu nennen. Im Jahr 2020 nimmt die Senkenleistung der Waldfläche deutlich ab, da in diesem Jahr in SIFOP den sehr starken Schäden, vor allem durch Trockenheit und Käferkalamität, Rechnung getragen wird. Gleichzeitig nimmt der Holzspeicher durch die gestiegene Holzentnahme leicht zu. Ab dem Jahr 2025 wird ein mittleres Niveau der Senkenleistung der Waldfläche angenommen, das im Mittel um den Faktor 1,5 niedriger liegt als die Senkenleistung der Jahre 2002 bis 2017. Ob, wann und in welchem Umfang natürliche Störungen bis zum Jahr 2030 und darüber hinaus auftreten werden, kann in SIFOP nicht modelliert werden. Vielmehr wird das gestiegene Risiko berücksichtigt. Für Holzprodukte wird eine leichte Zunahme durch die verstärkte Nutzung langlebiger Holzprodukte angenommen.

Die übrigen Quellgruppen Ackerland, Grünland Feuchtgebiete und Siedlungen sind Quellen, d.h. sie emittieren mehr Treibhausgase als sie CO<sub>2</sub> binden. Im KIS-2030 nehmen die Emissionen im Acker- und Grünland durch die Vernässung organischer Böden bis zum Jahr 2030 und darüber hinaus deutlich ab. Beim Ackerland kommt hinzu, dass auf deutlichen Flächenanteilen Agroforst bzw. Kurzumtriebsplantagen angebaut werden, was zu einer CO<sub>2</sub>-Festlegung führt. In Feuchtgebieten nehmen die Emissionen bis zum Jahr 2030 in Summe leicht zu. Zum einen werden Treibhausgasemissionen durch die Optimierung von Feuchtgebieten und durch die Reduzierung des Torfabbaus gemindert, zum anderen werden teil- und vollvernässte Flächen mit verbleibenden Emissionen in die Flächenkategorie Feuchtgebiete nach Wiedervernässung überführt.

Als Summe der Quellen und Senken wird im LULUCF-Sektor unter den getroffenen Annahmen im Jahr 2030 eine Treibhausgasbilanz von -25,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und damit das Ziel des KSG von -25 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030 erreicht.<sup>113</sup>

Es ist aber zu betonen, dass bei der vorgenommenen Fortschreibung Unsicherheiten bestehen. Dies ist insbesondere der Fall für die Waldsenke. Wenn in Zukunft in regelmäßigen Abständen Extremjahre wie 2018 bis 2020 auftreten, wird die angenommene Senkenleistung nicht erreicht werden können. Das KSG ermächtigt die Bundesregierung, den Umgang mit und die Anrechenbarkeit von natürlichen Störungen zu regeln. Die konkrete Umsetzung steht aber noch aus. Starke natürliche Störungen im Wald können zu einer geringeren Senkenleistung führen, als sie z. B. im KIS-2030 angenommen ist. So würde die Senkenleistung für den LULUCF-Sektor im Jahr 2030 den Zielwert von -25 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq verfehlen. Aufgrund der Anrechnung der natürlichen Störung würde das KSG trotzdem als erfüllt gelten, die CO<sub>2</sub>-Festlegung fehlt aber in der sektorübergreifenden Zusammenstellung der Treibhausgasemissionen (z. B. Abschnitt 15.5.3).

**Tabelle 128: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im KIS-2030**

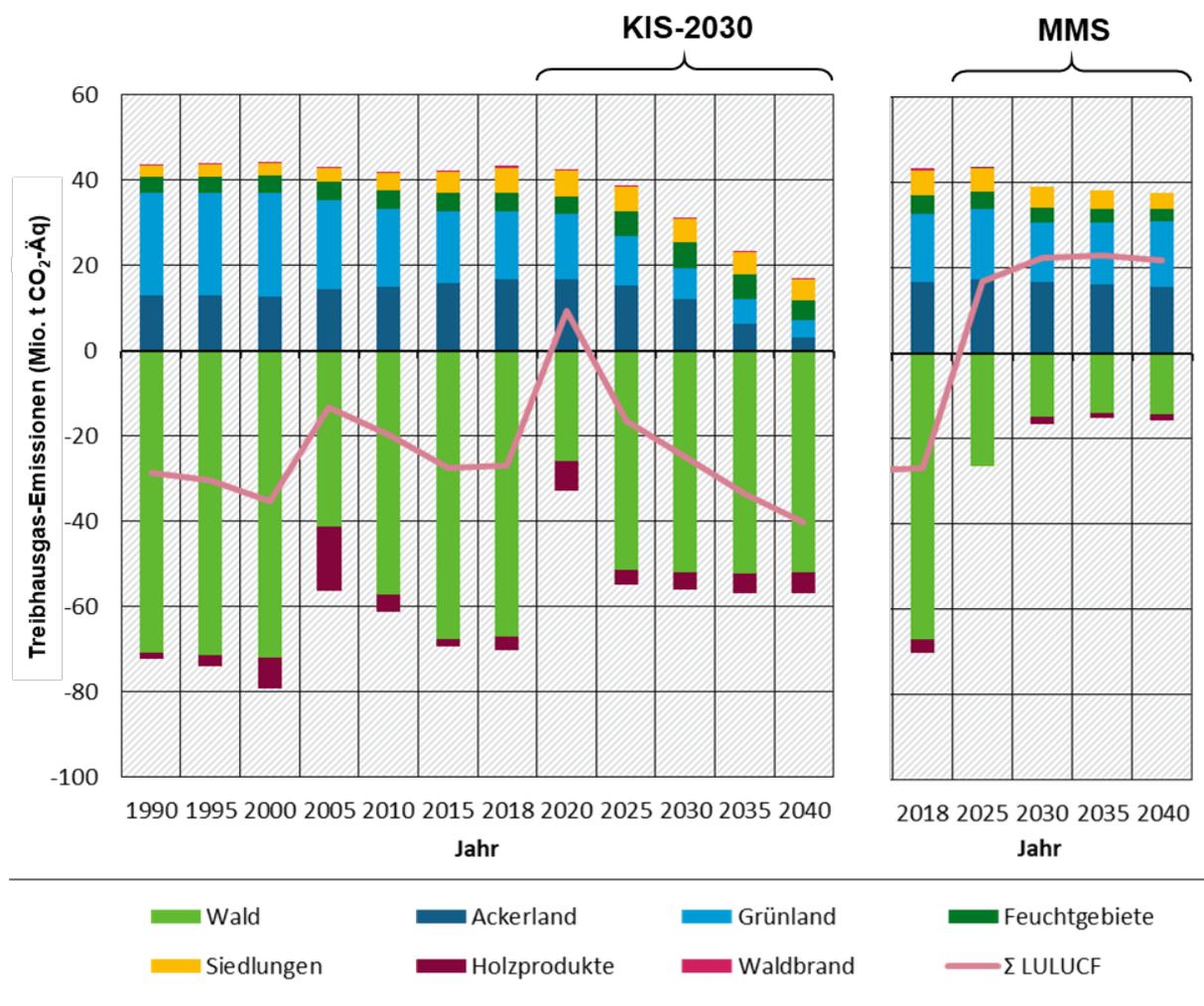
Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Wald	-67,0	-26,8	-36,1	-51,0	-51,2	-51,4	-51,5	-51,7	-51,7	-51,9	-52,0	-52,3	-52,0
Ackerland	16,5	16,3	16,1	15,8	15,5	15,3	14,7	14,0	13,4	12,7	11,9	6,2	3,1
Grünland	15,9	14,6	13,8	13,0	12,2	11,4	10,6	9,8	9,0	8,2	7,3	5,7	4,1
Feuchtgebiete	4,4	4,3	4,7	5,1	5,6	6,0	5,7	5,9	6,0	6,1	6,2	5,9	4,6
Siedlungen	6,2	5,9	5,9	5,9	5,8	5,8	5,8	5,7	5,7	5,6	5,6	5,3	4,8
Holzprodukte	-3,2	-6,0	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,7	-3,8	-3,8	-3,9	-4,0	-4,5	-5,0
Andere Bereiche (Waldbrand)	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Gesamt</b>	<b>-27,1</b>	<b>8,2</b>	<b>0,7</b>	<b>-14,8</b>	<b>-15,6</b>	<b>-16,4</b>	<b>-18,4</b>	<b>-19,9</b>	<b>-21,4</b>	<b>-23,2</b>	<b>-25,1</b>	<b>-33,7</b>	<b>-40,4</b>

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

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

<sup>113</sup> Laut KSG soll die Zielerreichung anhand des Mittelwerts der jährlichen Emissionsbilanzen des jeweiligen Zieljahres und der drei vorhergehenden Kalenderjahre geprüft werden. Das Ziel im KSG ist es, natürliche Schwankungen abzuf puffern. In der vorliegenden Modellierung werden keine jährlichen Schwankungen abgebildet, weshalb auf diese Mittelwertbildung verzichtet und lediglich das jeweilige Zieljahr herangezogen wird.

Abbildung 105: Treibhausgasemissionen im LULUCF Sektor für KIS-2030 und MMS



Quelle: 1990-2018: UBA (2020c); KIS-2030: Modellrechnungen Öko-Institut; MMS = Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021).

### 12.5.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Die Ergebnisse entsprechen denen des KIS-2030 (Abschnitt 12.5.1).

### 12.5.3 MMS

#### 12.5.3.1 Entwicklung von Aktivitätsdaten

„Die [Tabelle 129] zeigt die historische und projizierte Entwicklung der Aktivitätsdaten. Die Waldfläche nimmt leicht und die Flächen der Feuchtgebiete stark zu, die Acker- und Grünlandflächen nehmen dagegen leicht ab. Die Siedlungsfläche ändert sich nach 2020 nur wenig“ (Öko-Institut et al. 2021).

Tabelle 129: Entwicklung der Aktivitätsdaten [1000 ha] des LULUCF-Sektors von 1990 bis 2040

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Wald	10.833	10.938	10.997	11.097	11.169	11.242	11.318
Ackerland	13.593	13.240	12.657	12.561	12.511	12.474	12.459

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Grünland	6.804	6.765	6.772	6.734	6.653	6.626	6.602
Feuchtgebiete	649	676	738	788	860	878	897
Siedlungen	3.844	4.124	4.590	4.577	4.568	4.543	4.490
Sonstiges	68	47	37	33	30	27	24
∑ LULUCF*	35.790	35.790	35.790	35.790	35.790	35.790	35.790

\* gesamte Landfläche in Deutschland

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021).

### 12.5.3.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

„Die für diesen Bericht vorhergesagte Entwicklung der Emissionen im LULUCF-Sektor wird wesentlich von der Entwicklung der Senkenleistung des Waldes bestimmt. Die im Projektionsbericht dargestellte Entwicklung der Waldsenke weicht von den in der Klimaberichterstattung gemeldeten Daten ab (s. auch einleitende Bemerkungen zu Kap. 11.1)“

**Tabelle 130: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors nach Quellgruppen zwischen 2018 und 2040 im MMS**

Kategorie	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq												
Wald	-67,0	-5,1	-5,1	-5,0	-26,7	-26,6	-26,6	-26,6	-26,5	-15,1	-15,0	-14,1	-14,5
Ackerland	16,5	18,0	17,9	17,7	17,5	17,3	17,2	17,2	17,1	16,9	16,6	16,1	15,5
Grünland	15,9	16,1	16,2	16,2	16,3	16,3	15,9	15,5	15,1	14,6	14,1	14,6	15,4
Feuchtgebiete	4,4	4,9	4,7	4,5	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,6	3,5	3,2	3,0
Siedlungen	6,2	6,0	5,8	5,7	5,6	5,4	5,3	5,2	5,0	4,9	4,8	4,3	3,7
Holzprodukte	-3,2	-4,3	-4,3	1,2	0,6	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-1,8	-1,7	-1,1	-1,3
Andere Bereiche (Waldbrand)	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Gesamt</b>	<b>-27,1</b>	<b>35,6</b>	<b>35,2</b>	<b>40,3</b>	<b>17,6</b>	<b>16,9</b>	<b>15,7</b>	<b>14,9</b>	<b>14,0</b>	<b>23,1</b>	<b>22,3</b>	<b>23,0</b>	<b>21,9</b>

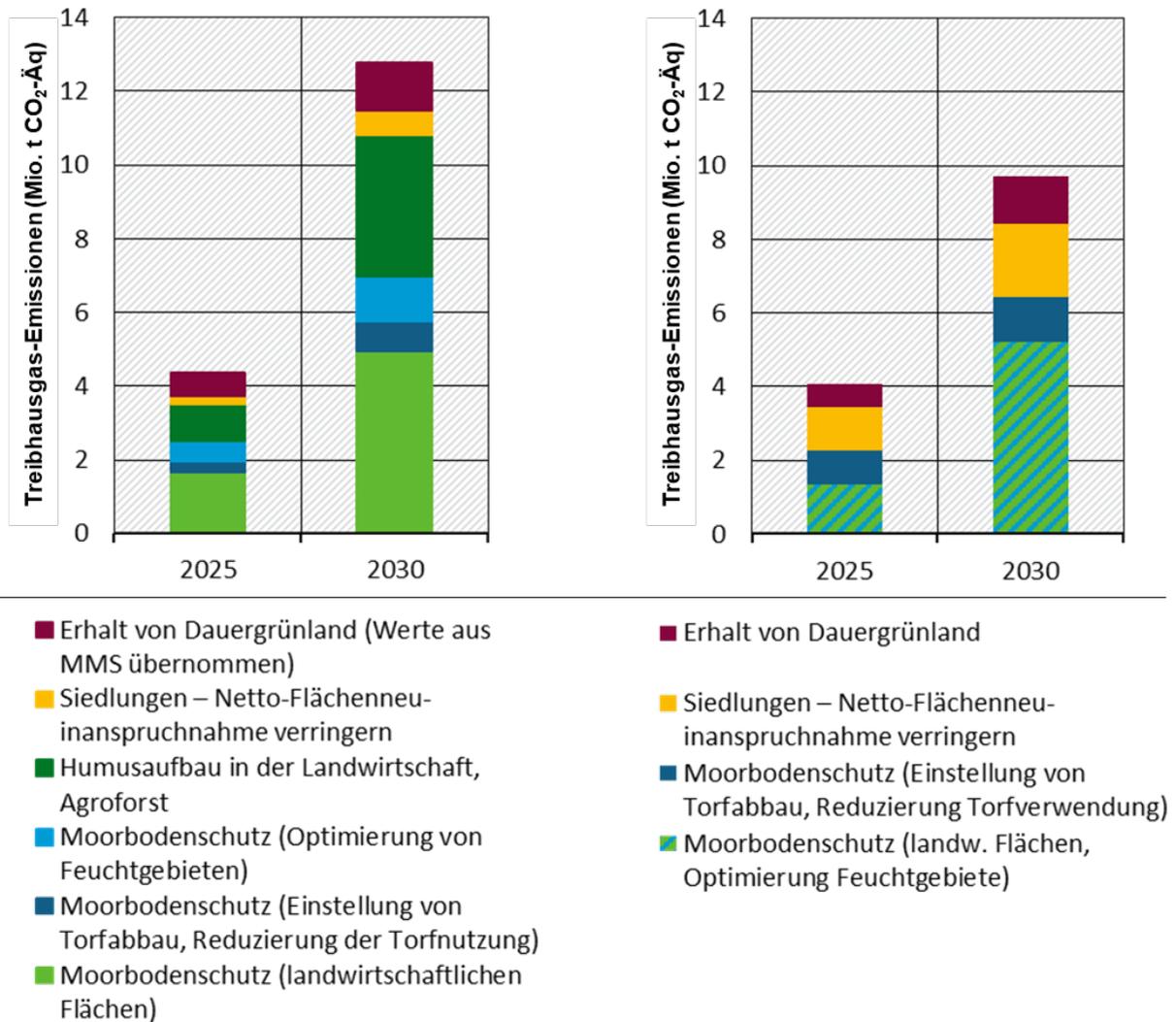
Quelle: Öko-Institut et al. (2021), S. 304-305, Abschnitt 11.3.1.

### 12.5.4 Vergleich der Szenarien

Der direkte Vergleich von MMS und KIS-2030 zeigt für das Jahr 2030 große Unterschiede von gut 45 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (siehe Abbildung 105). Dieser Unterschied ist vor allem in der unterschiedlichen Abbildung der lebenden Biomasse auf der Waldfläche begründet (siehe Abschnitt 12.2.2.12.2.3). Für die übrigen Quellgruppen fallen die Unterschiede im Jahr 2030 deutlich geringer aus. Dennoch ist eine direkte Vergleichbarkeit auch dieser Ergebnisse nur eingeschränkt möglich, da es bei der Modellierung mit unterschiedlichen Tools bereits zu Abweichungen kommen kann, die die Effekte aus Instrumenten und Maßnahmen überlagern. Dies zeigt sich z. B. an der Treibhausgasminderung, die im MMS und im KIS-2030 gegenüber dem Jahr 2018 erreicht wird (Abbildung 106). Im KIS-2030 wird ein ambitionierterer Moorbodenschutz angenommen, was zu einer höheren Treibhausgasminderung im Vergleich zum MMS führt. Die Senkenleistung durch Agroforst bzw. Kurzumtriebsplantagen ist im KIS-2030 berücksichtigt, nicht aber im MMS.

MMS wird der Verringerung der Netto-Flächenneuanspruchnahme (Siedlungen) ein deutlich stärkerer Effekt zugeschrieben, obwohl im KIS-2030 ambitioniertere Annahmen hinterlegt sind.

**Abbildung 106: Treibhausgasminderung im KIS-2030 und MMS (ohne Wald und Holzprodukte) gegenüber 2018, 2025-2030**



Quelle: a) Modellrechnungen Öko-Institut; b) Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021).

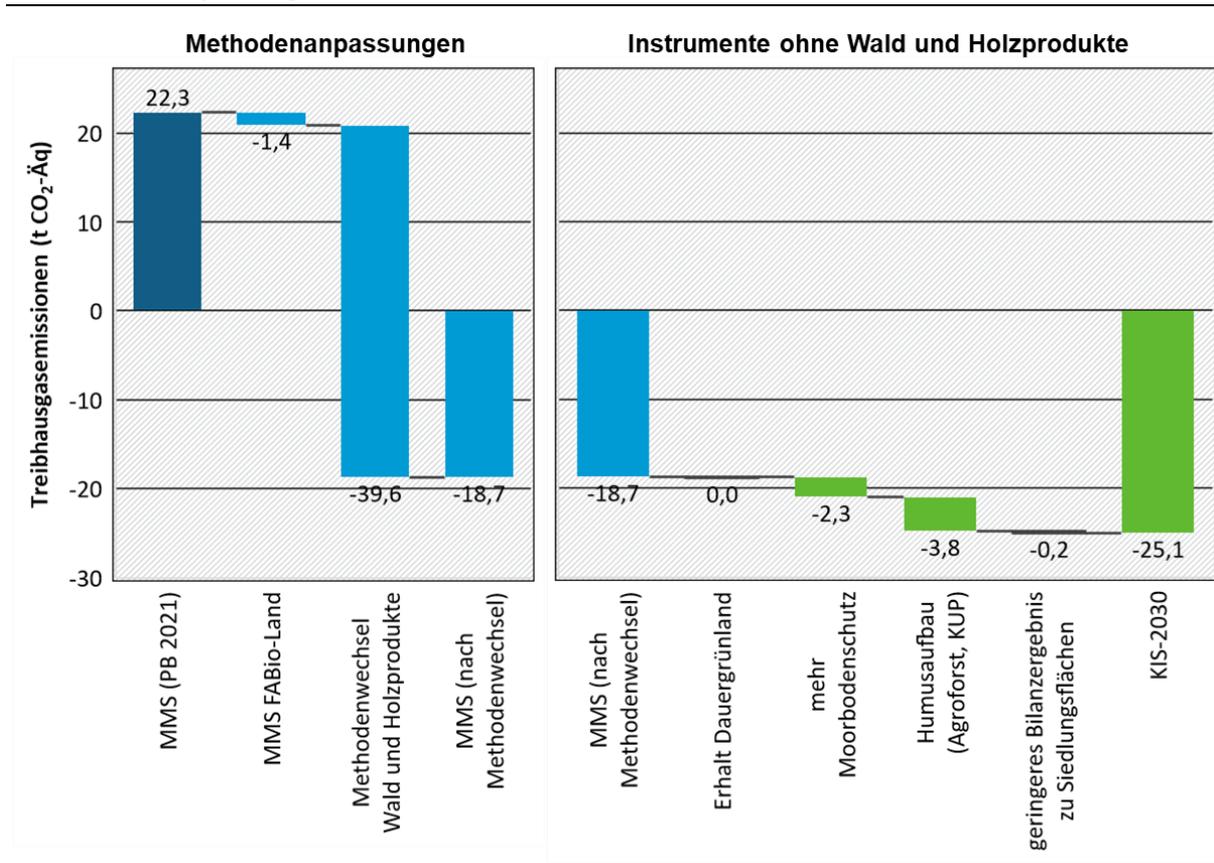
Um die Wirkung der Instrumente besser bewerten zu können, wurde das MMS auch mit FABio-Land berechnet. Ausgehend von den Ergebnissen des MMS im Projektionsbericht 2021 wurde als erstes festgestellt, dass durch den Methodenwechsel hin zu FABio-Land die Ergebnisse für das MMS um -1,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq abweichen (Abbildung 107 und Tabelle 131). Dieser Effekt liegt voraussichtlich in der unterschiedlichen Bewertung der Siedlungsflächen (vgl. Abbildung 106). Ausgehend vom neu berechneten MMS bewirken die veränderten Annahmen zur Treibhausgasbilanz im Wald eine Veränderung um 39,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Diese Veränderung kann aber nur schwer Instrumenten zugeordnet werden, da es sich vielmehr um einen Systemwechsel in der Modellierung handelt.

Ausgehend von dieser Situation kann nun die Wirkung der weiteren Instrumente im KIS-2030 gegenüber dem MMS analysiert werden. Der Grünlanderhalt bewirkt keine weitere Treibhausgasminderung. Dies resultiert dadurch, dass bereits seit 2015 der Erhalt von Dauergrünland erfolgreich umgesetzt wird und die Fortführung der Instrumente in vergleichbarer Weise bis zum

Jahr 2030 wirkt. Im Projektionsbericht 2021 wird dem Grünlanderhalt eine Treibhausgasminde-  
 rung von 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq zugewiesen. Hierzu wurde angenommen, dass ohne neue Regelungen  
 in der GAP Grünland wieder vermehrt umgewandelt würde. Diese kontrafaktische Analyse wird  
 von den LULUCF-Expertinnen und -Experten dieser Studie als fragwürdig angesehen, da für die  
 Bewertung nicht angenommen werden sollte, dass erreichte Standards wieder zurückgenom-  
 men werden.

Der Moorbodenschutz wird im KIS-2030 auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ambitionier-  
 ter umgesetzt, so dass sich bis zum Jahr 2030 eine zusätzliche Treibhausgasminde-  
 rung von -2,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq ergibt. Der Humusaufbau durch Agroforst bzw. Kurzumtriebsplantagen, der im  
 MMS nicht berücksichtigt wird, wird im KIS-2030 mit -3,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq angegeben. Die Verrin-  
 gerung der Netto-Flächeninanspruchnahme im KIS-2030 führt zum MMS zu einer Treibhausgas-  
 minderung von -0,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. In Summe wird so im KIS-2030 im Jahr 2030 eine Treibhaus-  
 gasbilanz von -25,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq erreicht.

**Abbildung 107: Treibhausgasminde-  
 rung durch Instrumente und Auswirkungen methodischer An-  
 passungen**



Quelle: Eigene Berechnung, Öko-Institut

**Tabelle 131: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	-30,5	-15,2	-29,3				
MMS				13,6	17,9	18,6	17,6
KIS-2030				-18,7	-27,4	-36,2	-43,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-18,7	-27,4	-36,2	-43,1
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,9	0,9	1,0				
MMS				1,4	2,6	2,6	2,6
KIS-2030				0,8	0,9	1,1	1,3
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,8	0,9	1,1	1,3
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,8	1,0	1,4				
MMS				1,8	1,8	1,8	1,7
KIS-2030				1,5	1,5	1,5	1,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				1,5	1,5	1,5	1,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	-28,8	-13,4	-26,9				
MMS				16,9	22,3	23,0	21,9
KIS-2030				-16,4	-25,1	-33,7	-40,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-16,4	-25,1	-33,7	-40,4
<b>Veränderung ab 1990 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	Aufgrund des Wechsels von negativen zu positiven Werten ist keine Angabe in relativen Werten möglich.						
MMS							
KIS-2030							
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)							
<b>Veränderung ab 2005 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	Aufgrund des Wechsels von negativen zu positiven Werten ist keine Angabe in relativen Werten möglich.						
MMS							
KIS-2030							
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)							

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Öko-Institut für KIS-2030



Der gesamte Primärenergieverbrauch sank historisch von 14.579 PJ im Jahr 2008<sup>114</sup> bereits um knapp 11 % auf 12.989 PJ im Jahr 2018, dem Basisjahr der Modellierung. Gegenüber der Historie beschleunigt sich der Rückgang des Primärenergieverbrauchs deutlich und liegt im Jahr 2030 mit 9.263 PJ um gut 36 % niedriger als 2008.

Da sich die Verbräuche der einzelnen Energieträger in Folge der Instrumente und Maßnahmen sehr unterschiedlich entwickeln, kommt es zu einer deutlichen Verschiebung der Struktur des Primärenergieverbrauchs. Durch den Atomausstieg zum Jahresende 2022 geht der Einsatz von Kernenergie zur Stromerzeugung auf null zurück. Die Stilllegung aller Kohlekraftwerke bis Ende 2029 führt dazu, dass der Verbrauch von Braunkohle zwischen 2018 und 2030 um 99 % und der Verbrauch von Steinkohle um 81 % sinkt. Die verbleibende Steinkohle wird vor allem in der Industrie genutzt. Der Primärenergieverbrauch von Mineralöl geht zwischen 2018 und 2030 um 32 % zurück. Trotz dieses deutlichen Rückgangs ist Mineralöl auch im Jahr 2030 noch der wichtigste Primärenergieträger. Der Primärenergieverbrauch von fossilen Gasen (worunter Erdgas das wichtigste ist), geht von 2018 bis 2030 um 26 % zurück.

Der Rückgang der fossilen Energieträger wird durch zwei wesentliche Komponenten kompensiert: Zum einen geht der Primärenergieverbrauch zurück, zum anderen werden sie durch erneuerbare Energieträger ersetzt. Gegenüber dem Basisjahr 2018 wachsen die erneuerbaren Energien bis 2030 in Summe um 82 %, was einem Wachstum um den Faktor 2,7 gegenüber dem Referenzjahr 2008 entspricht. Der größte absolute Anstieg zur Primärenergieverbrauchsdeckung erfolgt bei der Windenergie, die sich bis 2030 gegenüber 2018 beinahe verdreifacht. Obwohl der Verbrauch an Biomasse zwischen 2018 und 2030 um 7 % zurückgeht, verbleibt Biomasse im Jahr 2040 zweitwichtigster erneuerbarer Energieträger. Die Solarenergie wächst zwischen 2018 und 2030 um mehr als den Faktor 4, während Geothermie und Umweltwärme im gleichen Zeitraum um den Faktor 3 steigen. Die Wasserkraft hingegen wächst in diesem Zeitraum nur moderat (17 %). Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am gesamten Primärenergieverbrauch von knapp 14 % im Jahr 2018 auf gut 35 % im Jahr 2030. Nicht eingerechnet sind dabei die importierten strombasierten Energieträger (E-Fuels), die im Jahr 2030 etwa 2 % des Primärenergieverbrauchs ausmachen.

<sup>114</sup> Das Jahr 2008 wurde aus zwei Gründen als Referenzjahr gewählt: Zum einen ist es das Referenzjahr im Energiekonzept der Bundesregierung (Bundesregierung (2010)) für die dortigen Primärenergieverbrauchsminderungsziele (20 % bis 2020 und 50 % bis 2050). Auch in der Energieeffizienzstrategie der Bundesregierung (BMWi (2019)), die eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs bis 2030 um 30 % vorsieht, ist 2008 das Bezugsjahr.

**Tabelle 132: Primärenergieverbrauch im KIS-2030 nach Energieträgern, 2008-2040**

Energieträger	2008	2015	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ						
Braunkohle	1.566	1.567	1.468	331	12	7	4
Steinkohle	1.823	1.727	1.380	639	256	147	104
Mineralöl	4.974	4.535	4.341	3.822	2.939	2.143	1.674
Fossile Gase	3.260	2.924	3.114	3.354	2.383	1.431	698
Abfall (fossil)	207	249	241	210	188	186	184
Kernenergie	1.623	1.001	829	0	0	0	0
Biomasse*	927	1.123	1.072	1.053	994	893	836
Windenergie	149	290	396	635	1.164	1.607	1.899
Wasserkraft	74	68	65	75	76	76	76
Solarenergie	31	168	197	418	819	1.177	1.496
Geothermie und Umweltwärme	17	41	61	77	207	335	406
Stromhandelssaldo	-72	-174	-175	112	61	-145	-345
Strombasierte Energieträger	0	0	0	32	165	522	819
<b>PEV gesamt**</b>	<b>14.579</b>	<b>13.519</b>	<b>12.989</b>	<b>10.754</b>	<b>9.263</b>	<b>8.378</b>	<b>7.852</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-7,3 %</i>	<i>-10,9 %</i>	<i>-26,2 %</i>	<i>-36,5 %</i>	<i>-42,5 %</i>	<i>-46,1 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>8,2 %</i>	<i>12,5 %</i>	<i>13,8 %</i>	<i>21,0 %</i>	<i>35,2 %</i>	<i>48,8 %</i>	<i>60,0 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020c; 2020e), Übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkungen: \* einschließlich organischer Anteile des Abfalls. \*\* ohne Brennstoffeinsatz des internationalen Seeverkehrs (Hochseebunkerungen).

Im Jahr 2018 importierte Deutschland netto<sup>115</sup> 9.247 PJ an Energie, etwa 71 % des Primärenergieverbrauchs. Der Großteil davon entfiel (8.620 PJ) auf die fossilen Brennstoffe Steinkohle, Mineralöl und Gase. Die Mineralölimporte machten mit 47 % knapp die Hälfte aller Nettoimporte und Erdgas mit 32 % knapp einem Drittel der Nettoimporte aus. Neben den Importen fossiler Brennstoffe waren 2018 ebenso die Importe von Kernenergie (829 PJ) bedeutend. Dazu kommen noch kleine Importe von Bioenergie (5 PJ). Bei Strom und Braunkohle war Deutschland im Jahr 2018 jeweils Nettoexporteur. Im KIS-2030 sinken bis 2030 die Nettoimporte insgesamt um 41 % auf 5.444 PJ und die Importe fossiler Energieträger um 43 % auf 5.315 PJ. Die Importe an Steinkohle werden in diesem Zeitraum um 80 %, die Importe von Mineralöl um 35 % und die

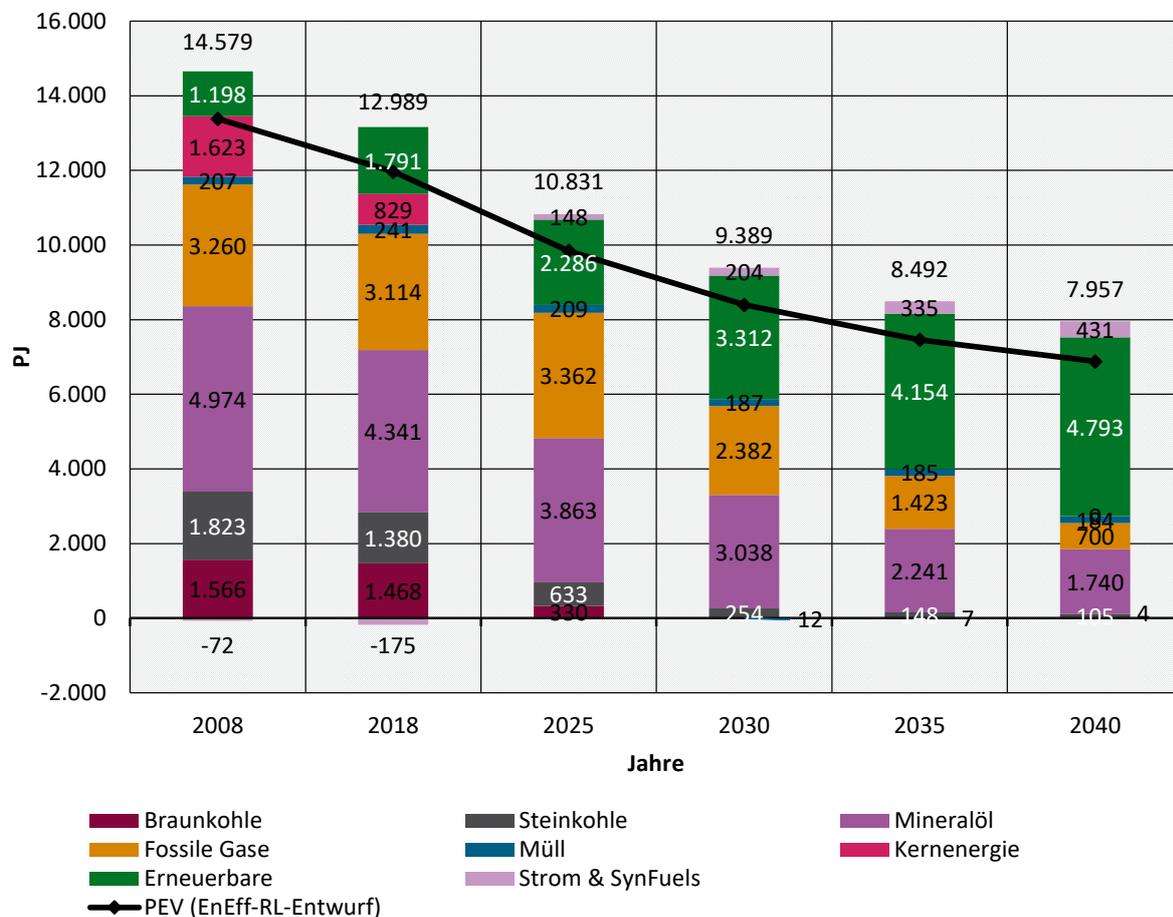
<sup>115</sup> Nettoimporte werden jeweils pro Energieträger(gruppe) als Primärenergieverbrauch minus inländischer Förderung berechnet. Die Szenariodaten zur inländischen Förderung fossiler Energieträger entsprechen den in Abschnitt 6.3 hinterlegten Daten. Mangels Daten zur inländischen Biomasseerzeugung wurde für Biomasse vereinfacht Primärenergieverbrauch gleich Erzeugung gesetzt. Die übrigen erneuerbaren Energien gelten per statistischer Definition als inländische Erzeugung (auch Offshore Wind).

Importe von fossilen Gasen (v.a. Erdgas) um 26 % reduziert. Damit geht insbesondere auch eine Reduktion der Abhängigkeit von Importen aus Russland einher.

### 13.2.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Die folgende Abbildung 109 stellt die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 dar. Darüber hinaus sind in Tabelle 132 detaillierte Ergebnisse für einzelne Energieträger aufgeführt.

**Abbildung 109: Primärenergieverbrauch im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) nach Energieträgern, 2008-2040**



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020a, 2020b), Übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Im Jahr 2030 liegt der Primärenergieverbrauch mit 9.389 PJ um knapp 36 % niedriger als 2008.

Der Verbrauch von Braunkohle zwischen dem Basisjahr 2018 und 2030 geht um 99 % und der Verbrauch von Steinkohle um 82 % zurück. Der Primärenergieverbrauch von Mineralöl geht zwischen 2018 und 2030 um 30 % zurück, verbleibt aber auch im Jahr 2030 noch der wichtigste Primärenergieträger. Der Verbrauch von fossilen Gasen geht zwischen 2018 und 2030 um knapp 24 % zurück.

Gegenüber dem Basisjahr 2018 wachsen die erneuerbaren Energien in Summe um 85 %, was einem Wachstum um den Faktor 2,8 gegenüber dem Referenzjahr 2008 entspricht. Der größte absolute Anstieg zur Primärenergieverbrauchsdeckung erfolgt bei der Windenergie, die sich bis 2030 gegenüber 2018 beinahe verdoppelt. Der Verbrauch an Biomasse geht zwischen 2018 und 2030 um 2 % zurück. Die Solarenergie wächst zwischen 2018 und 2030 um mehr als den Faktor

4, während Geothermie und Umweltwärme im gleichen Zeitraum um den Faktor 3 steigen. Die Wasserkraft hingegen wächst in diesem Zeitraum nur moderat (17 %). Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am gesamten Primärenergieverbrauch von knapp 14 % im Jahr 2018 auf gut 35 % im Jahr 2030. Nicht eingerechnet sind dabei die importierten strombasierten Energieträger (E-Fuels), die im Jahr 2030 etwa 2 % des Primärenergieverbrauchs ausmachen.

**Tabelle 133: Primärenergieverbrauch im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) nach Energieträgern, 2008-2040**

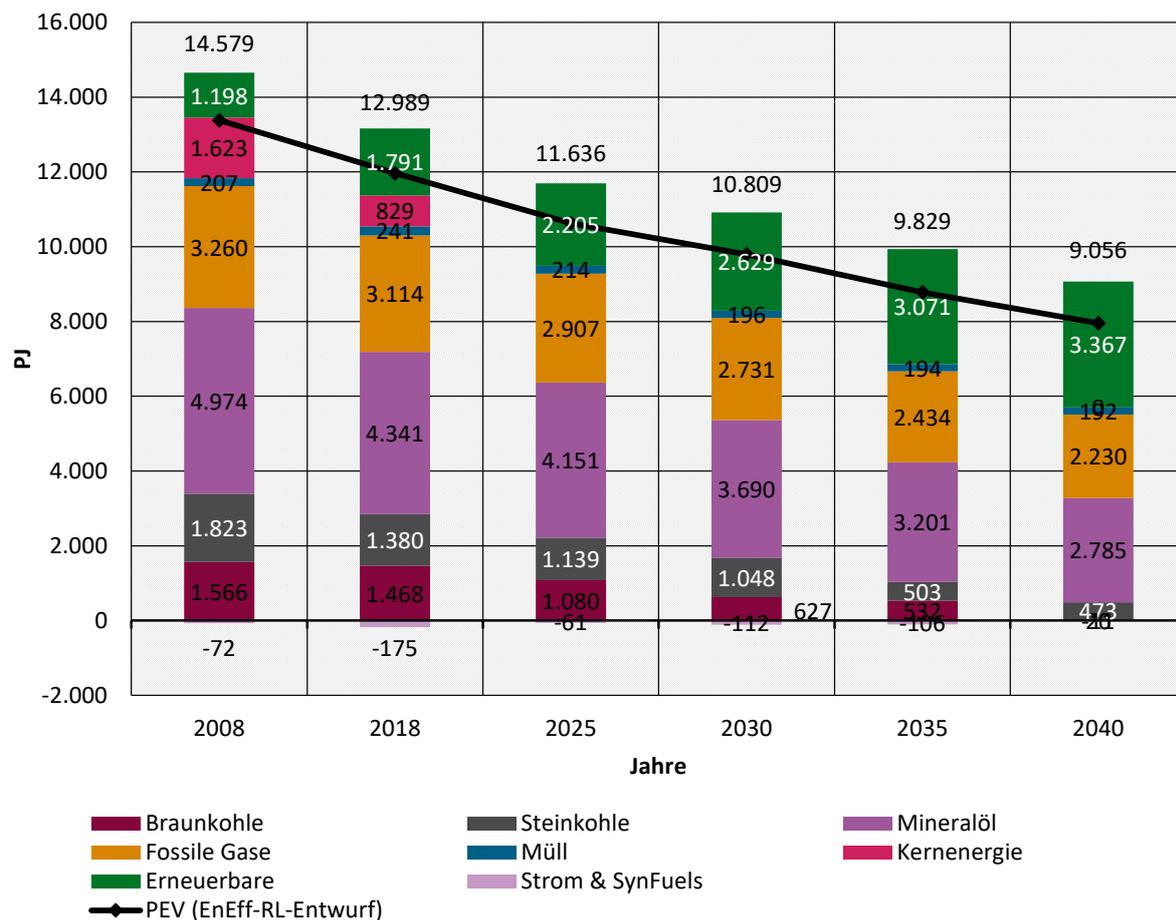
Energieträger	2008	2015	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ						
Braunkohle	1.566	1.567	1.468	330	12	7	4
Steinkohle	1.823	1.727	1.380	633	254	148	105
Mineralöl	4.974	4.535	4.341	3.863	3.038	2.241	1.740
Fossile Gase	3.260	2.924	3.114	3.362	2.382	1.423	700
Abfall (fossil)	207	249	241	209	187	185	184
Kernenergie	1.623	1.001	829	0	0	0	0
Biomasse*	927	1.123	1.072	1.083	1.054	965	914
Windenergie	149	290	396	635	1.163	1.603	1.901
Wasserkraft	74	68	65	75	76	76	76
Solarenergie	31	168	197	417	816	1.177	1.498
Geothermie und Umweltwärme	17	41	61	76	203	333	404
Stromhandelssaldo	-72	-174	-175	111	42	-165	-381
Strombasierte Energieträger	0	0	0	37	161	500	812
<b>PEV gesamt**</b>	<b>14.579</b>	<b>13.519</b>	<b>12.989</b>	<b>10.831</b>	<b>9.389</b>	<b>8.492</b>	<b>7.957</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-7,3 %</i>	<i>-10,9 %</i>	<i>-25,7 %</i>	<i>-35,6 %</i>	<i>-41,8 %</i>	<i>-45,4 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>8,2 %</i>	<i>12,5 %</i>	<i>13,8 %</i>	<i>21,1 %</i>	<i>35,3 %</i>	<i>48,9 %</i>	<i>60,2 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020c; 2020e), Übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkungen: \* einschließlich organischer Anteile des Abfalls. \*\* ohne Brennstoffeinsatz des internationalen Seeverkehrs (Hochseebunkerungen).

### 13.2.3 MMS

„Einen Überblick über die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im MMS bietet [Abbildung 110]. Detaillierte Ergebnisse können [Tabelle 134] entnommen werden“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Abbildung 110: Primärenergieverbrauch im MMS nach Energieträgern, 2008-2040**

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

„Der gesamte Primärenergieverbrauch sinkt im MMS von 14.579 PJ im Jahr 2008<sup>116</sup> auf 10.791 PJ im Jahr 2030 (-26 %). Mit dieser Entwicklung geht eine Verschiebung der Struktur des Primärenergieverbrauchs einher. Der Primärenergieverbrauch von Mineralöl sinkt bis 2030 um 26 %, dennoch bleibt Mineralöl bis 2030 der wichtigste Primärenergieträger. Der Verbrauch von Braun- und Steinkohle geht von 2008 bis 2030 um 1.714 PJ (-49 %) zurück. Der Einsatz der Kernenergie zur Stromerzeugung geht aufgrund des Atomausstiegs nach 2022 auf null zurück. Der Verbrauch an fossilen Gasen sinkt bis 2030 um 16 %.

Ein starker Zuwachs ist vor allem bei den erneuerbaren Energieträgern festzustellen, wo sich bis 2030 eine Verdopplung gegenüber dem Niveau von 2008 einstellt. In erster Linie ist dies auf ein deutliches Ansteigen der Windenergie und der Solarenergie zurückzuführen. Damit steigt der Anteil der erneuerbaren Energieträger am gesamten Primärenergieverbrauch von 8 % (2008) bzw. 14 % (2018) auf 24 % im Jahr 2030“ (Öko-Institut et al. 2021).

<sup>116</sup> Das Jahr 2008 wurde als Vergleichsjahr gewählt, da das Energiekonzept der Bundesregierung Primärenergieverbrauchsminderungsziele gegenüber diesem Jahr formuliert hat (20 % bis 2020 und 50 % bis 2050).

**Tabelle 134: Primärenergieverbrauch im MMS, 2008-2040**

Energieträger	2008	2015	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ						
Braunkohle	1.566	1.567	1.468	1.080	627	532	20
Steinkohle	1.823	1.727	1.380	1.139	1.048	503	473
Mineralöl	4.974	4.535	4.341	4.151	3.690	3.201	2.785
Fossile Gase	3.260	2.924	3.114	2.907	2.731	2.434	2.230
Abfall (fossil)	207	249	241	214	196	194	192
Kernenergie	1.623	1.001	829	0	0	0	0
Biomasse*	927	1.123	1.072	1.172	1.209	1.110	1.040
Windenergie	149	290	396	589	799	1.161	1.411
Wasserkraft	74	68	65	75	76	76	76
Solarenergie	31	168	197	300	434	552	609
Geothermie und Umweltwärme	17	41	61	61	93	145	196
Stromhandelssaldo	-72	-174	-175	-61	-143	-168	-74
Strombasierte Brenn- und Kraftstoffe	0	0	0	0	31	62	62
<b>PEV gesamt**</b>	<b>14.579</b>	<b>13.519</b>	<b>12.989</b>	<b>11.627</b>	<b>10.791</b>	<b>9.802</b>	<b>9.021</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-7,3 %</i>	<i>-10,9 %</i>	<i>-20,2 %</i>	<i>-26,0 %</i>	<i>-32,8 %</i>	<i>-38,1 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>8,2 %</i>	<i>12,5 %</i>	<i>13,8 %</i>	<i>18,9 %</i>	<i>24,2 %</i>	<i>31,1 %</i>	<i>36,9 %</i>

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

Anmerkungen: \* einschließlich organischer Anteile des Abfalls. \*\*ohne Brennstoffeinsatz des internationalen Seeverkehrs (Hochseebunkerungen).

### 13.2.4 Vergleich der Szenarien

In Tabelle 135 ist der Vergleich der Primärenergieverbrauch der drei Szenarien im Jahr 2030 den historischen Werten des Basisjahrs 2018 und des Referenzjahrs 2008 gegenübergestellt. In den vorhergehenden Abschnitten ist der Primärenergieverbrauch entsprechend der nationalen Systematik berechnet worden. Zusätzlich ist in Tabelle 135 entsprechend der europäischen Systematik ausgewiesen. Im Unterschied zur nationalen Systematik sind in der europäischen Systematik weder der nichtenergetische Verbrauch fossiler Energieträger noch der Endenergieverbrauch von Umweltwärme enthalten.

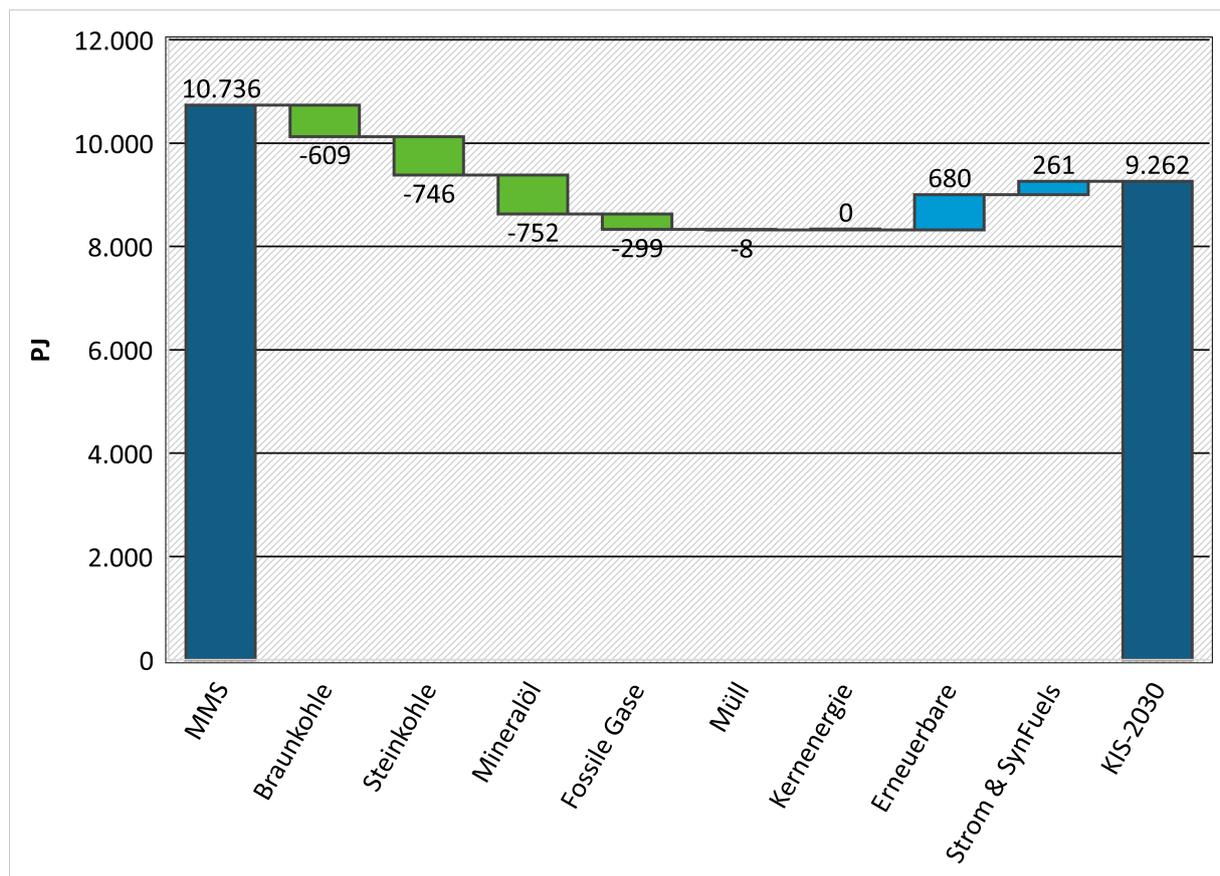
**Tabelle 135: Vergleich der Primärenergieverbräuche nach unterschiedlichen Bilanzierungssystemen**

	2008	2018	2030 KIS-2030	2030 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	2030 MMS
Primärenergieverbrauch (national)	14.579	12.989	9.263	9.389	10.791
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-10,9 %</i>	<i>-36,5 %</i>	<i>-35,6 %</i>	<i>-26,0 %</i>
Primärenergieverbrauch (EnEff-RL)	13.383	11.967	8.268	8.399	9.797
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-10,6 %</i>	<i>-38,2 %</i>	<i>-37,2 %</i>	<i>-26,8 %</i>

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021) für das MMS, Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut für das KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG)

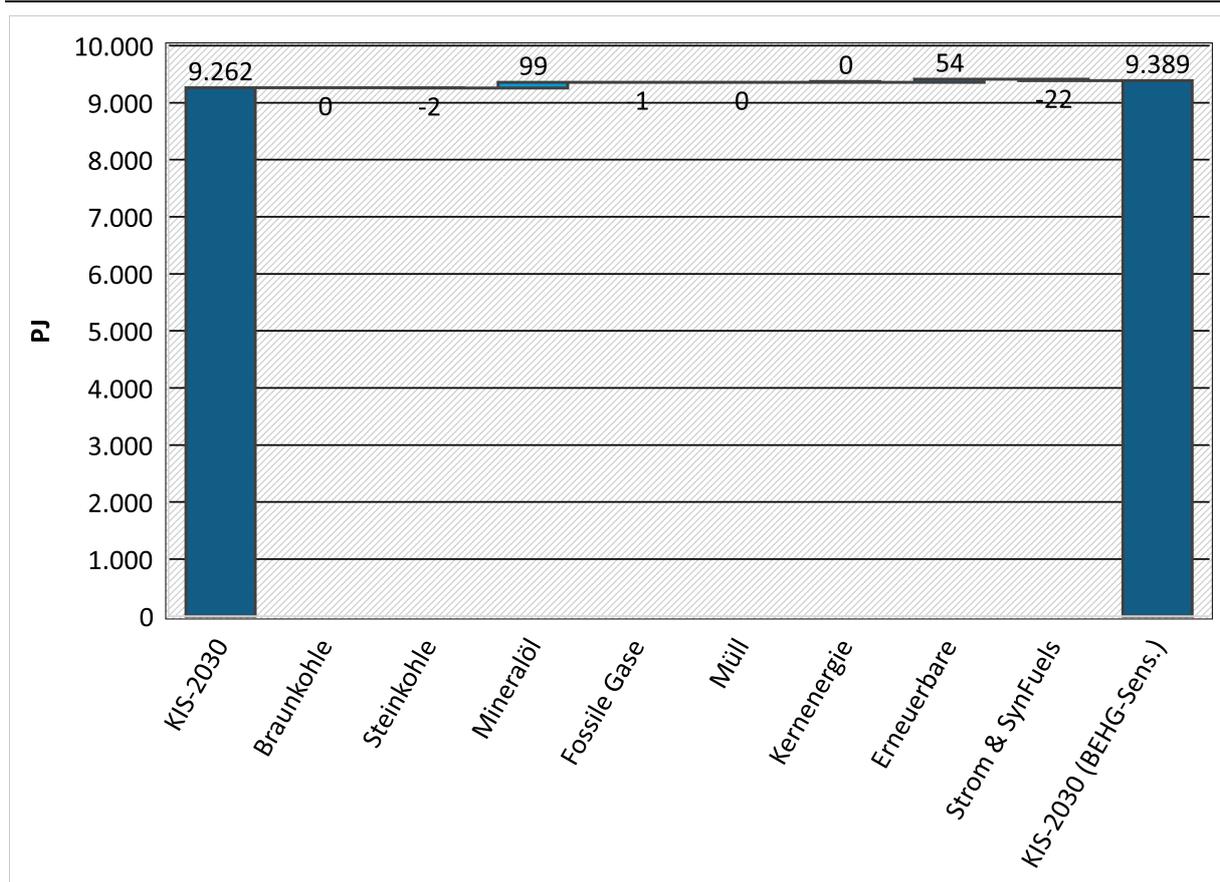
In der nationalen Abgrenzung liegt der Primärenergieverbrauch im Jahr 2030 des KIS-2030 um gut 36 % niedriger als der Vergleichswert 2008. Dies ist eine um zehn Prozentpunkte höhere Reduktion als im MMS. Der niedrigere CO<sub>2</sub>-Preis in der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 führt zu einer um einen Prozentpunkt niedrigeren Reduktion des Primärenergieverbrauchs.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Primärenergieverbrauch in der europäischen Abgrenzung im Sinne der Energieeffizienz-Richtlinie (EnEff-RL). In dieser Abgrenzung ist die Reduktion des Primärenergieverbrauchs im Jahr 2030 des KIS-2030 mit 38 % noch etwas höher als in der nationalen Abgrenzung. Der Unterschied zum MMS beträgt in dieser Abgrenzung sogar elf Prozentpunkte. Auch hier führt die Sensitivitätsrechnung des BEHG-CO<sub>2</sub>-Preises zu einer um einen Prozentpunkt niedrigeren Reduktion des Primärenergieverbrauchs.

**Abbildung 111: Veränderung des Primärenergieverbrauchs im KIS-2030 gegenüber dem MMS, 2030**

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

In Abbildung 111 ist der Unterschied zwischen KIS-2030 und MMS nach Energieträgern dargestellt. Dabei wurden die gleichen Gruppierungen wie in den Abbildung 108 und Abbildung 110 gewählt. Bei allen Arten fossiler Energieträger gibt es im Jahr 2030 gegenüber dem MMS weitere Verbrauchsrückgänge. Bei der Kohle wirken insbesondere der frühere Ausstieg aus der Kohleverstromung, bei Mineralöl und fossilen Gasen vor allem Instrumente in den KSG-Sektoren Gebäude und Verkehr. Ein Teil des Primärenergierückgangs wird durch mehr erneuerbare Energien durch höher Importe von Strom und strombasierten Brennstoffen (SynFuels) kompensiert.

**Abbildung 112: Veränderung des Primärenergieverbrauchs BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030, 2030**

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

Die BEHG-Sensitivität mit einem niedrigeren CO<sub>2</sub>-Preis bewirkt im Jahr 2030 beim Primärenergieverbrauch vor allem einen höheren Verbrauch an Mineralöl und einen höheren Verbrauch an erneuerbaren Energieträgern. Gleichzeitig führt der niedrigere CO<sub>2</sub>-Preis zu einem niedrigeren Import von Strom und synthetischen Brennstoffen. Bei den übrigen Energieträgern gibt es nur marginale Unterschiede. Speziell bei fossilen Gasen, die vor allem aus Erdgas bestehen, kompensieren sich höhere Endverbräuche und niedrigerer Einsatz in Kraftwerken durch niedrigere Stromverbräuche nahezu vollständig.

### 13.3 Energetischer Einsatz von Biomasse

#### 13.3.1 KIS-2030

In Tabelle 136 ist die Entwicklung des energetischen Einsatzes von Biomasse in den einzelnen KSG-Sektoren im Zeitverlauf des KIS-2030 dargestellt. Über alle Sektoren hinweg ist die Nutzung von Bioenergie rückläufig, im Szenarienjahr 2030 liegt der Einsatz um knapp 7 % niedriger als im Basisjahr 2018.

**Tabelle 136: Energetischer Einsatz von Biomasse nach KSG-Sektoren im KIS-2030, 2018-2040**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Energiewirtschaft	468	349	335	322	341
Industrie	165	234	217	187	158
Gebäude	283	311	296	280	263
Verkehr	113	124	113	63	33
Landwirtschaft	36	35	34	35	34
<b>Bioenergie insgesamt</b>	<b>1.065</b>	<b>1.053</b>	<b>993</b>	<b>886</b>	<b>829</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>		-1,1 %	-6,8 %	-16,8 %	-22,2 %

Quelle: (UBA 2020c; 2020e), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Die Energiewirtschaft ist im Basisjahr der größte Nutzer von Bioenergie. Der energetische Verbrauch von Biomasse, insbesondere von Biogas, geht hier bis 2030 zwar mit einer Reduktion von 29 % um fast ein Drittel zurück, verbleibt aber größte Nutzer von Bioenergie. Im Kontrast dazu steigt der Verbrauch von Bioenergie in der Industrie im gleichen Zeitraum um fast ein Drittel (+31 %). Im Gebäudesektor steigt die Bioenergienutzung kurzfristig sehr deutlich an, sinkt dann aber wieder. Im Jahr 2030 liegt die Bioenergienutzung 5 % höher als im Basisjahr, sinkt aber in den folgenden Jahren unter das Ausgangsniveau ab. Ebenso steigt der Verbrauch von Biokraftstoffen zunächst an, liegt dann im Jahr 2030 wieder auf der Höhe des Basisjahrs und sinkt in den Folgejahren dann sehr deutlich ab. Im Vergleich zu den anderen Sektoren ändert sich die Bioenergienutzung in der Landwirtschaft nur geringfügig.

### 13.3.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Tabelle 137 ist die Entwicklung des energetischen Einsatzes von Biomasse in den einzelnen KSG-Sektoren im Zeitverlauf der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 dargestellt. Über alles Sektoren hinweg steigt die Nutzung von Bioenergie zunächst an, sinkt dann aber wieder ab und liegt 2030 dann 2030 auf dem Niveau des Basisjahres.

**Tabelle 137: Energetischer Einsatz von Biomasse nach KSG-Sektoren im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität, 2018-2040)**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Energiewirtschaft	468	350	335	322	341
Industrie	165	232	214	185	157
Gebäude	283	341	353	347	337
Verkehr	113	125	116	68	38
Landwirtschaft	36	35	34	35	34

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
<b>Bioenergie insgesamt</b>	<b>1.065</b>	<b>1.083</b>	<b>1.053</b>	<b>958</b>	<b>907</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>		1,6 %	-1,1 %	-10,1 %	-14,8 %

Quelle: (UBA 2020c; 2020e), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Die Energiewirtschaft ist im Basisjahr der größte Nutzer von Bioenergie. Der energetische Verbrauch von Biomasse sinkt bis 2030 um 28 %. Der Verbrauch von Bioenergie in der Industrie steigt im gleichen Zeitraum um 30 %. Im Gebäudesektor steigt die Bioenergienutzung bis 2030 um 25 %. Im Verkehr steigt der Verbrauch von Biokraftstoffen zunächst an, sinkt aber wieder ab, liegt aber 2030 um 3 % höher als 2018. Im Vergleich zu den anderen Sektoren ändert sich die Bioenergienutzung in der Landwirtschaft nur geringfügig.

### 13.3.3 MMS

In Tabelle 138 ist die Entwicklung des energetischen Einsatzes von Biomasse in den einzelnen KSG-Sektoren im Zeitverlauf des MMS dargestellt. Über alles Sektoren hinweg steigt die Nutzung von Bioenergie an, im Szenarienjahr 2030 liegt der Einsatz um knapp 13 % höher als im Basisjahr 2018.

**Tabelle 138: Energetischer Einsatz von Biomasse nach KSG-Sektoren im MMS, 2018-2040**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Energiewirtschaft	468	419	390	294	290
Industrie	165	192	213	230	211
Gebäude	283	371	403	414	394
Verkehr	113	150	166	135	106
Landwirtschaft	36	32	30	31	32
<b>Bioenergie insgesamt</b>	<b>1.065</b>	<b>1.165</b>	<b>1.202</b>	<b>1.103</b>	<b>1.033</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>		9,3 %	12,9 %	3,5 %	-3,0 %

Quelle: (UBA 2020c; 2020e), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Die Energiewirtschaft ist im Basisjahr der größte Nutzer von Bioenergie. Der energetische Verbrauch von Biomasse, insbesondere von Biogas, geht hier bis 2030 um von 17 % zurück. Im Gegensatz dazu steigt der Verbrauch von Bioenergie in der Industrie bis 2030 um 29 % an. Im Gebäudesektor steigt die Bioenergienutzung sehr deutlich an, im Jahr 2030 liegt der Verbrauch um 42 % höher als im Basisjahr. Der Sektor hat 2030 den größten Anteil an der Bioenergienutzung, wobei der Anstieg bei Gewerbe, Handel und Dienstleistungen deutlich höher ist als bei den privaten Haushalten. Der Verbrauch von Biokraftstoffen im Verkehr erreicht im Jahr 2030 ein Maximum, das um 30 % höher liegt als 2018, sinkt in den Folgejahren aber wieder ab. In der Landwirtschaft sinkt der energetische Einsatz zunächst ab, verbleibt dann aber auf einem Niveau und liegt 2030 um 18 % niedriger als 2018.

### 13.3.4 Vergleich der Szenarien

Tabelle 139 vergleicht den energetischen Einsatz von Biomasse in den drei Szenarien.

**Tabelle 139: Energetischer Einsatz von Biomasse im Vergleich der Szenarien, 2018-2040**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
KIS-2030	1.065	1.053	993	886	829
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	1.083	1.053	958	907	1.083
MMS	1.065	1.165	1.202	1.103	1.033

Quelle: (UBA 2020c; 2020e), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Während die Maßnahmen und Instrumente des MMS dazu führen, dass bis 2030 der energetische Einsatz von Biomasse deutlich ansteigt, führen die Instrumente des KIS-2030 zu einer kontinuierlichen sinkenden Bioenergienutzung. Die Preissensitivität des BEHG führt 2030 zu einem niedrigerem energetischen Einsatz von Biomasse als im KIS 2030, führt aber langfristig zu einer höheren Biomassenutzung.

## 14 Endenergieverbrauch

### 14.1 Methodik

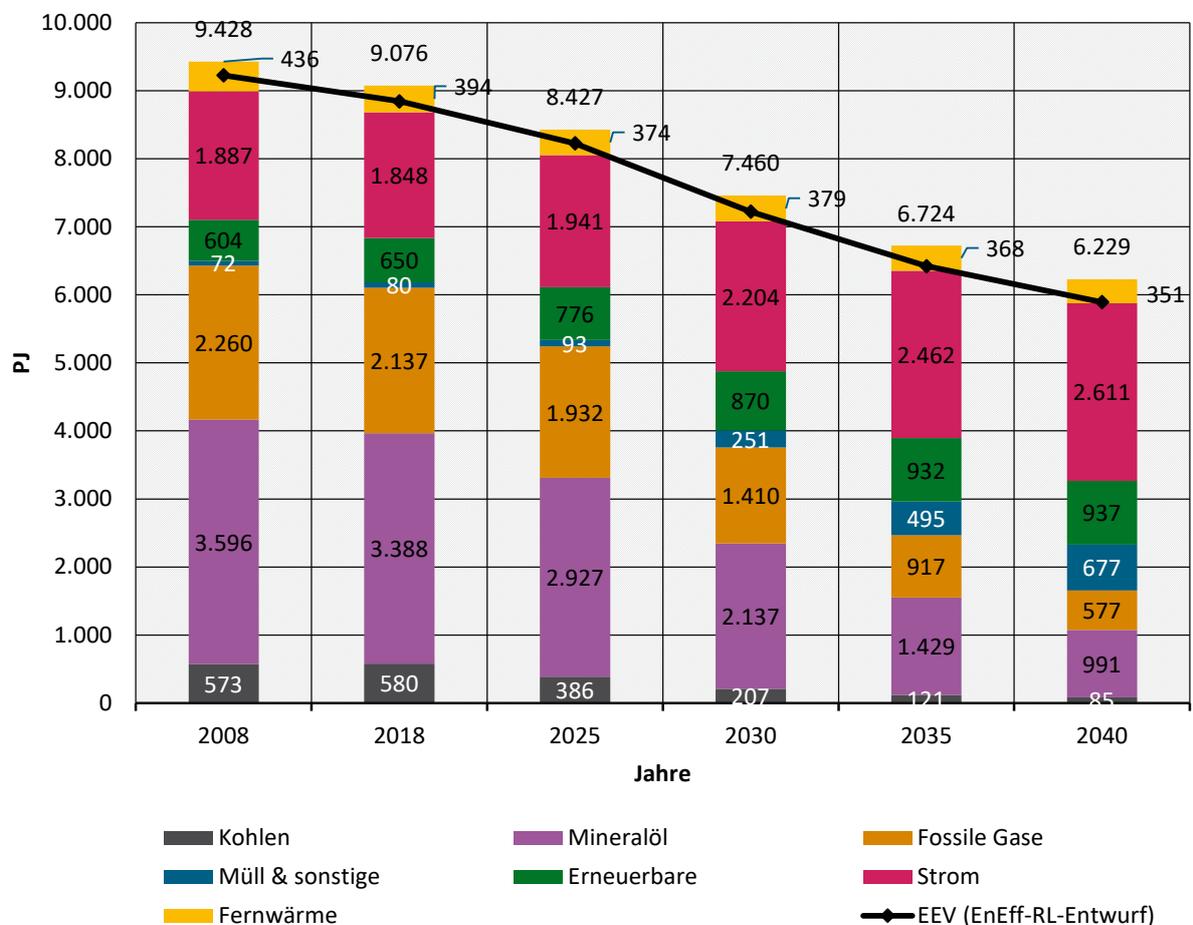
Die grundlegende Methodik zur Berechnung des Endenergieverbrauchs (EEV) ist bereits in Abschnitt 13.1 des Projektionsberichts 2021 (Öko-Institut et al. 2021) beschrieben. Zusätzlich wurde für den Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Zielwerten in Abschnitt 14.2.4 sowie der Darstellung in Diagrammen eine Auswertung entwickelt, die die aggregierten Endenergieverbräuche auf die europäischen Definitionen umrechnen. Der Endenergieverbrauch nach europäischer Definition enthält nicht den Verbrauch von Umweltwärme und die Hochöfen werden anders bilanziert.

### 14.2 Ergebnisse

#### 14.2.1 KIS-2030

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im KIS-2030 ist in Abbildung 113 graphisch dargestellt.

**Abbildung 113: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030, 2008-2040**



Anmerkung: Zusätzlich zum Endenergieverbrauch in nationaler Abgrenzung ist als Linie der Endenergieverbrauch in europäischer Abgrenzung dargestellt, siehe Kapitel 14.2.4.

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020c; 2020e), Übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Der Endenergieverbrauch ist im KIS-2030 deutlich rückläufig und sinkt von 9.076 PJ im Jahr 2018 um knapp 18 % auf 7.460 PJ im Jahr 2030.

Sowohl absolut als auch relativ ist der größte Rückgang des Endenergieverbrauchs zwischen 2018 und 2030 im Verkehr zu verzeichnen (-600 PJ bzw. -22 %), gefolgt von den Haushalten (-445 PJ bzw. -20 %). Im Vergleich dazu ist der relative Rückgang des Endenergieverbrauchs in der Industrie (-13 %) und im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (-16 %) deutlich niedriger (Tabelle 140).

**Tabelle 140: Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im KIS-2030, 2018-2040**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Industrie	2.768	2.600	2.415	2.293	2.225
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	1.332	1.244	1.114	1.020	935
Haushalte	2.260	2.074	1.814	1.605	1.445
Verkehr	2.716	2.509	2.116	1.806	1.624
<b>Endenergieverbrauch gesamt</b>	<b>9.076</b>	<b>8.427</b>	<b>7.460</b>	<b>6.724</b>	<b>6.229</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-7,2 %</i>	<i>-17,8 %</i>	<i>-25,9 %</i>	<i>-31,4 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020c; 2020e), Übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Entsprechend dem Primärenergieverbrauch entwickeln sich die einzelnen Energieträgergruppen auch beim Endenergieverbrauch deutlich unterschiedlich (Tabelle 141). Der Verbrauch von Braunkohlen, die 2018 bereits nur noch 1 % des Endenergieverbrauchs deckten, nimmt von 2018 bis 2030 um etwa 87 % ab. Der Einsatz von Steinkohlen geht bis 2030 um 60 % gegenüber 2018 zurück, entsprechend sinkt der Anteil am EEV von 5 % auf 3 %. Der Verbrauch an Mineralölprodukten geht zwischen 2018 und 2030 um 37 % zurück. Im Jahr 2018 waren die Mineralölprodukte mit einem Anteil von 37 % mit Abstand wichtigster Endenergieträger. Bis 2030 sinkt dieser Anteil auf 29 %. Bei fossilen Gasen, von denen Erdgas mit Abstand das wichtigste ist, und die 2018 einen Anteil von 24 % hatten, geht der Verbrauch bis 2030 um 34 % gegenüber 2018 zurück und der Anteil am Endenergieverbrauch sinkt auf 19 %.

Die Deckung des Endenergieverbrauch erfolgt durch erneuerbare Energien (+83 % im Jahr 2030 ggü. 2018), wobei dieser Anstieg sowohl auf Biomasse als auch auf Solarenergie sowie Geothermie und Umweltwärme entfällt. Der direkte Anteil<sup>117</sup> erneuerbarer Energien steigt von 7 % im Jahr 2018 auf 12 % im Jahr 2030. Der Endenergieverbrauch Strom steigt aufgrund neuer Verbraucher, wie z. B. Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen, bis 2030 um 19 % an. Der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch steigt von 20 % im Jahr 2018 auf 30 % im Jahr 2030 an. Strom verdrängt somit die Mineralölprodukte als wichtigster Endenergieträger. Der Verbrauch von Fernwärme sinkt bis 2030 geringfügig um 4 %, dennoch steigt der Anteil am Endenergieverbrauch von 4 % auf 5 % an. Die strombasierten Brenn- und Kraftstoffe, deren Anteil 2018 noch

<sup>117</sup> Mit „direkter Anteil“ ist hier der Anteil von Biomasse, Solarthermie, Geothermie und Umweltwärme zur direkten Nutzung gemeint in Abgrenzung zum in Strom, Fernwärme und synthetischen Brenn- und Kraftstoffen enthaltenen Anteil erneuerbarer Energien.

so gering ist, dass er in den Energiestatistiken nicht erfasst ist, haben 2030 einen Anteil von 3 % und somit dann einen vergleichbaren Anteil wie Steinkohle.

**Tabelle 141: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030, 2018-2040**

Energieträger	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Braunkohle	87	36	12	6	4
Steinkohle	492	350	196	114	81
Mineralöl	3.388	2.927	2.137	1.429	991
Fossile Gase	2.137	1.932	1.410	917	577
Abfall	67	52	42	37	33
Sonstige	13	0	0	0	0
Biomasse*	566	647	606	524	456
Solarenergie	32	73	114	155	180
Geothermie und Umwelt-	52	56	151	253	302
Strom	1.848	1.941	2.204	2.462	2.611
Fernwärme	394	374	379	368	351
Strombasierte Brenn- Kraftstoffe	0	40	208	458	644
<b>Endenergieverbrauch ge- samt</b>	<b>9.076</b>	<b>8.427</b>	<b>7.460</b>	<b>6.724</b>	<b>6.229</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-7,2 %</i>	<i>-17,8 %</i>	<i>-25,9 %</i>	<i>-31,4 %</i>

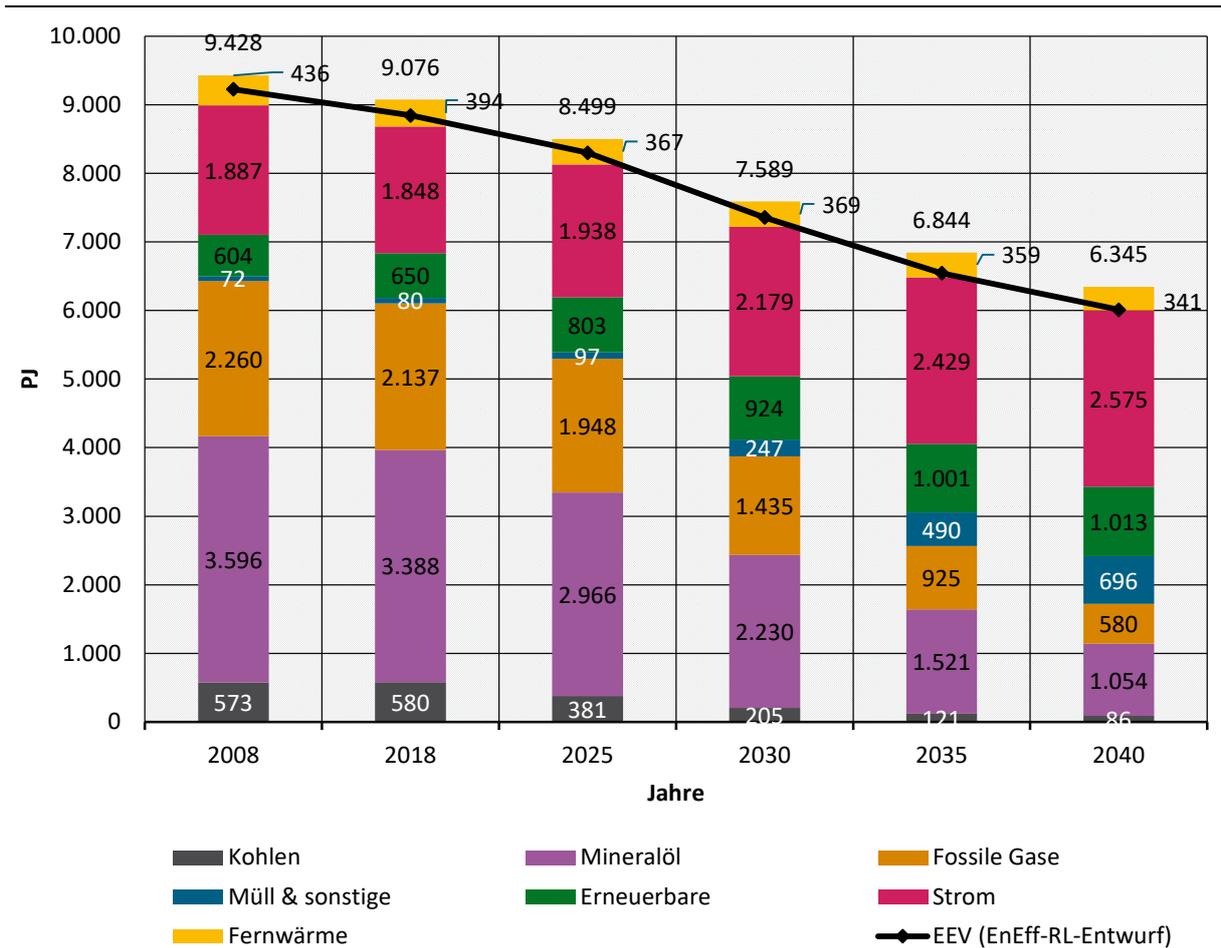
Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020c; 2020e), Übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkungen: \* Einschließlich organischer Anteile des Abfalls.

#### 14.2.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Die folgende Abbildung 114 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs in der BEHG-Sensitivität des KIS-2030.

**Abbildung 114: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2008-2040**



Anmerkung: Zusätzlich zum Endenergieverbrauch in nationaler Abgrenzung ist als Linie der Endenergieverbrauch in europäischer Abgrenzung dargestellt, siehe Kapitel 14.2.4.

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020c; 2020e), Übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Sowohl absolut als auch relativ ist der größte Rückgang des Endenergieverbrauchs zwischen 2018 und 2030 im Verkehr zu verzeichnen (-544 PJ bzw. -20 %), gefolgt von den Haushalten (-386 PJ bzw. -17 %). Der Endenergieverbrauch geht zwar nur 13 % zurück, aber der absolute Rückgang ist mit -341 PJ ähnlich hoch wie der Rückgang der Haushalte. Der GHD-Sektor hat mit -16 % einen ähnlich hohen relativen Rückgang wie die Haushalte, der absolute Rückgang ist mit -216 PJ deutlich geringer (Tabelle 142).

**Tabelle 142: Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Industrie	2.768	2.607	2.427	2.304	2.234
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	1.332	1.244	1.116	1.019	934
Haushalte	2.260	2.107	1.873	1.668	1.518

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Verkehr	2.716	2.541	2.173	1.853	1.659
<b>Endenergieverbrauch gesamt</b>	<b>9.076</b>	<b>8.499</b>	<b>7.589</b>	<b>6.844</b>	<b>6.345</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-6,4 %</i>	<i>-16,4 %</i>	<i>-24,6 %</i>	<i>-30,1 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020c; 2020e), Übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Entsprechend dem Primärenergieverbrauch entwickeln sich die einzelnen Energieträgergruppen auch beim Endenergieverbrauch deutlich unterschiedlich (Tabelle 143). Der Verbrauch von Braunkohlen geht um 87 % und der Verbrauch von Steinkohlen sinkt um 61 %. Der Verbrauch an Mineralölprodukten geht zwischen 2018 und 2030 um 34 % zurück, bleibt aber mit einem Anteil von gut 29 % wichtigster Endenergieträger im Jahr 2030. Bei fossilen Gasen, die Erdgas beinhalten, geht der Verbrauch bis 2030 um 33 % gegenüber 2018 zurück.

Die Deckung des Endenergieverbrauchs erfolgt durch erneuerbare Energien (+78 % im Jahr 2030 ggü. 2018), wobei dieser Anstieg sowohl auf Biomasse als auch auf Solarenergie sowie Geothermie und Umweltwärme entfällt. Der Endenergieverbrauch Strom steigt aufgrund neuer Verbraucher, wie z. B. Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen, bis 2030 um 18 % an. Der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch steigt von 20 % im Jahr 2018 auf 29 % im Jahr 2030 an. Strom zieht somit 2030 in der Bedeutung gleich mit den Mineralölprodukten. Der Verbrauch von Fernwärme sinkt bis 2030 geringfügig um 6 %, dennoch steigt der Anteil am Endenergieverbrauch von 4 % auf 5 % an. Die strombasierten Brenn- und Kraftstoffe haben 2030 einen Anteil von 3 %.

**Tabelle 143: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2018-2040**

Energieträger	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Braunkohle	87	35	11	6	4
Steinkohle	492	345	194	114	82
Mineralöl	3.388	2.966	2.230	1.521	1.054
Fossile Gase	2.137	1.948	1.435	925	580
Abfall	67	52	42	37	32
Sonstige	13	0	0	0	0
Biomasse*	566	676	666	596	534
Solarenergie	32	72	112	154	179
Geothermie und Umweltwärme	52	55	146	251	300
Strom	1.848	1.938	2.179	2.429	2.575
Fernwärme	394	367	369	359	341

Energieträger	2018	2025	2030	2035	2040
Strombasierte Brennstoffe	0	45	205	453	664
<b>Endenergieverbrauch gesamt</b>	<b>9.076</b>	<b>8.499</b>	<b>7.589</b>	<b>6.844</b>	<b>6.345</b>
Änderung ggü. 2018	0,0 %	-6,4 %	-16,4 %	-24,6 %	-30,1 %

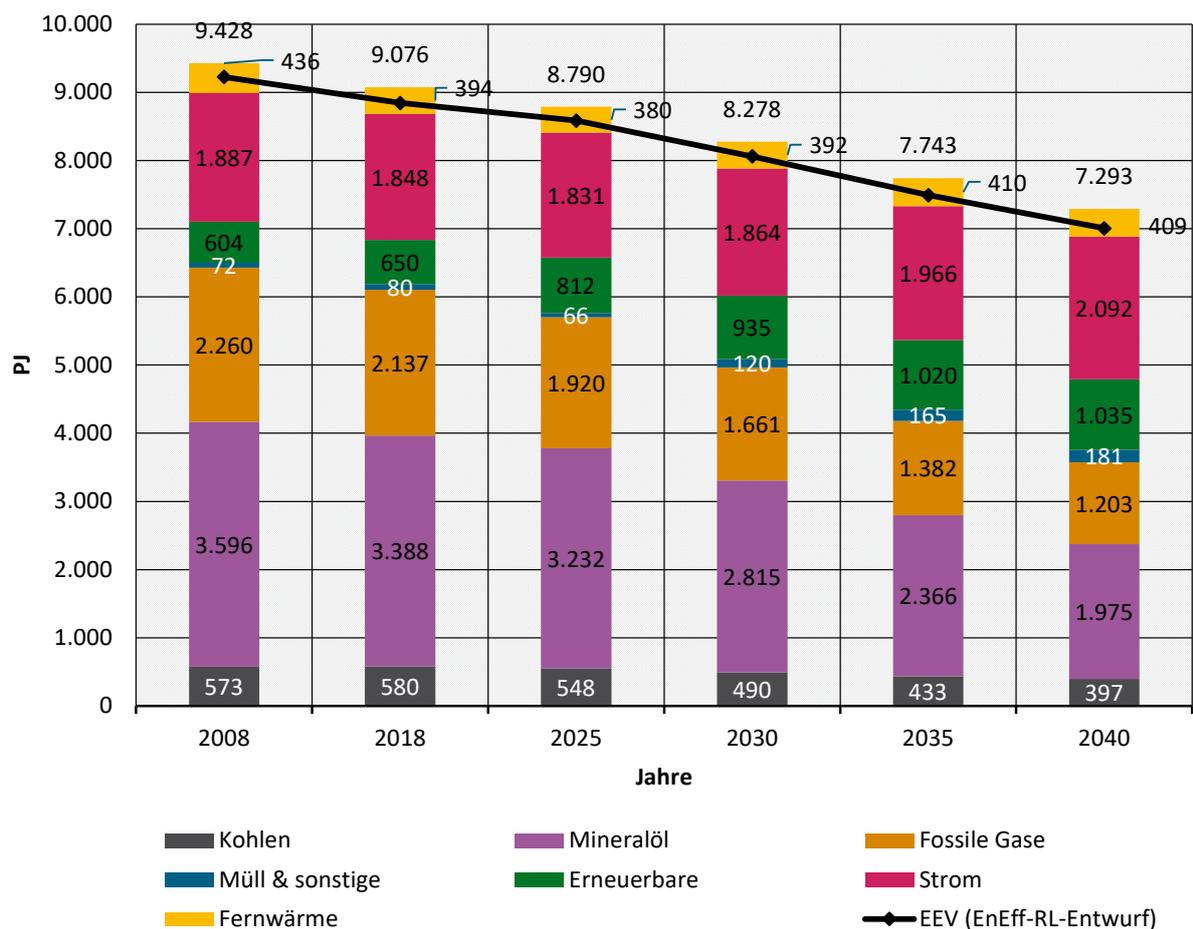
Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020c; 2020e), Übrige Energieträger: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkungen: \*Einschließlich organischer Anteile des Abfalls.

### 14.2.3 MMS

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im MMS ist in Abbildung 115 dargestellt.

**Abbildung 115: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS, 2008-2040**



Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

„Der gesamte Endenergieverbrauch im MMS ist rückläufig. Er sinkt von 9.076 PJ im Jahr 2018 auf 8.278 PJ im Jahr 2030, was einem Rückgang von rund 9 % entspricht.“

Der stärkste absolute Rückgang des Endenergieverbrauchs bis 2030 ist bei der Industrie zu verzeichnen (-268 PJ bzw. -9 %). Haushalte (-9 %) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (-10 %) verzeichnen ähnliche prozentuale Rückgänge. Im Verkehr wird zwischen 2018 und 2030 ein Rückgang von lediglich 7 % erzielt“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Tabelle 144: Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im MMS, 2018-2040**

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Industrie	2.768	2.618	2.500	2.426	2.399
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	1.332	1.280	1.193	1.103	1.022
Haushalte	2.260	2.197	2.062	1.901	1.732
Verkehr	2.716	2.696	2.522	2.314	2.140
<b>Endenergieverbrauch gesamt</b>	<b>9.076</b>	<b>8.790</b>	<b>8.278</b>	<b>7.743</b>	<b>7.293</b>
Änderung ggü. 2018	0,0 %	-3,2 %	-8,8 %	-14,7 %	-19,7 %

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

„Wie beim Primärenergieverbrauch entwickeln sich die einzelnen Energieträgergruppen unterschiedlich [(Tabelle 145)]. Der Verbrauch von Braunkohlen nimmt von 2018 bis 2030 um etwa 53 % ab. Der Einsatz von Steinkohlen geht bis 2030 lediglich um 8 % gegenüber 2018 zurück, da die Steinkohle in der Stahlindustrie nur begrenzt substituiert werden kann. Bei den Mineralölprodukten ist ein Rückgang um 17 % bis 2030 zu beobachten. Bei fossilen Gasen, von denen Erdgas mit Abstand das wichtigste ist, geht der Verbrauch bis 2030 um 22 % gegenüber 2018 zurück.

Der Beitrag der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch nimmt im Referenzszenario deutlich zu (+44 % im Jahr 2030), wobei dieser Anstieg sowohl auf Biomasse als auch auf Solarenergie sowie Geothermie und Umweltwärme entfällt. Der Endenergieverbrauch an Strom bleibt bis 2030 annähernd konstant und steigt anschließend aufgrund neuer Verbraucher, wie z. B. Elektrofahrzeugen bis 2040 leicht an“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Tabelle 145: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS, 2018-2040**

Energieträger	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Braunkohle	87	59	41	30	20
Steinkohle	492	488	449	403	377
Mineralöl	3.388	3.232	2.815	2.366	1.975
Fossile Gase	2.137	1.920	1.661	1.382	1.203
Abfall	67	58	52	47	42
Sonstige	13	0	0	0	0
Biomasse*	566	711	774	769	711
Solarenergie	32	60	98	146	174
Geothermie und Umwelt-	52	40	63	105	150

Energieträger	2018	2025	2030	2035	2040
Strom	1.848	1.831	1.864	1.966	2.092
Fernwärme	394	380	392	410	409
Strombasierte Brenn- und Kraftstoffe	0	8	68	119	138
<b>Endenergieverbrauch gesamt</b>	<b>9.076</b>	<b>8.790</b>	<b>8.278</b>	<b>7.743</b>	<b>7.293</b>
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,2 %</i>	<i>-8,8 %</i>	<i>-14,7 %</i>	<i>-19,7 %</i>

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

Anmerkungen: \* Einschließlich organischer Anteile des Abfalls.

#### 14.2.4 Vergleich der Szenarien

In Tabelle 146 ist der Vergleich des Endenergieverbrauch der drei Szenarien im Jahr 2030 den historischen Werten des Basisjahrs 2018 und des Referenzjahrs 2008 gegenübergestellt. In den vorhergehenden Abschnitten ist der Endenergieverbrauch entsprechend der nationalen Systematik berechnet worden. Zusätzlich ist in Tabelle 146 in entsprechend der europäischen Systematik ausgewiesen. Im Unterschied zur nationalen Systematik ist zum einen der Endenergieverbrauch von Umweltwärme enthalten. Zum anderen werden die Hochöfen anders bilanziert.

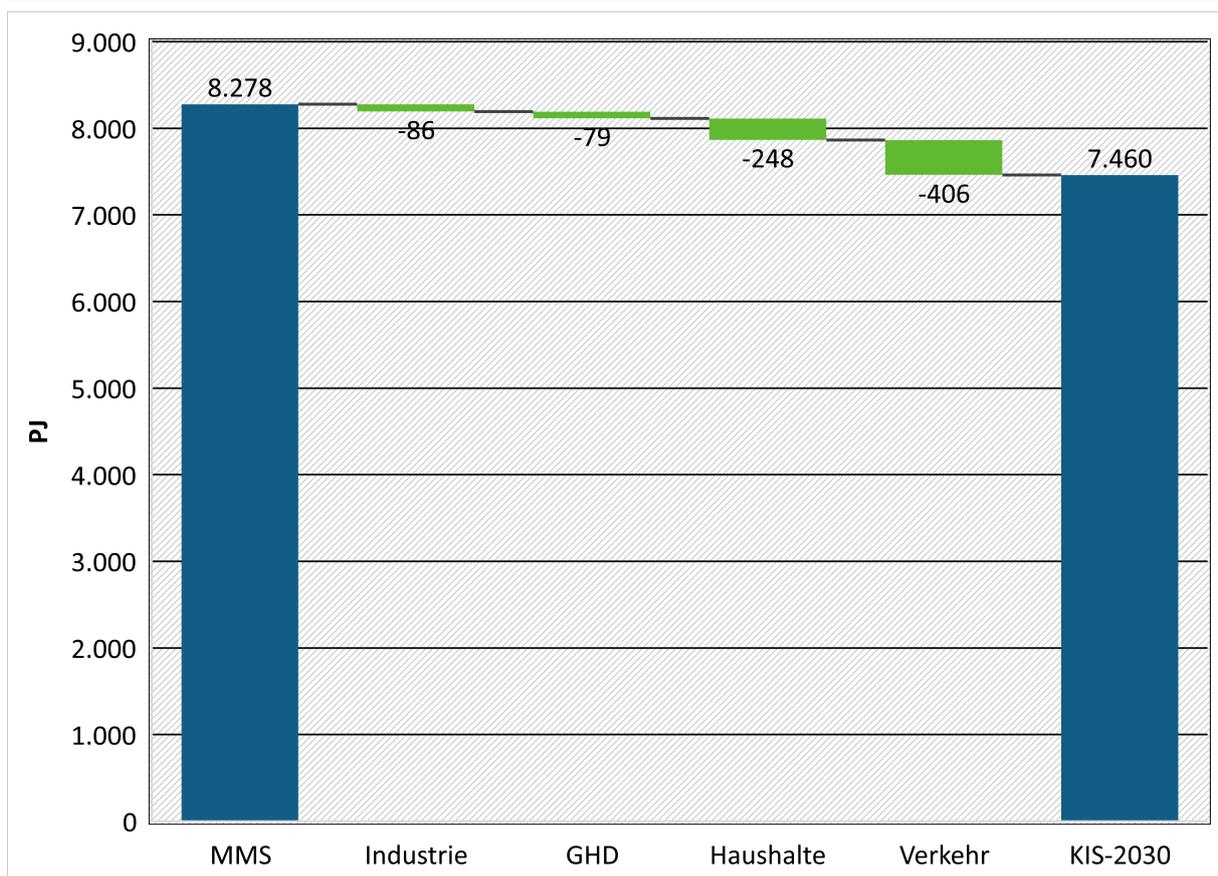
**Tabelle 146: Vergleich der Endenergieverbräuche nach unterschiedlichen Bilanzierungssystemen**

Tabellenkopf	2008	2018	2030 KIS-2030	2030 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	2030 MMS
Endenergieverbrauch (national)	9.428	9.076	7.460	7.589	8.278
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,7 %</i>	<i>-20,9 %</i>	<i>-19,5 %</i>	<i>-12,2 %</i>
Endenergieverbrauch (EnEff-RL)	9.227	8.844	7.223	7.357	8.062
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0</i>	<i>-4,1 %</i>	<i>-21,7 %</i>	<i>-20,3 %</i>	<i>-12,6 %</i>

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021) für das MMS, Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut für das KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG)

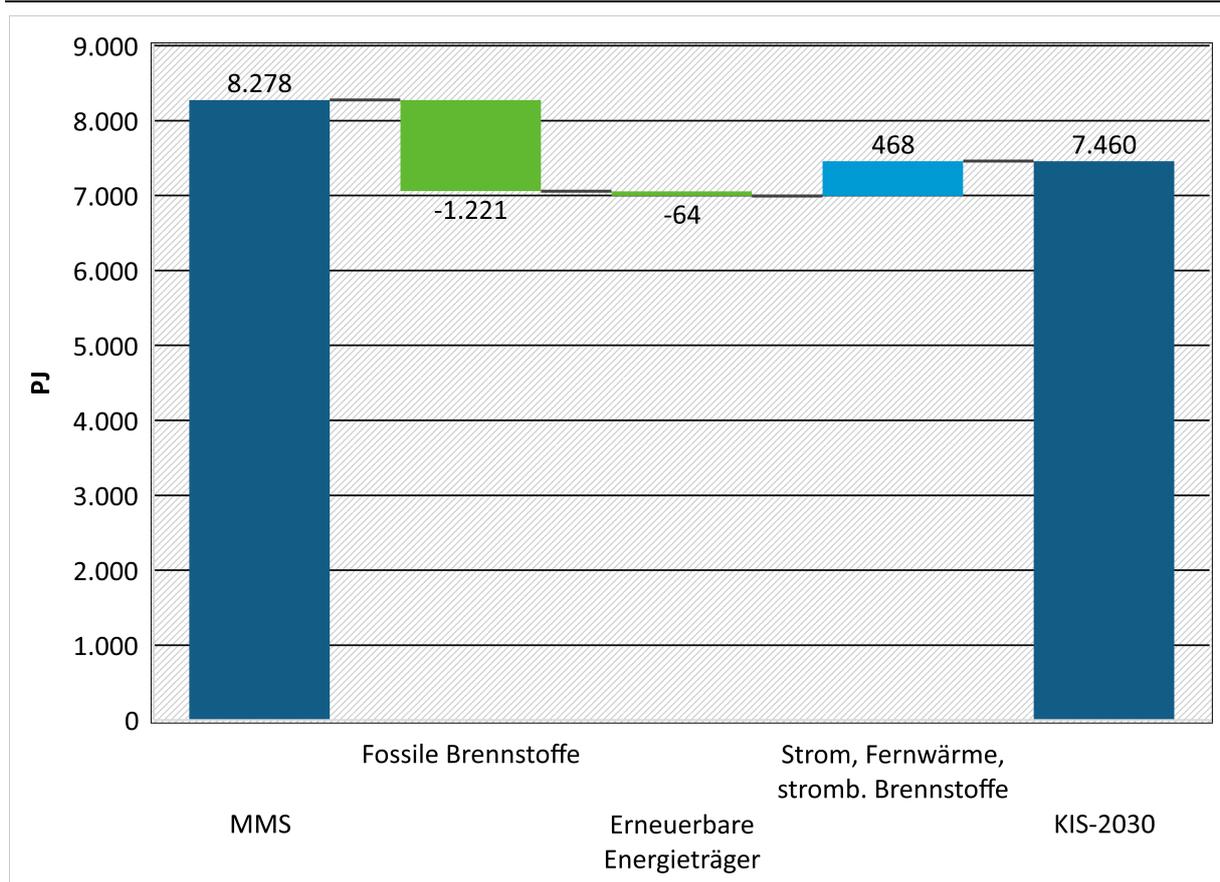
In der nationalen Abgrenzung liegt der Endenergieverbrauch im Jahr 2030 des KIS-2030 um knapp 21 % niedriger als der Vergleichswert 2008. Dies ist eine um neun Prozentpunkte höhere Reduktion als im MMS. Der niedrigere CO<sub>2</sub>-Preis in der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 führt zu einer um etwas über einen Prozentpunkt niedrigeren Reduktion des Endenergieverbrauchs.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Endenergieverbrauch in der europäischen Abgrenzung im Sinne der Energieeffizienz-Richtlinie (EnEff-RL). In dieser Abgrenzung ist die Reduktion des Endenergieverbrauchs im Jahr 2030 des KIS-2030 mit knapp 22 % noch etwas höher als in der nationalen Abgrenzung. Der Unterschied zum MMS beträgt in dieser Abgrenzung ebenfalls etwa neun Prozentpunkte. Auch hier führt die Sensitivitätsrechnung des BEHG-CO<sub>2</sub>-Preises zu einer um gut einen Prozentpunkt niedrigeren Reduktion des Primärenergieverbrauchs.

**Abbildung 116: Veränderung des Endenergieverbrauches nach Energiebilanzsektoren im KIS-2030 gegenüber dem MMS, Jahr 2030**

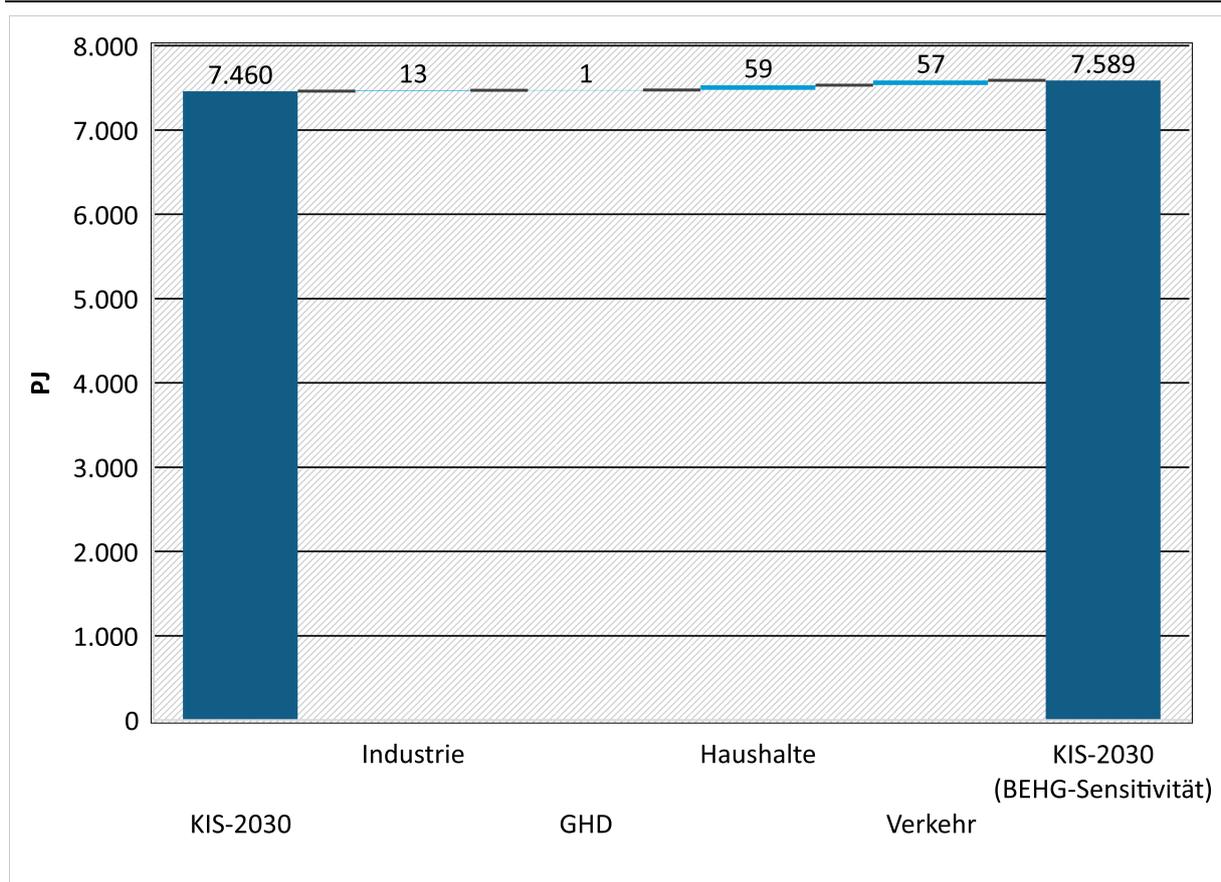
Quelle: Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Das KIS-2030 führt für das Szenariojahr 2030 zu einer Endenergieverbrauchseinsparung von 818 PJ gegenüber dem MMS, siehe Abbildung 116. Knapp die Hälfte der Endenergieeinsparung kommt hierbei aus dem Verkehr, gefolgt von den Haushalten. Die zusätzlichen EEV-Reduktionen in der Industrie und im GHD-Sektor sind im Vergleich dazu deutlich geringer.

**Abbildung 117: Veränderung des Endenergieverbrauch nach Energieträgern im KIS-2030 gegenüber dem MMS, Jahr 2030**

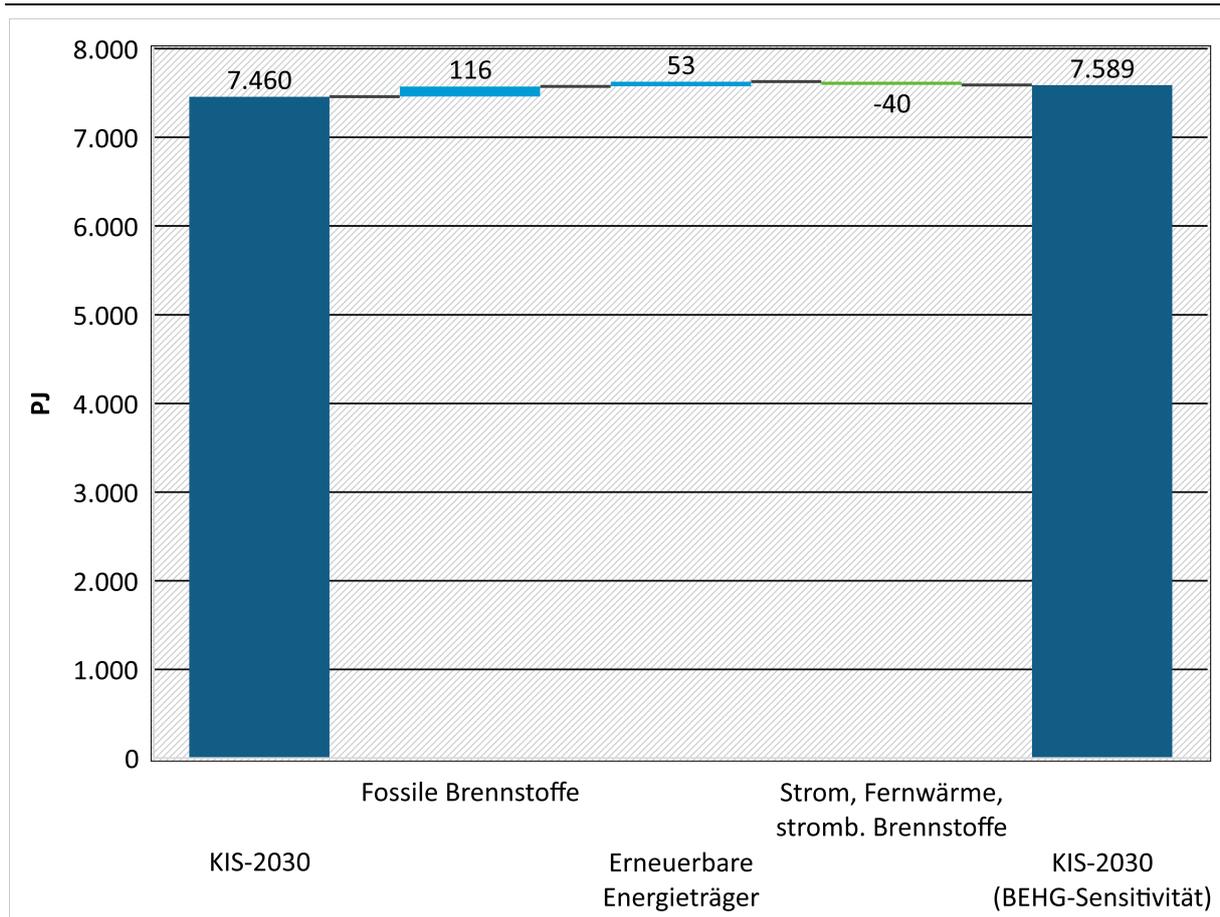
Quelle: Brennstoffe: Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Der größte Teil der zusätzlichen Endenergieeinsparung im KIS-2030 gegenüber dem MMS ist auf eine Reduktion des Verbrauchs fossiler Energieträger zurückzuführen, wie Abbildung 117 zeigt. Es werden aber auch weniger erneuerbare Energieträger benötigt, was vor allem an einer niedrigeren energetischen Nutzung von Biomasse liegt. Im Gegenzug wird im KIS-2030 aber deutlich mehr Strom, Fernwärme und synthetische Brennstoffe genutzt. Der Anstieg dieser Energieträgergruppe macht im Jahr 2030 aber nur 38 % des Rückgangs der fossilen Brennstoffe aus, sodass im Saldo ein deutlicher Rückgang des Endenergieverbrauchs im KIS-2030 gegenüber dem MMS verbleibt.

**Abbildung 118: Veränderung des Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren in der BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030, Jahr 2030**

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

In der BEHG-Sensitivität haben alle Endverbrauchssektoren höhere Energieverbräuche wie Abbildung 118 zeigt. Die Unterschiede zum KIS-2030 sind bei Haushalten und im Verkehr deutlich höher als in der Industrie und im GHD-Sektor. Der geänderte CO<sub>2</sub>-Preis hat also nicht nur einen Einfluss auf den Energieträgerwechsel, sondern auch auf die Höhe der Energieeinsparungen.

**Abbildung 119: Veränderung des Endenergieverbrauch nach Energieträgern in der BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030, Jahr 2030**

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

Der gegenüber dem KIS-2030 zusätzliche Energieverbrauch verteilt sich auf fossile Brennstoffe und erneuerbare Energien, siehe Abbildung 119. Gleichzeitig reduziert sich die Nachfrage nach Strom, Fernwärme und synthetischen Brennstoffen in Summe um 40 PJ. Da sich die Änderungen von erneuerbaren Energieträgern einerseits und der Gruppe Strom, Fernwärme und synthetischen Brennstoffen andererseits größtenteils kompensieren, lässt sich der Unterschied der Energieverbräuche also zu 90 % durch einen höheren Endenergieverbrauch fossiler Brennstoffe erklären, wie auch in einer Sensitivität mit niedrigeren CO<sub>2</sub>-Preisen zu erwarten ist.

## 14.3 Strombasierte Energieträger

### 14.3.1 KIS-2030

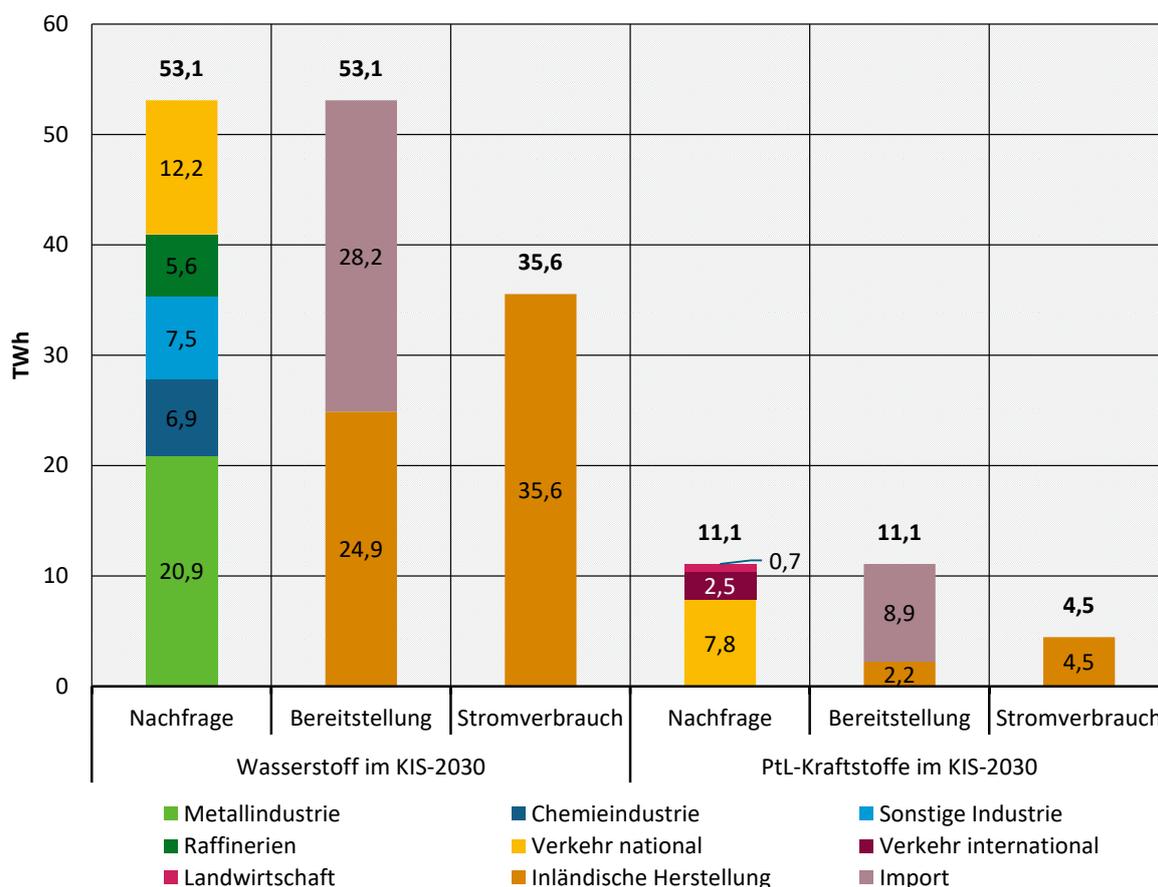
Im Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 ist die Industrie im Jahr 2030 der größte Nachfrager nach Elektrolysewasserstoff mit einem Verbrauch von 35 TWh (127 PJ) (Abbildung 120). Innerhalb der Industrie ist die Metallindustrie die Branche mit der größten Wasserstoffnachfrage. Der Wasserstoff wird hier vor allem als Reduktionsmittel in der Stahlherstellung genutzt. Die zweitgrößte Nachfrage nach Elektrolysewasserstoff liegt in der Chemieindustrie.<sup>118</sup> In Raffinerien

<sup>118</sup> Der stoffliche Verbrauch von Wasserstoff wird gemäß statistischen Konventionen nicht als Endenergieverbrauch bilanziert. Daher ist der stoffliche Bedarf an Wasserstoff in den Darstellungen dieses Kapitels nicht enthalten. Der stoffliche Bedarf an Wasserstoff ist aber im Industriesektor modelliert worden und im Primärenergieverbrauch in Kapitel ► mitbilanziert.

werden 6 TWh (20 PJ) Elektrolysewasserstoff eingesetzt und im Verkehr 12 TWh (44 PJ). Insgesamt wurde für das Jahr 2030 eine Nachfrage nach nichtfossile Wasserstoff aus Industrie, Raffinerien und Verkehr von zusammen 53 TWh (191 PJ) ermittelt. Davon werden knapp 25 TWh (90 PJ) durch inländische Elektrolyseanlagen gedeckt, die zu Stromverbrauch von 36 TWh führen. Die inländische Erzeugung deckt aber nur 47 % der Nachfrage ab, der Rest muss importiert werden.

Bei den synthetischen Flüssigkraftstoffen kommt die Nachfrage größtenteils aus dem Verkehr, sowohl aus inländischem Verkehr als auch aus internationalem Flugverkehr. Zusätzlich kommt noch eine kleine Nachfrage nach synthetischen Flüssigkraftstoffen aus der Landwirtschaft für Traktoren und andere motorisierte Landmaschinen. Von der gesamten Nachfrage nach synthetischen Flüssigkraftstoffen von 11 TWh (40 PJ) wird etwa ein Fünftel inländisch hergestellt, der Großteil aber importiert. Die inländische Herstellung von synthetischen Flüssigkraftstoffen verursacht inländisch einen Stromverbrauch von knapp 5 TWh.

**Abbildung 120: Nachfrage und Bereitstellung von grünem Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im KIS-2030 im Jahr 2030**



Anmerkung: ohne Wasserstoff für stoffliche Nutzung, siehe Fußnote 118

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

Zusammengenommen ergibt sich im Jahr 2030 des KIS-2030 eine Nachfrage nach strombasierten Brenn- und Kraftstoffen von 64 TWh (231 PJ). Diese Nachfrage wird zu 42 % durch inländische Produktion gedeckt, wofür 40 TWh Strom benötigt werden. Der verbleibende Rest importiert. Insgesamt stehen im Jahr 2030 Elektrolyseanlagen mit einer Leistung von 10 GW zur Ver-

fügung. Da hiervon 1,5 GW auf PtL-Anlagen entfallen, verbleiben 8,5 GW zu reinen Wasserstoffherstellung. Als Wirkungsgrade wurde für die Wasserelektrolyse 70 % und für die Herstellung synthetischer Flüssigkraftstoffe in PtL-Anlagen ein Wirkungsgrad von 50 % angenommen.

**Tabelle 147: Nachfrage nach und Bereitstellung von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen im KIS-2030**

Größe	Einheit	2025	2030	2035	2040
<b>Wasserstoff</b>					
Nachfrage Industrie	PJ (TWh)	40 (11)	127 (35)	203 (57)	279 (78)
Nachfrage Verkehr	PJ (TWh)	0 (0)	44 (12)	112 (31)	109 (30)
Nachfrage Raffinerien	PJ (TWh)	5 (1)	20 (6)	20 (6)	17 (5)
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	45 (13)	191 (53)	335 (93)	405 (113)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	17 (5)	90 (25)	140 (39)	190 (53)
Import	PJ (TWh)	28 (8)	58 (16)	84 (23)	106 (30)
Inländischer Stromverbrauch Elektrolyse	PJ (TWh)	24 (7)	128 (36)	200 (56)	272 (76)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	2,9	8,9	13,9	18,9
<b>Strombasierte Flüssigkraftstoffe</b>					
Nachfrage nationaler Verkehr	PJ (TWh)	0 (0)	28 (8)	63 (18)	68 (19)
Nachfrage internationaler Flugverkehr	PJ (TWh)	0 (0)	9 (3)	45 (12)	81 (23)
Nachfrage Landwirtschaft	PJ (TWh)	0 (0)	3 (1)	9 (2)	17 (5)
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	0 (0)	40 (11)	117 (32)	167 (46)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	0 (0)	8 (2)	9 (2)	9 (3)
Import	PJ (TWh)	0 (0)	29 (8)	106 (29)	152 (42)
Inländischer Stromverbrauch PtL-Herstellung	PJ (TWh)	0 (0)	16 (4)	18 (5)	19 (5)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	0,0	1,1	1,1	1,1
<b>Summe</b>					
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	45 (13)	231 (64)	452 (126)	572 (159)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	17 (5)	98 (27)	149 (41)	200 (56)
Import	PJ (TWh)	28 (8)	87 (24)	189 (53)	259 (72)
Inländischer Stromverbrauch Herstellung	PJ (TWh)	24 (7)	144 (40)	218 (60)	291 (81)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	2,9	10,0	15,0	20,0

Anmerkung: Rundungsbedingte Abweichungen der Summenwerte möglich

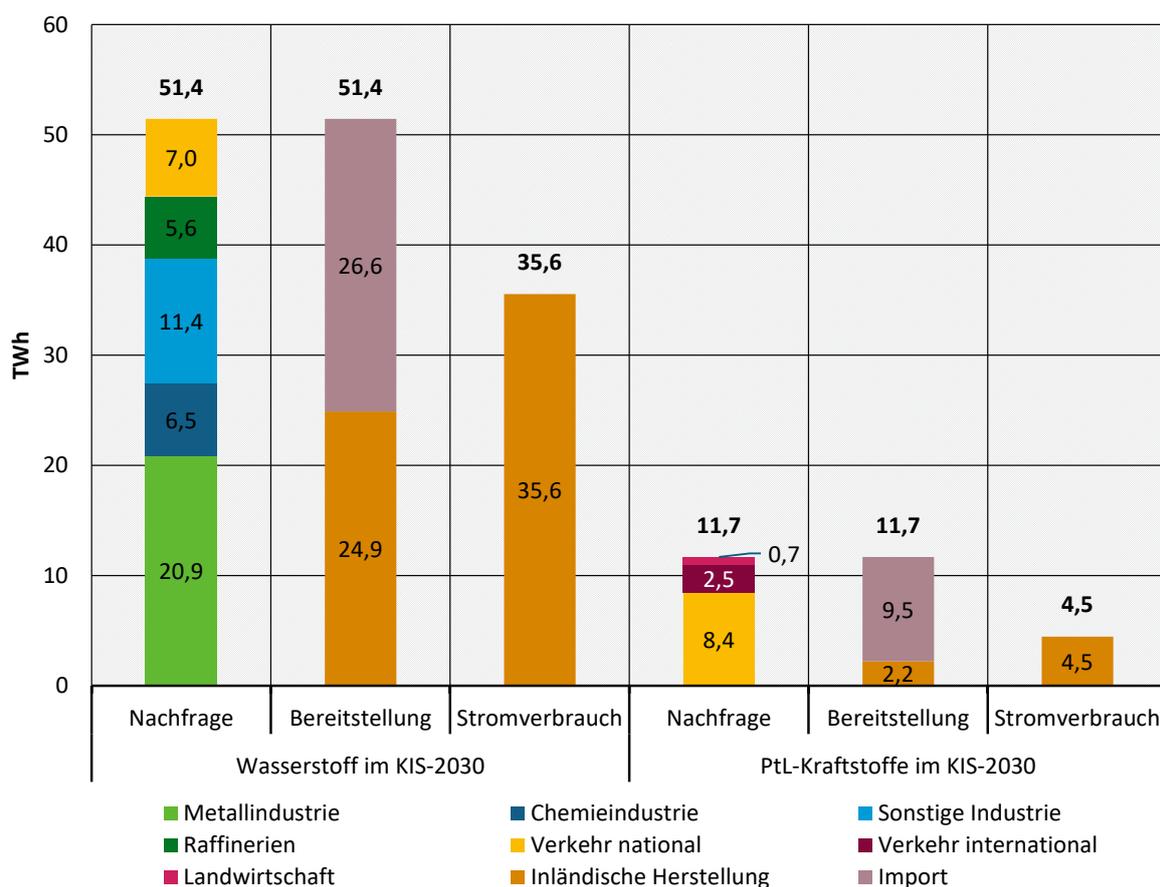
Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer-ISI

### 14.3.2 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

Auch in der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 ist die Industrie im Jahr 2030 mit Abstand der größte Nachfrager nach Elektrolysewasserstoff mit einem Verbrauch von 39 TWh (140 PJ). In Raffinerien werden 6 TWh (20 PJ) Elektrolysewasserstoff eingesetzt und im Verkehr 7 TWh (25 PJ). Insgesamt beträgt die Nachfrage nach nichtfossile Wasserstoff aus Industrie, Raffinerien und Verkehr 51 TWh (185 PJ) ermittelt. Davon werden knapp 25 TWh (90 PJ) durch inländische Elektrolyseanlagen gedeckt, die zu Stromverbrauch von 36 TWh führen. Die inländische Erzeugung deckt 49 % der Nachfrage ab, der Rest muss importiert werden.

Bei den synthetischen Flüssigkraftstoffen kommt die Nachfrage hauptsächlich aus dem Verkehr, zusätzlich gibt es eine kleine Nachfrage in der Landwirtschaft. Da die Nachfrage nach synthetischen Flüssigkraftstoffen von 12 TWh (42 PJ) nur zu einem geringen Teil durch inländische Produktion gedeckt wird, beträgt der Stromverbrauch hierfür knapp 5 TWh.

**Abbildung 121: Nachfrage und Bereitstellung von grünem Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im Jahr 2030, KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**



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

Zusammengenommen ergibt sich im Jahr 2030 der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 eine Nachfrage nach strombasierten Brenn- und Kraftstoffen in Summe 63 TWh (227 PJ) nach nachgefragt. Diese Nachfrage wird zu 43 % durch inländische Produktion gedeckt, wofür 40 TWh Strom benötigt werden. Der verbleibende Rest importiert.

**Tabelle 148: Nachfrage nach und Bereitstellung von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen im KIS-2030, BEHG-Sensitivität**

Größe	Einheit	2025	2030	2035	2040
Wasserstoff					
Nachfrage Industrie	PJ (TWh)	44 (12)	140 (39)	223 (62)	301 (84)
Nachfrage Verkehr	PJ (TWh)	0 (0)	25 (7)	81 (22)	95 (26)
Nachfrage Raffinerien	PJ (TWh)	5 (1)	20 (6)	20 (6)	18 (5)
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	50 (14)	185 (51)	323 (90)	414 (115)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	17 (5)	90 (25)	140 (39)	190 (53)
Import	PJ (TWh)	32 (9)	70 (20)	103 (29)	129 (36)
Inländischer Stromverbrauch Elektrolyse	PJ (TWh)	24 (7)	128 (36)	200 (56)	272 (76)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	2,9	8,9	13,9	18,9
Strombasierte Flüssigkraftstoffe					
Nachfrage nationaler Verkehr	PJ (TWh)	0 (0)	30 (8)	72 (20)	80 (22)
Nachfrage internationaler Flugverkehr	PJ (TWh)	0 (0)	9 (3)	45 (12)	81 (23)
Nachfrage Landwirtschaft	PJ (TWh)	0 (0)	3 (1)	9 (2)	17 (5)
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	0 (0)	42 (12)	126 (35)	179 (50)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	0 (0)	8 (2)	9 (2)	9 (3)
Import	PJ (TWh)	0 (0)	32 (9)	115 (32)	164 (46)
Inländischer Stromverbrauch PtL-Herstellung	PJ (TWh)	0 (0)	16 (4)	17 (5)	19 (5)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	0,0	1,1	1,1	1,1
Summe					
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	50 (14)	227 (63)	449 (125)	593 (165)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	17 (5)	98 (27)	149 (41)	200 (55)
Import	PJ (TWh)	32 (9)	102 (28)	217 (60)	293 (81)
Inländischer Stromverbrauch Herstellung	PJ (TWh)	25 (7)	144 (40)	217 (60)	291 (81)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	2,9	10,0	15,0	20,0

Anmerkung: Rundungsbedingte Abweichungen der Summenwerte möglich

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer-ISI

### 14.3.3 MMS

„Im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) wurde für 2030 eine Nachfrage der Industrie nach Elektrolysewasserstoff von 29 PJ ermittelt, der bis 2040 auf 67 PJ ansteigt (siehe [Tabelle 149]). Die Wasserstoffnachfrage des Verkehrs bleibt marginal. Im inländischen Verkehr gibt es im MMS im Jahr 2030 eine Nachfrage nach strombasierten Flüssigkraftstoffen in Höhe von 30 PJ, der bis 2040 auf 59 PJ ansteigt. Aus dem internationalen Flugverkehr ergibt sich eine Nachfrage von 9 PJ im Jahr 2030 und 10 PJ im Jahr 2040 an strombasierten Flugkraftstoffen. Zusätzlich kommt nach 2030 eine kleine Nachfrage nach strombasierten Flüssigkraftstoffen durch die Landwirtschaft hinzu. In Summe ergibt sich für das Jahr 2030 eine Nachfrage von 68 PJ an strombasierten Energieträgern (Wasserstoff plus Flüssigkraftstoffe), was höher als die in der NWS angegebene Wasserstoffnachfrage ist. Zwischen 2030 und 2040 steigt die Nachfrage nach strombasierten Energieträgern auf mehr als das Doppelte.“

Die Nachfrage nach Wasserstoff wird im MMS komplett durch inländische Produktion gedeckt, hierzu werden 11 TWh Strom im Jahr 2030 und 27 TWh im Jahr 2040 benötigt. Bei den strombasierten Flüssigkraftstoffen wurde angenommen, dass ein kleiner Teil der Nachfrage durch inländische PtL-Pilotanlagen gedeckt wird, der Großteil hingegen durch Importe. Daher steigt der Stromverbrauch der PtL-Anlagen nach 2030 auch kaum an. Insgesamt werden somit 16 TWh Strom im Jahr 2030 und 32 TWh Strom im Jahr 2040 zur Herstellung von strombasierten Energieträgern benötigt.

Die Gesamt-Elektrolyseleistung wurde in Anlehnung an die NWS mit 5 GW im Jahr 2030 und 10 GW im Jahr 2040 festgelegt. Dabei dient jeweils der größere Teil der Elektrolyseure der Deckung der direkten Wasserstoffnachfrage. In der Modellierung wurde die gleiche Effizienz der Elektrolyseure wie in der NWS (70 %) unterstellt. Als Wirkungsgrad für die Herstellung strombasierter Flüssigkraftstoffe wurde ein Wirkungsgrad von 50 % angenommen“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Tabelle 149: Nachfrage nach und Bereitstellung von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen im MMS**

Größe	Einheit	2025	2030	2035	2040
<b>Wasserstoff</b>					
Nachfrage Industrie	PJ (TWh)	8 (2)	29 (8)	48 (13)	67 (19)
Nachfrage Verkehr	PJ (TWh)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	8 (2)	29 (8)	48 (13)	67 (19)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	8 (2)	29 (8)	49 (14)	67 (19)
Import	PJ (TWh)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Inländischer Stromverbrauch Elektrolyse	PJ (TWh)	11 (3)	41 (11)	69 (19)	96 (27)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	2,9	3,9	6,4	8,9
<b>Strombasierte Flüssigkraftstoffe</b>					
Nachfrage nationaler Verkehr	PJ (TWh)	0 (0)	30 (8)	59 (17)	59 (16)

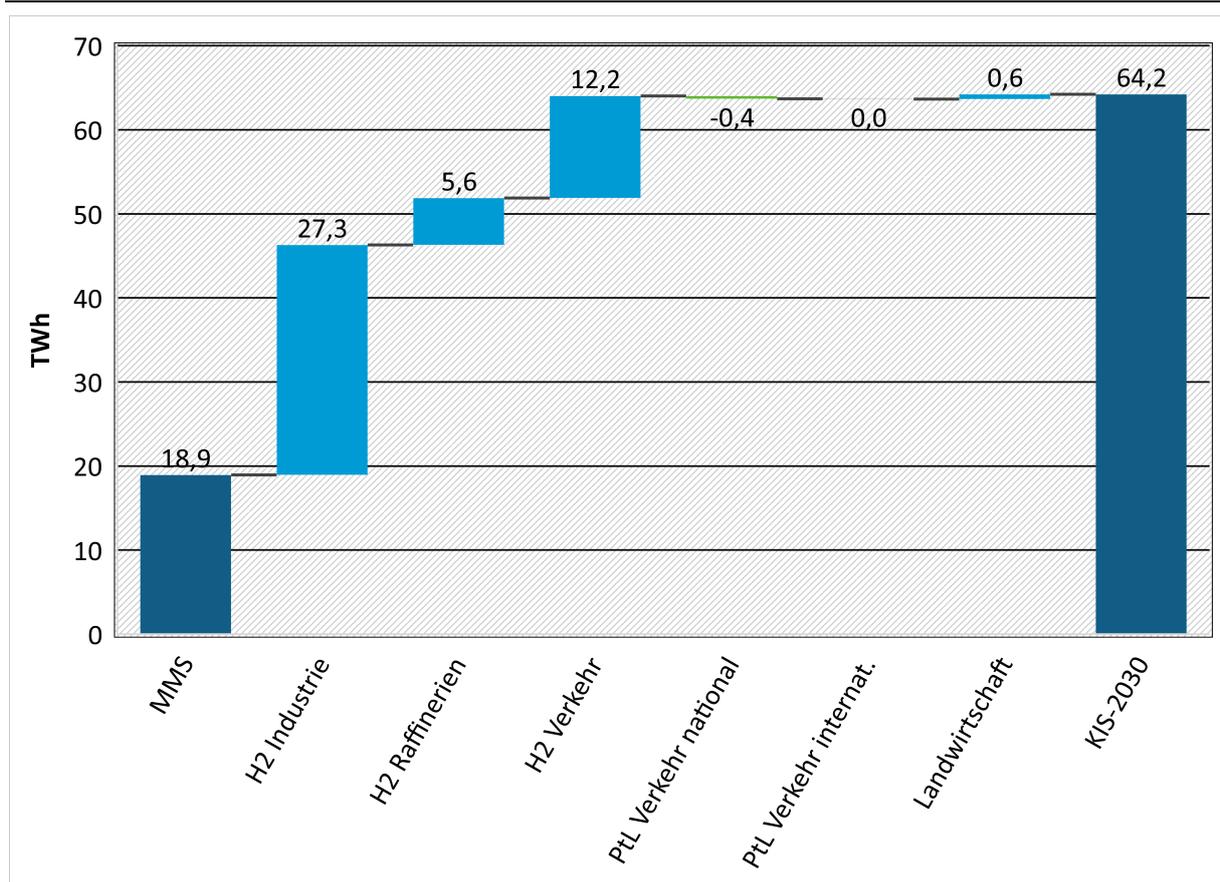
Größe	Einheit	2025	2030	2035	2040
Nachfrage internationaler Flugverkehr	PJ (TWh)	0 (0)	9 (3)	10 (3)	10 (3)
Nachfrage Landwirtschaft	PJ (TWh)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	3 (1)
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	0 (0)	39 (11)	70 (19)	71 (20)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	0 (0)	8 (2)	8 (2)	9 (2)
Import	PJ (TWh)	0 (0)	31 (9)	62 (17)	63 (17)
Inländischer Stromverbrauch PtL-Herstellung	PJ (TWh)	0 (0)	16 (4)	16 (4)	17 (5)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	0,0	1,1	1,1	1,1
<b>Summe</b>					
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	8 (2)	68 (19)	119 (33)	138 (38)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	8 (2)	37 (10)	57 (16)	76 (21)
Import	PJ (TWh)	0 (0)	31 (9)	62 (17)	62 (17)
Inländischer Stromverbrauch Herstellung	PJ (TWh)	11 (3)	57 (16)	85 (24)	113 (32)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	2,9	5,0	7,5	10,0

Anmerkung: Rundungsbedingte Abweichungen der Summenwerte möglich

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021), ergänzt um Zeilen für Import

#### 14.3.4 Vergleich der Szenarien

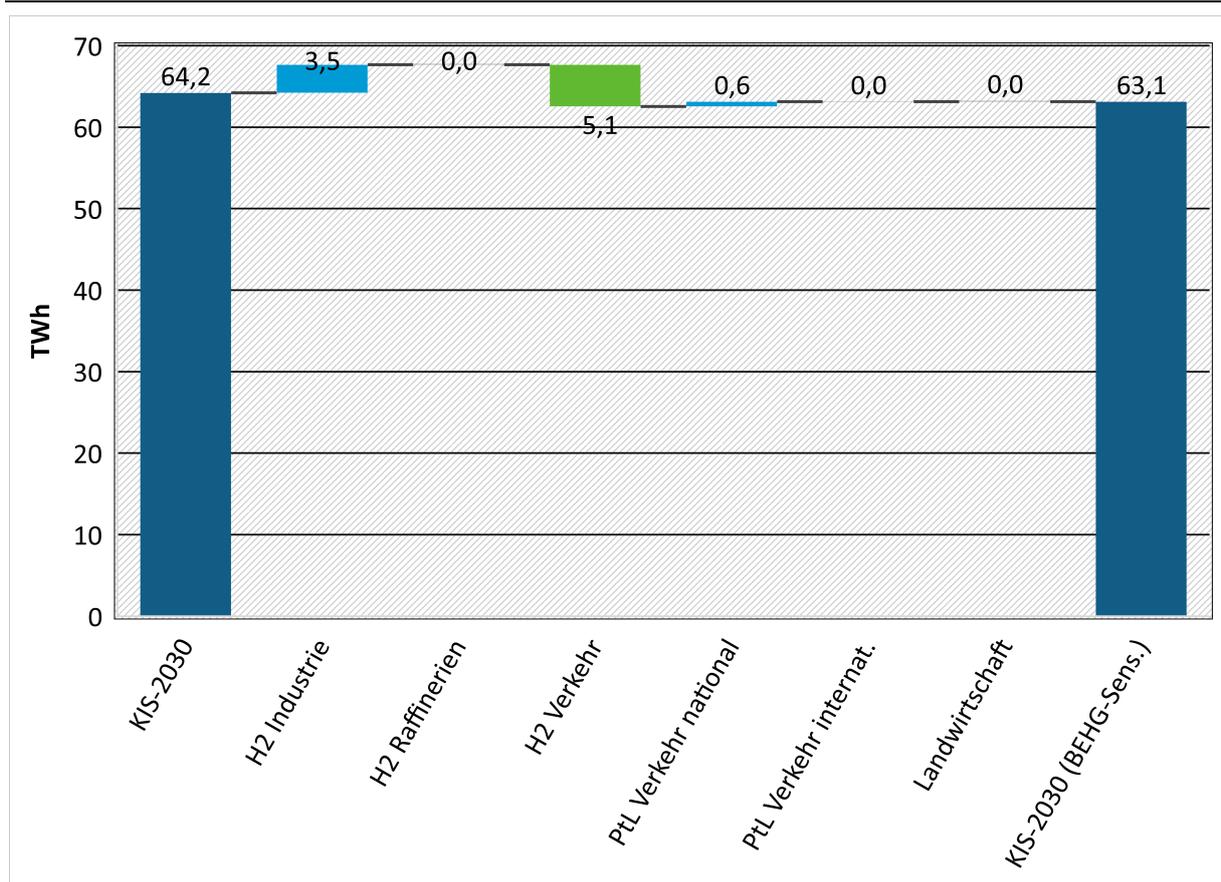
Die Nachfrage nach strombasierten Brenn- und Kraftstoffen ist im Jahr 2030 des KIS-2030 mehr als dreimal so hoch wie im MMS. Abbildung 122 zeigt die einzelnen Beiträge zu diesem Anstieg. Die zusätzliche Nachfrage entfällt dabei fast ausschließlich auf Wasserstoff, wobei die Industrie hier für den größten Anteil des Nachfrageanstiegs verantwortlich ist. Aber auch im Verkehr und bei den Raffinerien ist die Nachfrage nach Elektrolysewasserstoff im KIS-2030 deutlich höher als im MMS. Bei den in PtL-Anlagen hergestellten strombasierten Flüssigkraftstoffen wird der zusätzliche Bedarf in der Landwirtschaft größtenteils durch eine geringere Nachfrage im nationalen Verkehr kompensiert.

**Abbildung 122: Veränderung der Nachfrage nach grünem Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im Jahr 2030 im KIS-2030 gegenüber dem MMS**

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

In der BEHG-Sensitivität zeigt sich gegenüber dem KIS-2030 unterschiedliche Effekte (Abbildung 123). Der niedrigere CO<sub>2</sub>-Preis führt in der Industrie zu einer höheren Nachfrage nach Elektrolysewasserstoff. Im Verkehr hingegen führt der niedrigere CO<sub>2</sub>-Preis zu einer deutlich niedrigeren Wasserstoffnachfrage, aber zu einer etwas höheren PtL-Nachfrage. Bei den übrigen Verbrauchsgruppen zeigen sich keine Effekte. In Summe ist die Nachfrage nach strombasierten Brenn- und Kraftstoffen im Jahr 2030 in der Sensitivität etwas geringer. Da die inländischen Kapazitäten in der BEHG-Sensitivität gleich wie im KIS-2030 sind, ist der inländisch produzierte Anteil in der Sensitivität geringfügig höher.

**Abbildung 123: Veränderung der Nachfrage nach grünem Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im Jahr 2030 in der BEHG-Sensitivität gegenüber dem KIS-2030**



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

## 15 Treibhausgasemissionen

### 15.1 Methodik

Die Methodik zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen ist in Kapitel 2 des Projektionsberichts 2021 (Öko-Institut et al. 2021) beschrieben. Eine methodische Abweichung gegenüber dem Projektionsbericht 2021 ist, dass jetzt der Vorschlag der ESR-Revision mit 50 % statt 38 % Emissionsminderung (aus der vorherigen Lastenteilungsverordnung) zwischen 2005 und 2030 berücksichtigt wird, um die ESR- und BEHG-Höchstmengen zu berechnen. Da die zulässigen BEHG-Emissionen laut § 4 BEHG über die zulässigen ESR-Emissionen definiert sind, betrifft diese methodische Änderung auch die Interpretation der BEHG-Zielerreichung.

Das BEHG umfasst (fast) alle brennstoffbedingten Treibhausgasemissionen, die nicht durch den EU-Emissionshandel abgedeckt sind. Da die ESR-Höchstmengen des Fit-For-55-Pakets der EU-Kommission zum Zeitpunkt der Berechnung noch nicht vorlagen, wurden diese aus einer Expertenschätzung übernommen ((Gores 2022) auf Basis von EU (2020), EC (2021a) und EC (2021c)). Für die BEHG-Brennstoffemissionen wurde in ENUSEM aus dem Mittelwert der Jahre 2016 bis 2018 ein Anteil von 71,3 % (voller Anwendungsbereich für die Jahre 2023 bis 2030) bzw. 68,4 % (reduzierter Anwendungsbereich für die Jahre 2021 und 2022) ermittelt und auf die zulässigen ESR-Emissionen angewandt. Zu methodischen Details der Berechnung der ETS/BEHG/ESR-Emissionen siehe Öko-Institut et al. (2021), Kapitel 14.4.1.

Wenn ein Sektor in einem Jahr seine Jahresemissionsmenge überschreitet, so sieht § 4 Abs. 3 KSG vor, dass die Differenzmenge anteilig von den Folgejahren abgezogen wird. Eine solche Zielanpassung wurde in der Modellierung nicht umgesetzt, da es zum einen in Szenarien üblich ist, gegen den originalen Zielpfad zu vergleichen, zum anderen sich für die verschiedenen Szenarien somit auch unterschiedliche Ziele ergeben würden.

### 15.2 KIS-2030

#### 15.2.1 Emissionen aus Verbrennungsprozessen

Die Entwicklung der verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen im KIS-2030 ist in Tabelle 150 dargestellt.

**Tabelle 150: Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen (inklusive internationalem Verkehr) nach Brennstoffen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030**

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Braunkohle	346,5	178,2	160,6	35,6	0,9	0,5	0,3
Steinkohle	203,7	165,7	116,8	50,0	18,0	10,5	7,5
Mineralöl	336,5	311,6	276,6	237,9	173,4	114,9	79,3
Fossile Gase	122,5	175,2	168,2	182,6	129,9	77,7	36,1
Abfall	7,7	13,4	19,8	17,3	15,5	15,4	15,3
Biomasse*	0,5	1,2	3,4	2,6	2,1	2,1	2,1
Synthetische Kraftstoffe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Brennstoffe gesamt</b>	<b>1.017,4</b>	<b>845,3</b>	<b>745,5</b>	<b>526,0</b>	<b>339,8</b>	<b>221,1</b>	<b>140,6</b>
Rauchgasentschwefelung (REA)	0,6	1,1	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0
<b>Gesamt inklusive REA</b>	<b>1.018,0</b>	<b>846,5</b>	<b>746,4</b>	<b>526,2</b>	<b>339,8</b>	<b>221,1</b>	<b>140,6</b>
<i>ggü. 2005</i>	<i>20,3 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-11,8 %</i>	<i>-37,8 %</i>	<i>-59,9 %</i>	<i>-73,9 %</i>	<i>-83,4 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-16,9 %</i>	<i>-26,7 %</i>	<i>-48,3 %</i>	<i>-66,6 %</i>	<i>-78,3 %</i>	<i>-86,2 %</i>
Nachrichtlich							
CO <sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung	22,1	57,3	100,8	99,3	94,1	85,5	80,5
CO <sub>2</sub> in CCS	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,9	1,2

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

Anmerkung: \* Bezieht sich auf die CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen, also ohne CO<sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung

Aus Tabelle 150 ist ersichtlich, dass sich bis zum Jahr 2030 die verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen um rund 67 % gegenüber 1990 reduzieren. Die markantesten Reduktionen ergeben sich bei Braun- und Steinkohle aufgrund des Ausstiegs aus der Kohleverstromung.

Bei den fossilen Gasen nehmen die Emissionen in den kommenden Jahren noch zu und liegen trotz einer Abnahme bis 2030 noch über dem Niveau des Jahres 1990. Dies ist durch den Einsatz von vergleichsweise emissionsarmem Erdgas als Energieträger zu erklären. Die Verbrennung von Mineralöl bleibt über den gesamten Zeitraum die größte Emissionsquelle, während Erdgas seit 2018 den zweitgrößten Anteil der Emissionen verursacht. Die Emissionen aus der Rauchgasentschwefelung gehen durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung zwischen 2020 und 2030 stark zurück.

### 15.2.2 Emissionen nach Treibhausgasen

Tabelle 151 zeigt die Entwicklung der Emissionen der einzelnen Treibhausgase im KIS-2030.

**Tabelle 151: Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030, in Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq**

Gas	1990	2005	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )*	1.052,3	866,4	755,3	615,9	599,0	588,6	563,6	529,4	485,5	445,8	408,4	372,5	336,4	216,1	136,7
Methan (CH <sub>4</sub> )	121,2	69,4	52,6	47,3	46,8	46,0	45,2	44,4	43,3	42,1	40,9	39,7	38,4	33,5	29,8
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	62,5	43,3	35,5	31,8	31,2	30,7	30,0	30,1	29,2	28,4	27,7	26,9	25,4	22,8	20,7
Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW)	0,1	9,0	10,5	9,2	8,7	8,3	7,8	7,4	6,6	5,8	5,1	4,3	3,5	3,3	3,1
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW)	3,1	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Schwefelhexafluorid (SF <sub>6</sub> )	4,4	3,3	3,9	3,5	3,2	2,9	2,6	2,3	2,0	1,6	1,3	1,0	0,7	0,4	0,4
Nicht spezifizierter Mix (HFKW/FKW)	5,8	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Stickstofftrifluorid (NF <sub>3</sub> )	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Gesamt</b>	<b>1.249,5</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>708,1</b>	<b>689,4</b>	<b>677,0</b>	<b>649,7</b>	<b>614,0</b>	<b>567,0</b>	<b>524,3</b>	<b>483,8</b>	<b>444,8</b>	<b>405,0</b>	<b>276,6</b>	<b>191,2</b>
<i>ggü. 2005</i>	<i>25,8 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-13,6 %</i>	<i>-28,7 %</i>	<i>-30,6 %</i>	<i>-31,8 %</i>	<i>-34,6 %</i>	<i>-38,2 %</i>	<i>-42,9 %</i>	<i>-47,2 %</i>	<i>-51,3 %</i>	<i>-55,2 %</i>	<i>-59,2 %</i>	<i>-72,2 %</i>	<i>-80,7 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-20,5 %</i>	<i>-31,3 %</i>	<i>-43,3 %</i>	<i>-44,8 %</i>	<i>-45,8 %</i>	<i>-48,0 %</i>	<i>-50,9 %</i>	<i>-54,6 %</i>	<i>-58,0 %</i>	<i>-61,3 %</i>	<i>-64,4 %</i>	<i>-67,6 %</i>	<i>-77,9 %</i>	<i>-84,7 %</i>
Nachrichtlich															
CO <sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung	21,1	56,6	97,5	104,1	103,4	102,0	100,5	99,3	98,4	97,2	96,7	95,4	94,1	85,5	80,5
CO <sub>2</sub> in CCS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,9	1,2

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

Anmerkung: \* Ohne CO<sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung.

Ohne Freisetzung/Bindung aus LULUCF und ohne Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr

Im KIS-2030 stellt Kohlendioxid weiterhin das dominierende Treibhausgas dar, dessen Emissionen nehmen zwischen 2018 und 2030 aber stärker ab als jene von Methan und Lachgas. Dies ist dadurch begründet, dass Methan und Lachgas zu einem großen Teil im Sektor Landwirtschaft emittiert werden und die Emissionsreduktionen bis 2030 in der Landwirtschaft geringer ausfallen als in anderen Sektoren. Im Vergleich zu 1990 werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen 2030 um 68 % niedriger sein, jene von CH<sub>4</sub> ebenfalls um 68 % und jene von N<sub>2</sub>O um 59 %. Auch die Emissionen fluorierter Treibhausgase nehmen, ausgehend von einem relativ hohen Niveau im Jahr 2018, bis 2030 stark ab.

Die nicht in die Summe eingehenden und daher nur nachrichtlich ausgewiesenen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verfeuerung von Biomasse vervielfachten sich zwischen 1990 und 2018 und werden ein Maximum um das Jahr 2025 erreichen, um anschließend leicht zurückzugehen.

### **15.2.3 Emissionen nach KSG-Sektoren**

In Tabelle 152 ist die Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren dargestellt.

**Tabelle 152: Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030, in Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq**

Sektor	1990	2005	2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Energiewirtschaft*	466,2	396,9	305,1	199,2	178,5 (-49,2)	179,8	167,9	155,5	133,2	116,4	100,7	87,9	76,3 (-31,7)	47,4	25,7
Industrie*	281,5	191,0	194,9	169,2 (-12,8)	168,1 (-8,9)	166,1 (-5,9)	163,5 (-1,5)	155,7 (-1,3)	146,7 (-2,3)	138,7 (-1,3)	131,0 (-1,0)	123,9 (-1,1)	117,7 (-0,3)	95,5	76,2
Gebäude*	209,7	153,9	116,6	114,9 (+1,9)	112,3 (+4,3)	108,8 (+6,8)	105,0 (+8,0)	99,6 (+7,6)	93,6 (+6,6)	87,2 (+5,2)	80,8 (+3,8)	73,9 (+1,9)	67,0 (-0,0)	38,5	20,6
Verkehr*	163,9	160,0	162,3	152,2 (+7,2)	159,2 (+20,2)	152,1 (+18,1)	144,4 (+16,4)	134,9 (+11,9)	126,6 (+9,6)	116,7 (+4,7)	107,6 (+2,6)	97,1 (+1,1)	84,1 (-0,9)	42,3	21,4
Landwirtschaft*	89,9	70,1	69,8	64,4 (-3,6)	63,5 (-3,5)	62,7 (-3,3)	61,9 (-3,1)	62,0 (-1,0)	60,8 (-1,2)	59,7 (-1,3)	58,6 (-0,4)	57,5 (+0,5)	55,8 (-0,2)	50,1	44,7
Abfallwirtschaft und Sonstiges*	38,3	21,3	9,7	8,1 (-0,9)	7,7 (-0,3)	7,2 (-0,8)	6,8 (-0,2)	6,3 (-0,7)	5,8 (-0,2)	5,4 (-0,6)	4,9 (-0,1)	4,5 (-0,5)	4,0 (-0,0)	2,8	2,6
<b>Gesamt*</b>	<b>1.249,5</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>707,9</b>	<b>689,2</b> <b>(-66,8)</b>	<b>676,8</b>	<b>649,5</b>	<b>614,0</b>	<b>566,8</b>	<b>524,1</b>	<b>483,6</b>	<b>444,6</b>	<b>405,0</b> <b>(-33,0)</b>	<b>276,6</b>	<b>191,2</b>
Jahresemissionsmenge Bundes-Klimaschutzgesetz 2021					756								438		
<b>Nachrichtlich</b>															
LULUCF	-28,8	-13,4	-26,9	8,2	0,7	-14,8	-15,6	-16,4	-18,4	-19,9	-21,4	-23,2	-25,1 (-0,1)	-33,7	-40,4
Internationaler Luft- und Seeverkehr	18,7	30,4	34,7	25,4	33,7	33,9	34,3	34,4	34,5	34,9	35,0	35,4	35,2	32,9	30,5

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

\*Die Abweichung von der Jahresemissionsmenge gemäß Klimaschutzgesetz 2021 ist in Klammern angegeben. Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt. Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

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

Im Sektor Energiewirtschaft wird im Vergleich zu den anderen Sektoren die größte Emissionsreduktion bis 2030 erreicht. Mit 76,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq liegen die Emissionen um rund 75 % unter dem Wert von 2018 und um 84 % unter jenem von 1990. Auch wird damit die Jahresemissionsmenge gemäß Klimaschutzgesetz von 108 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq für diesen Sektor deutlich unterschritten. Die größten Treiber für diesen Rückgang sind der Ausstieg aus der Kohleverstromung und der Ausbau der Erneuerbaren Energien.

Auch im Sektor Industrie wird die Jahresemissionsmenge für 2030 unterschritten, jedoch nur knapp. Mit 117,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq reduzieren sich die Emissionen bis 2030 um rund 40 % gegenüber 2018 und um 58 % gegenüber 1990. Dieser Trend beruht auf der Emissionsreduktion in verschiedenen Subsektoren, insbesondere im Bereich der Industriekraftwerke und der Eisen- und Stahlindustrie.

Ähnlich ist die Situation in den Sektoren Gebäude und Verkehr: Mit 67,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq bzw. 84,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. werden die Jahresemissionsmengen für 2030 knapp eingehalten. Die Emissionsreduktion beträgt im Gebäudesektor rund 43 % gegenüber 2018 und 68 % gegenüber 1990. Sie kommt einerseits durch den abnehmenden Wärmebedarf durch Sanierungsmaßnahmen und andererseits durch den Umstieg auf emissionsarme Heizungssysteme zustande. Im Sektor Verkehr sinken die Emissionen um 48 % im Vergleich zu 2018 und um 49 % gegenüber 1990, hauptsächlich getrieben durch den Ausbau der Elektromobilität im Straßenverkehr.

Der Sektor Landwirtschaft weist im Vergleich zu anderen Sektoren eine geringere Emissionsreduktion auf (-20 % gegenüber 2018 und -38 % gegenüber 1990), mit 55,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq wird das Sektorziel für 2030 aber ebenfalls eingehalten. Schließlich hält auch der Sektor Abfallwirtschaft und Sonstige mit Emissionen von 4,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq die Jahresemissionsmenge für 2030 ein; diese Emissionen liegen um 58 % unter dem Wert von 2018 und 89 % unter jenem von 1990. Diese bedeutende Abnahme ist durch die verminderte Deponierung von organischen Abfällen seit dem Jahr 2005 getrieben.

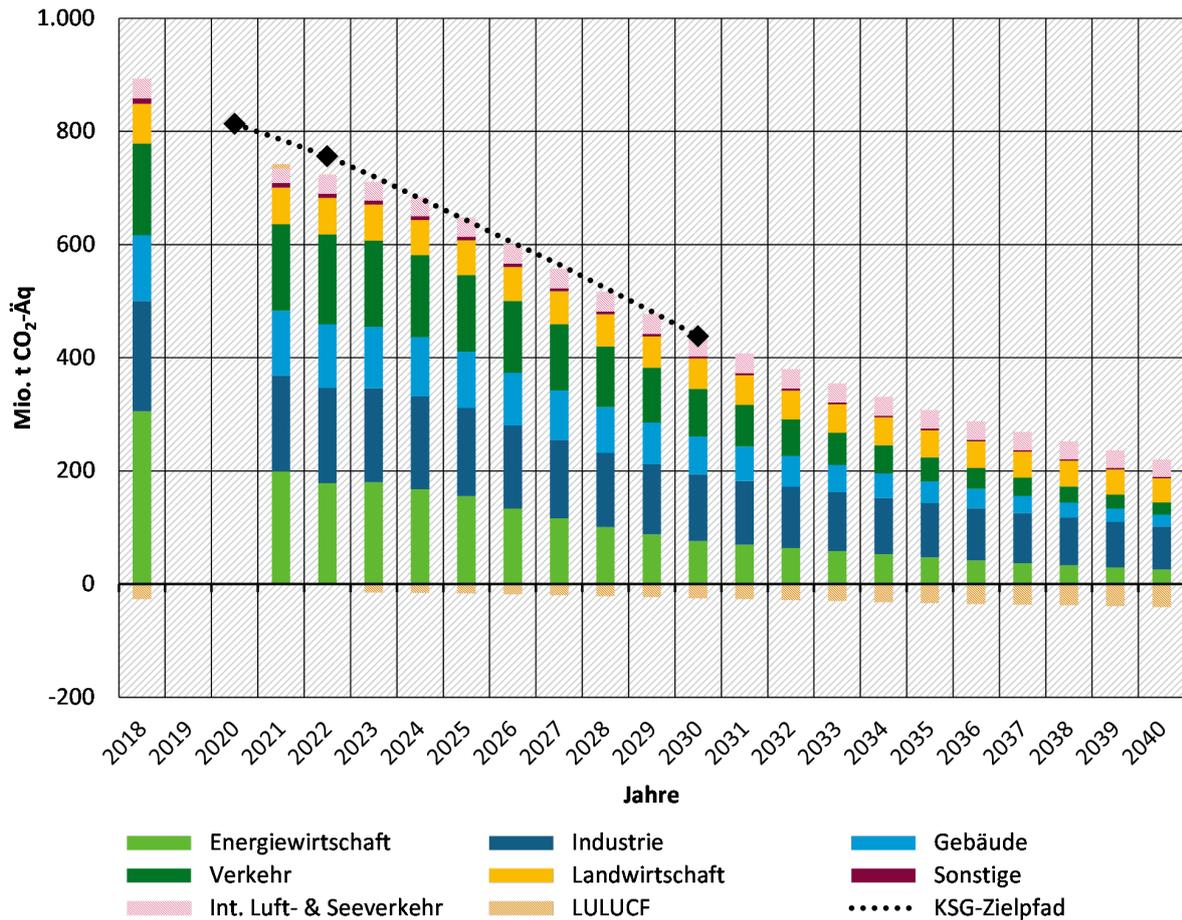
Schließlich leistet auch der LULUCF-Sektor im Jahr 2030 den im Klimaschutzgesetz 2021 festgelegten Beitrag: Mit Emissionen von -25,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq wird im Jahr 2030 durch diesen Sektor um 0,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq mehr CO<sub>2</sub> netto aus der Atmosphäre aufgenommen als im Klimaschutzgesetz festgelegt. Es ist aber zu beachten, dass für die Überprüfung der Zielerreichung gemäß Klimaschutzgesetz die drei vorhergehenden Kalenderjahre ebenfalls berücksichtigt werden.<sup>119</sup> In Tabelle 152 ist nur der Wert für das Jahr 2030 angegeben.

In Abbildung 124 ist die Entwicklung der Treibhausgasemissionen grafisch dargestellt. Es ist zu sehen, dass in den Jahren 2022 und 2030 die relevanten Emissionen (ohne internationalen Luft- und Seeverkehr und ohne LULUCF) unter den Jahresemissionsmengen des KSG bleiben. Für die restlichen Jahre wurde für alle Sektoren außer der Energiewirtschaft eine Jahresemissionsmenge festgelegt. Daher gibt es nicht für alle Jahre ein Gesamtziel. Der Zielpfad ist für diese Jahre als linearer Verlauf dargestellt.

---

<sup>119</sup> Laut KSG soll die Zielerreichung anhand des Mittelwerts der jährlichen Emissionsbilanzen des jeweiligen Zieljahres und der drei vorhergehenden Kalenderjahre geprüft werden. Das Ziel im KSG ist es, natürliche Schwankungen abzupuffern. In der vorliegenden Modellierung werden keine jährlichen Schwankungen abgebildet, weshalb auf diese Mittelwertbildung verzichtet und lediglich das jeweilige Zieljahr herangezogen wird.

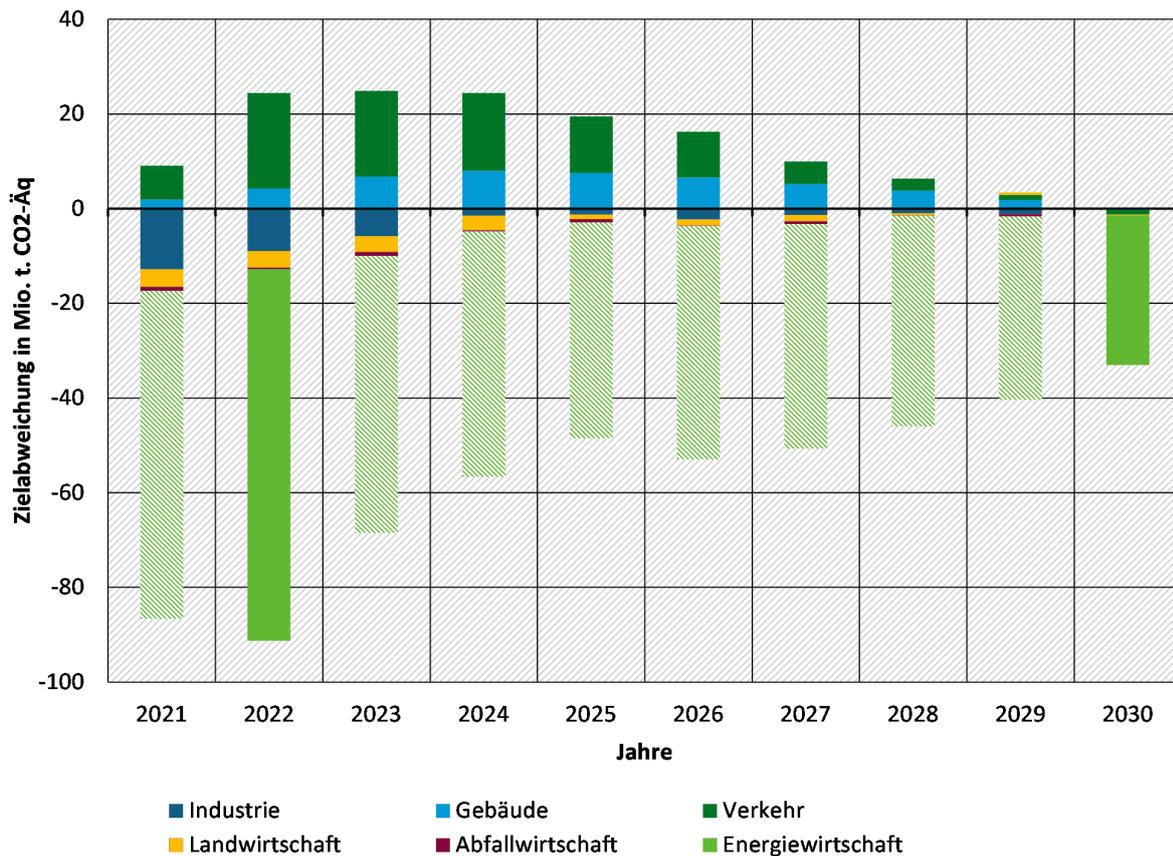
**Abbildung 124: Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im KIS-2030 nach KSG-Sektoren im Vergleich mit dem Zielpfad, 2018-2040**



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

Die sektorale Abweichung der Emissionen im KIS-2030 für jedes der Jahre 2021 bis 2030 ist in Abbildung 126. Sie zeigt, wie die Abweichungen im Zeitverlauf für die meisten Sektoren hin zu einer nahezu perfekten Zielerreichung konvergieren. Lediglich die Energiewirtschaft weist im kompletten Szenarienverlauf durchgehend deutlich niedrigere Emissionen als das Sektorziel auf. Da für die Energiewirtschaft nur Ziele für die Jahre 2022 und 2030 festgelegt wurden, wurden indikative Zwischenziele durch lineare Interpolation ermittelt.

**Abbildung 125: Abweichung der THG-Emissionen im KIS-2030 von KSG-Sektorzielen, 2021-2030**



Anmerkung: Zielabweichung der Energiewirtschaft für alle Jahre außer 2022 und 2030 nur indikativ.  
 Quelle: (UBA 2020c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

### 15.2.4 Emissionen in EU-ETS, ESR und BEHG

In Tabelle 153 sind die Emissionen des KIS-2030 getrennt nach EU-ETS und Effort Sharing Regulation (ESR) dargestellt. Im Basisjahr 2018 waren ESR-Emissionen nur etwa 3 % höher als die im EU-ETS erfassten Emissionen stationärer Anlagen. Da aber der Rückgang der EU-ETS-Emissionen bis 2030 deutlich schneller ist als der Rückgang der ESR-Emissionen, sind die ESR-Emissionen im Jahr 2030 höher als die Emissionen der stationären EU-ETS-Anlagen. Im EU-ETS wird 2030 ein Emissionsrückgang um 72 % gegenüber dem Referenzjahr 2005 erzielt. Bei den ESR-Emissionen beträgt der Rückgang in diesem Zeitraum nur knapp 46 %. Dieser Rückgang ist zwar höher als der aktuell noch gültige Zielwert von 38 %, liegt aber unter dem aktuell diskutierten Zielwert von 50 % im Fit-for-55-Paket der Europäische Kommission.

**Tabelle 153: Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor im KIS-2030, 2005-2040**

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq					
Emissionen stationärer EU-ETS*	514,9	422,3	246,8	144,4	101,5	69,1
Emissionen ESR**	476,0	434,1	365,5	258,8	174,2	121,8

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Summe ESR und stationärer EU-ETS***</b>	<b>990,9</b>	<b>856,3</b>	<b>612,3</b>	<b>403,2</b>	<b>275,7</b>	<b>190,8</b>
<i>Stationärer EU-ETS ggü. 2005</i>	0,0 %	-18,0 %	-52,1 %	-72,0 %	-80,3 %	-86,6 %
<i>ESR ggü. 2005</i>	0,0 %	-8,8 %	-23,2 %	-45,6 %	-63,4 %	-74,4 %

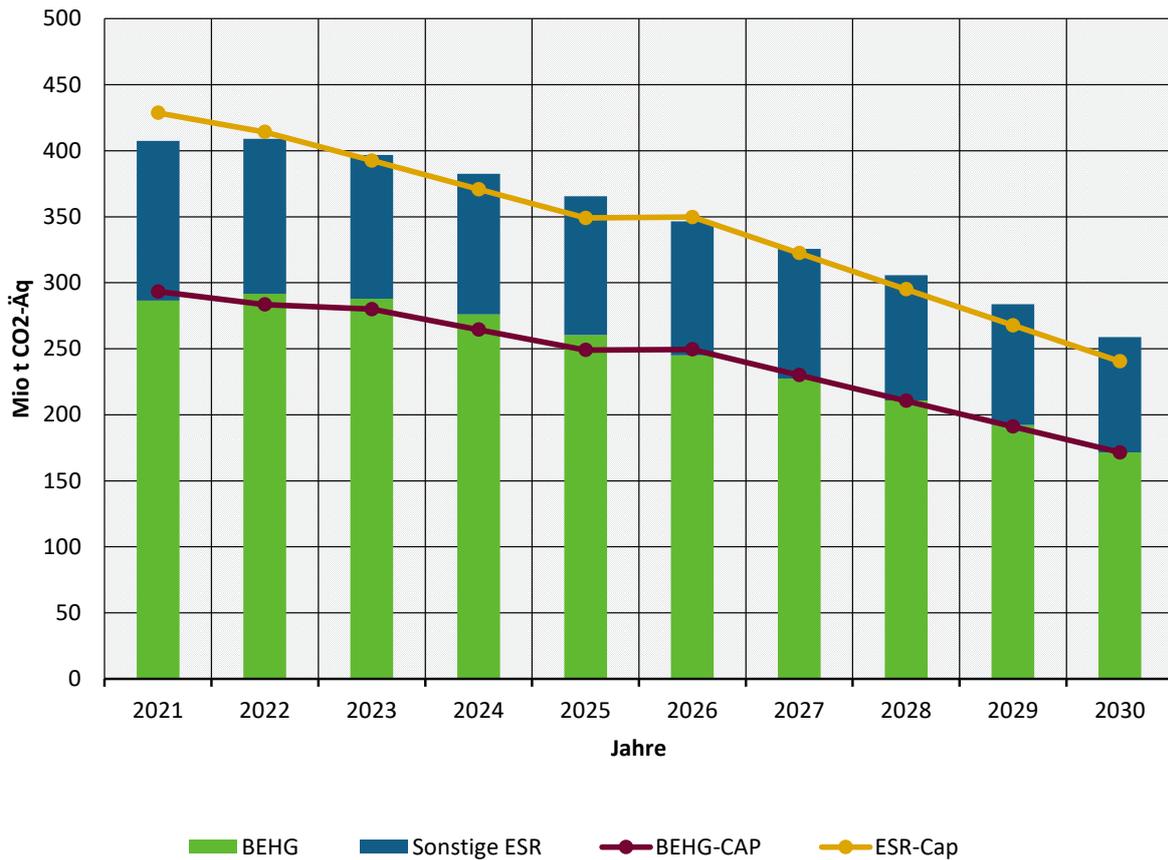
Anmerkung: \* Vom EU-ETS erfasste Emissionen in der seit 2013 gültigen Abgrenzung. \*\* Jahre 2005-2018 aus Konsistenzgründen (Vergleich mit Daten für 2020-2040) mit CRF-Kategorien berechnet; in der ab 2013 gültigen EU-ETS-Abgrenzung. Entspricht nicht dem Basiswert für das Minderungsziel unter EU-Klimaschutzverordnung. \*\*\* Diese Summe ist kleiner als die nationalen Gesamtemissionen, da CO<sub>2</sub>-Emissionen des nationalen Flugverkehrs weder vom stationären EU-ETS noch von der ESR erfasst sind.

Quelle: (UBA 2020c; 2020e), (EU-Kommission 2020), (EEA 2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

In Abbildung 126 und Tabelle 154 sind die ESR- und BEHG-Emissionen zusammen mit ihren jeweiligen zulässigen Emissionsmengen (Ziel/Cap) dar. Wie in Abschnitt 15.1 dargestellt, wurde ein mit dem Fit-for-55-Paket kompatibler ESR-Zielpfad<sup>120</sup> und ein daraus abgeleiteter BEHG-Zielpfad genutzt. Zwar ähneln grundsätzlich die Emissionsentwicklungen den Zielentwicklungen, aber dennoch wird die BEHG-Höchstmenge nur in vier von zehn Szenarijahren eingehalten, die ESR-Cap sogar nur in den Jahren 2021 und 2022. Im Jahr 2030 wird die zulässige BEHG-Höchstmenge nahezu exakt eingehalten (Übererfüllung um 0,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq). Die Abweichung der ESR-Emissionen von den zulässigen ESR-Emissionen beträgt jedoch 18 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Die Einhaltung der BEHG-Höchstmengen und der KSG-Sektorziele garantiert also nicht unbedingt die Einhaltung der ESR-Ziele. Die kumulierte Zielverfehlung in den Jahren 2021 bis 2030 beträgt bei den Brennstoffemissionen knapp 27 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und bei den ESR-Emissionen knapp 52 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

<sup>120</sup> Entsprechend einer Reduktion um 50 % zwischen 2008 und 2030.

**Abbildung 126: Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030) im KIS-2030**



Anmerkung: Siehe auch Öko-Institut et al. (2021), Kapitel 14.4, zu den verwendeten GWPs. ESR-Trajektorie basiert auf dem COM-Vorschlag von 2021.

Quelle: (EU-Kommission 2020), (Gores 2022) auf Basis von EU (2020), EC (2021a) und EC (2021c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

**Tabelle 154: Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030), KIS-2030**

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq									
ESR-Emissionen	407,4	409,1	396,8	382,6	365,5	346,6	325,7	305,8	283,9	258,8
ESR-Höchstmengen	428,7	414,2	392,5	370,8	349,0	349,7	322,4	295,1	267,8	240,4
Abweichung von ESR-Höchstmengen	-21,3	-5,1	4,3	11,8	16,4	-3,2	3,3	10,7	16,1	18,4
BEHG-Emissionen	286,6	291,7	287,8	276,1	260,5	244,9	227,4	210,8	192,3	171,4
BEHG-Höchstmengen	293,4	283,4	280,0	264,5	249,0	249,5	230,0	210,5	191,0	171,5

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Abweichung von BEHG-Höchstmengen	-6,8	8,2	7,8	11,6	11,5	-4,6	-2,6	0,3	1,3	-0,1

Anmerkung: Siehe auch Öko-Institut et al. (2021), Abschnitt 14.4, zu den verwendeten GWPs. ESR-Trajektorie basiert auf dem COM-Vorschlag von 2021.

Quelle: (EU-Kommission 2020), (Gores 2022) auf Basis von EU (2020), EC (2021a) und EC (2021c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

In Tabelle 155 sind für jeden KSG-Sektor die auf jeweils auf den EU-ETS und die ESR entfallenden Emissionen dargestellt. Die ESR-Emissionen sind zusätzlich noch in Brennstoffemissionen gemäß BEHG und sonstige Emissionen unterteilt.

In der Energiewirtschaft ist die Reduktion der EU-ETS-Emissionen deutlich stärker als die Reduktion der ESR-Emissionen. Waren die EU-ETS-Emissionen 2018 noch mehr als sieben Mal so hoch wie die ESR-Emissionen, so sind sie 2030 nicht einmal mehr doppelt so groß. Der nicht auf die BEHG-Brennstoffemissionen entfallende Teil der ESR-Emissionen sind neben den Methan- und Lachgasemissionen aus Verbrennungsprozessen die diffusen Emissionen.

In der Industrie ist der Rückgang der ESR-Emissionen mit 42 % etwas stärker als der Rückgang der EU-ETS-Emissionen. Ein wesentlicher Grund ist hier der deutliche Rückgang der Emission fluoriertes Treibhausgas (F-Gase) die hauptsächlich im außerhalb des BEHG liegenden Teils der ESR bilanziert wird.

Bei den Gebäuden sind fast alle Emissionen im BEHG erfasst, lediglich einige wenige Anlagen aus dem Energiebilanzsektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen unterliegen dem EU-ETS.

Im Verkehr sind alle inländischen Transportarten außer dem Luftverkehr in der ESR erfasst. Vom BEHG ausgenommen ist zudem die Binnenschifffahrt und somit zusammen mit den Methan- und Lachgasemissionen als „sonstige ESR“ bilanziert. Die BEHG-Emissionen im Verkehr reduzieren sich bis 2030 stärker als die nicht vom BEHG erfassten Emissionen.

Im Landwirtschaftssektor dominieren die Emissionen der biologisch-chemischen Prozesse, die zwar größtenteils in der ESR umfasst sind, aber nicht durch das BEHG reguliert werden. Die verbrennungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen entfallen größtenteils auf das BEHG. Auf den EU-ETS entfallen neben einem sehr geringen Anteil der verbrennungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen vor allem Emissionen aus der Düngemittelausbringung<sup>121</sup>. Abweichend von der Inventarsystematik werden diese im EU-ETS als Teil der Düngemittelherstellung bilanziert.

**Tabelle 155: Emissionsentwicklung der KSG-Sektoren nach Regime im KIS-2030, 2005-2040**

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq					
<b>Energiewirtschaft</b>	<b>396,9</b>	<b>305,1</b>	<b>155,5</b>	<b>76,3</b>	<b>47,4</b>	<b>25,7</b>
davon EU-ETS	361,1	268,8	124,1	50,7	26,3	8,9
davon ESR	35,9	36,3	31,4	25,7	21,2	16,8
<i>davon BEHG</i>			11,1	7,9	4,0	0,1
<i>davon sonstige ESR</i>			20,3	17,7	17,1	16,7
<b>Industrie</b>	<b>191,0</b>	<b>194,9</b>	<b>155,7</b>	<b>117,7</b>	<b>95,5</b>	<b>76,2</b>

<sup>121</sup> Siehe auch Öko-Institut (2021a), Abschnitt 3.1.2.

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
davon EU-ETS	152,6	152,4	121,8	93,1	74,7	59,7
davon ESR	38,4	42,5	33,9	24,6	20,8	16,5
<i>davon BEHG</i>			16,7	13,6	10,8	7,3
<i>davon sonstige ESR</i>			17,2	11,0	9,9	9,1
<b>Gebäude</b>	<b>153,9</b>	<b>116,6</b>	<b>99,6</b>	<b>67,0</b>	<b>38,5</b>	<b>20,6</b>
davon EU-ETS	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
davon ESR	153,3	116,0	99,1	66,7	38,3	20,5
<i>davon BEHG</i>			98,3	66,2	37,9	20,1
<i>davon sonstige ESR</i>			0,8	0,5	0,4	0,3
<b>Verkehr</b>	<b>160,0</b>	<b>162,3</b>	<b>134,9</b>	<b>84,1</b>	<b>42,3</b>	<b>21,4</b>
davon EU-ETS*	2,2	2,0	1,8	1,7	0,9	0,3
davon ESR	157,7	160,3	133,1	82,4	41,5	21,0
<i>davon BEHG</i>			129,3	79,2	39,1	18,9
<i>davon sonstige ESR</i>			3,9	3,2	2,4	2,1
<b>Landwirtschaft</b>	<b>70,1</b>	<b>69,8</b>	<b>62,0</b>	<b>55,8</b>	<b>50,1</b>	<b>44,7</b>
davon EU-ETS	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3
davon ESR	69,5	69,2	61,6	55,4	49,7	44,4
<i>davon BEHG</i>			5,1	4,5	3,5	2,5
<i>davon sonstige ESR</i>			56,5	50,9	46,2	41,9
<b>Abfallwirtschaft &amp; Sonstige</b>	<b>21,3</b>	<b>9,7</b>	<b>6,3</b>	<b>4,0</b>	<b>2,8</b>	<b>2,6</b>
davon EU-ETS	NA	NA	NA	NA	NA	NA
davon ESR	21,3	9,7	6,3	4,0	2,8	2,6
<i>davon BEHG</i>			NA	NA	NA	NA
<i>davon sonstige ESR</i>			6,3	4,0	2,8	2,6
<b>Summe</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>614,0</b>	<b>405,0</b>	<b>276,6</b>	<b>191,2</b>
davon stationärer EU-ETS	514,9	422,3	246,8	144,4	101,5	69,1
davon nationaler Flugverkehr im EU-ETS	2,2	2,0	1,8	1,7	0,9	0,3
davon ESR	476,1	434,1	365,5	258,8	174,2	121,8
<i>davon BEHG</i>			260,5	171,4	95,2	49,0
<i>davon sonstige ESR</i>			105,0	87,4	79,0	72,7

Anmerkung: \* Bezieht sich lediglich auf vom Inventar erfassten nationalen Flugverkehr. Der ebenfalls vom EU-ETS erfasste internationale Flugverkehr ist nicht dargestellt.

Quelle: (UBA 2020c; 2020e), (EU-Kommission 2020), EEA (2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

## 15.3 KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)

### 15.3.1 Emissionen aus Verbrennungsprozessen

Im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) entwickeln sich die verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen wie in Tabelle 156 dargestellt. Diese unterscheiden sich nur in geringem Maße von jenen im KIS-2030. So bewirken die Preisunterschiede für Energieträger zwischen den beiden Szenarien Änderungen beim Einsatz von Mineralöl und Biomasse: Im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) sind aufgrund der niedrigeren Brennstoffpreise die Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung von Mineralöl im Jahr 2030 mit 180,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um rund 4 % höher als im KIS-2030. Die Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung der anderen Energieträger sind zwischen den beiden Szenarien annähernd identisch.

**Tabelle 156: Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen (inklusive internationalem Verkehr) nach Brennstoffen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Braunkohle	346,5	178,2	160,6	35,6	0,9	0,5	0,3
Steinkohle	203,7	165,7	116,8	49,4	17,8	10,5	7,6
Mineralöl	336,5	311,6	276,6	241,0	180,9	122,4	84,3
Fossile Gase	122,5	175,2	168,2	183,2	129,8	77,2	36,2
Abfall	7,7	13,4	19,8	17,2	15,5	15,4	15,3
Biomasse*	0,5	1,2	3,4	2,7	2,2	2,1	2,2
Synthetische Kraftstoffe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
<b>Brennstoffe gesamt</b>	<b>1.017,4</b>	<b>845,3</b>	<b>745,5</b>	<b>529,1</b>	<b>347,0</b>	<b>228,2</b>	<b>145,9</b>
Rauchgasentschwefelung (REA)	0,6	1,1	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0
<b>Gesamt inklusive REA</b>	<b>1.018,0</b>	<b>846,5</b>	<b>746,4</b>	<b>529,3</b>	<b>347,0</b>	<b>228,2</b>	<b>145,9</b>
<i>ggü. 2005</i>	<i>20,3 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-11,8 %</i>	<i>-37,5 %</i>	<i>-59,0 %</i>	<i>-73,0 %</i>	<i>-82,8 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-16,9 %</i>	<i>-26,7 %</i>	<i>-48,0 %</i>	<i>-65,9 %</i>	<i>-77,6 %</i>	<i>-85,7 %</i>
Nachrichtlich							
CO <sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung	22,1	57,3	100,8	102,3	100,0	92,6	88,3
CO <sub>2</sub> in CCS	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,9	1,2

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

Anmerkung: \* Bezieht sich auf die CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O-Emissionen, also ohne CO<sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung

### 15.3.2 Emissionen nach Treibhausgasen

Tabelle 157 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Gasen im KIS-2030 (BEHG). Auch hier sind die Unterschiede zum KIS-2030 gering. Mit 343,6 Mio. t im Jahr 2030 sind die

CO<sub>2</sub>-Emissionen im KIS-2030 (BEHG) um rund 2 % höher als im KIS-2030. Die Emissionen der restlichen Szenarien unterscheiden sich nur minimal zwischen den Szenarien.

**Tabelle 157: Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Gas	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )*	1.052,3	866,4	755,3	532,4	343,6	223,0	141,8
Methan (CH <sub>4</sub> )	121,2	69,4	52,6	44,5	38,5	33,5	29,8
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	62,5	43,3	35,5	30,1	25,5	22,9	20,8
Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW)	0,1	9,0	10,5	7,4	3,5	3,3	3,1
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW)	3,1	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Schwefelhexafluorid (SF <sub>6</sub> )	4,4	3,3	3,9	2,3	0,7	0,4	0,4
Nicht spezifizierter Mix (HFKW/FKW)	5,8	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Stickstofftrifluorid (NF <sub>3</sub> )	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Gesamt</b>	<b>1.249,5</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>617,1</b>	<b>412,2</b>	<b>283,6</b>	<b>196,4</b>
<i>ggü. 2005</i>	<i>25,8 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-13,6 %</i>	<i>-37,9 %</i>	<i>-58,5 %</i>	<i>-71,4 %</i>	<i>-80,2 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-20,5 %</i>	<i>-31,3 %</i>	<i>-50,6 %</i>	<i>-67,0 %</i>	<i>-77,3 %</i>	<i>-84,3 %</i>
Nachrichtlich:							
CO <sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung	21,1	56,6	97,5	102,3	100,0	92,6	88,3
CO <sub>2</sub> in CCS	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,9	1,2

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

Anmerkung: \* Ohne CO<sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung.

Ohne Freisetzung/Bindung aus LULUCF und ohne Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr

### 15.3.3 Emissionen nach KSG-Sektoren

In Tabelle 158 ist die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im KIS-2030 (BEHG) in den einzelnen KSG-Sektoren dargestellt. Merkliche Unterschiede zum KIS-2030 ergeben sich in jenen Sektoren, die vom BEHG erfasst sind: Im Verkehrssektor sind die Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 mit 90,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um rund 7 % höher als im KIS-2030, und im Sektor Gebäude sind sie mit 68,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um 2 % höher. Die Emissionen der Energiewirtschaft sind mit 75,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um rund 1 % geringer. In den restlichen Sektoren unterscheiden sich die Treibhausgasemissionen zwischen den beiden Szenarien um weniger als 1 %.

**Tabelle 158: Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren zwischen 1990 und 2040 im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

Sektor	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Energiewirtschaft*	466,2	396,9	305,1	155,3	75,3 (-32,7)	47,0	25,9
Industrie*	281,5	191,0	194,9	155,7 (-1,3)	118,4 (+0,4)	96,2	76,5
Gebäude*	209,7	153,9	116,6	100,2 (+8,2)	68,3 (+1,3)	38,9	21,1
Verkehr*	163,9	160,0	162,3	137,6 (+14,6)	90,4 (+5,4)	48,7	25,6
Landwirtschaft*	89,9	70,1	69,8	62,0 (-1,0)	55,8 (-0,2)	50,1	44,7
Abfallwirtschaft und Sonstiges*	38,3	21,3	9,7	6,3 (-0,7)	4,0 (-0,0)	2,8	2,6
<b>Gesamt*</b>	<b>1.249,5</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>617,1</b>	<b>412,2</b>	<b>283,6</b>	<b>196,4</b>
Jahresemissionsmenge Bundes-Klimaschutzgesetz 2021					438		
Nachrichtlich:							
LULUCF	-28,8	-13,4	-26,9	-16,4	-25,1 (-0,1)	-33,7	-40,4
Internationaler Luft- und Seeverkehr	18,7	30,4	34,7	34,4	35,2	33,0	30,5

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

\*Die Abweichung von der Jahresemissionsmenge gemäß Klimaschutzgesetz 2021 ist in Klammern angegeben. Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt. Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

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

### 15.3.4 Emissionen in EU-ETS, ESR und BEHG

In Tabelle 159 sind die Emissionen der BEHG-Preissensitivität des KIS-2030 getrennt nach EU-ETS und Effort Sharing Regulation (ESR) dargestellt. Im Basisjahr 2018 waren ESR-Emissionen nur etwa 3 % höher als die im EU-ETS erfassten Emissionen stationärer Anlagen. Erwartungsgemäß verändern sich in der BEHG-Sensitivität vor allem die ESR-Emissionen, während es bei den ETS-Emissionen nur kleine, indirekte Effekte gibt. Im EU-ETS wird 2030 (wie auch im KIS-2030 selbst) ein Emissionsrückgang um 72 % gegenüber dem Referenzjahr 2005 erzielt. Bei den ESR-Emissionen beträgt der Rückgang in diesem Zeitraum nur knapp 44 %, dies ist ein um etwa zwei Prozentpunkte schwächerer Emissionsrückgang als im KIS-2030.

**Tabelle 159: Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor im KIS-2030, 2005-2040**

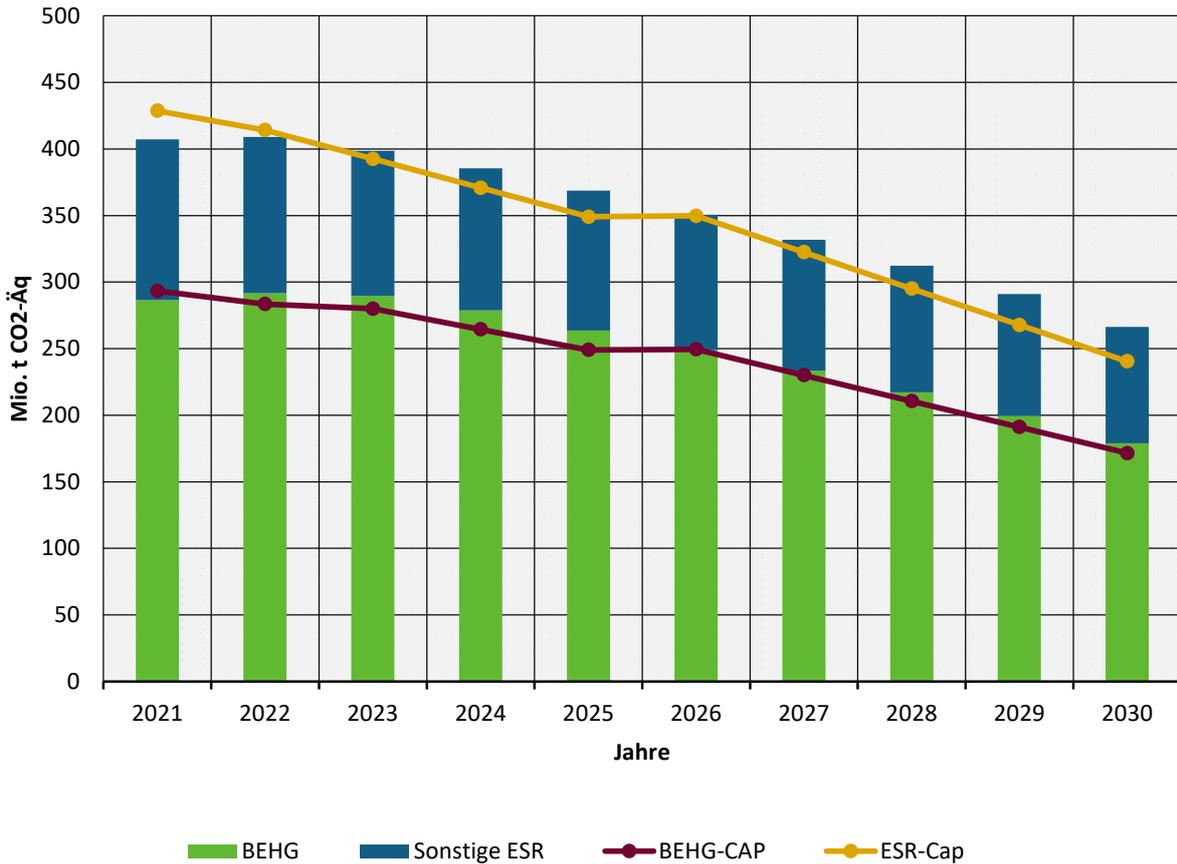
	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq					
Emissionen stationärer EU-ETS*	514,9	422,3	246,6	144,1	101,8	69,5
Emissionen ESR**	476,0	434,1	368,8	266,3	181,0	126,6
<b>Summe ESR und stationärer EU-ETS***</b>	<b>990,9</b>	<b>856,3</b>	<b>615,3</b>	<b>410,5</b>	<b>282,8</b>	<b>196,1</b>
<i>Stationärer EU-ETS ggü. 2005</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-18,0 %</i>	<i>-52,1 %</i>	<i>-72,0 %</i>	<i>-80,2 %</i>	<i>-86,5 %</i>
<i>ESR ggü. 2005</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-8,8 %</i>	<i>-22,5 %</i>	<i>-44,0 %</i>	<i>-62,0 %</i>	<i>-73,4 %</i>

Anmerkung: \* Vom EU-ETS erfasste Emissionen in der seit 2013 gültigen Abgrenzung. \*\* Jahre 2005-2018 aus Konsistenzgründen (Vergleich mit Daten für 2020-2040) mit CRF-Kategorien berechnet; in der ab 2013 gültigen EU-ETS-Abgrenzung. Entspricht nicht dem Basiswert für das Minderungsziel unter der Effort-Sharing-Entscheidung. \*\*\* Diese Summe ist kleiner als die nationalen Gesamtemissionen, da CO<sub>2</sub>-Emissionen des nationalen Flugverkehrs weder vom stationären EU-ETS noch von der ESR erfasst sind.

Quelle: (UBA 2020c; 2020e), (EU-Kommission 2020), (EEA 2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

In Abbildung 127 und Tabelle 160 sind die ESR- und BEHG-Emissionen der BEHG-Sensitivität des KIS-2030 zusammen mit ihren jeweiligen zulässigen Emissionsmengen (Ziel/Cap) dargestellt. Das BEHG-Ziel wird nur im Jahr 2021 und die ESR-Cap nur in den Jahren 2021 und 2026 eingehalten. Die Abweichung der Brennstoffemissionen von der BEHG-Höchstmenge beträgt im Jahr 2030 gut 7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, die Abweichung der ESR-Emissionen von den zulässigen ESR-Emissionen sogar knapp 26 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Die deutliche höhere Zielverfehlung beim ESR als beim BEHG bedeutet, dass ein relevanter Anteil der ESR-Zielverfehlung nicht durch energetische Emissionen, sondern andere Emissionen (z. B. Landwirtschaft, Abfall, Prozessemissionen) verursacht wird. Die kumulierte Zielverfehlung in den Jahren 2021 bis 2030 beträgt bei den Brennstoffemissionen 65 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und bei den ESR-Emissionen 91 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

**Abbildung 127: Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030) im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**



Anmerkung: Siehe auch Öko-Institut et al. (2021), Abschnitt 14.4, zu den verwendeten GWPs. ESR-Trajektorie basiert auf dem COM-Vorschlag von 2021.

Quelle: (EU-Kommission 2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

**Tabelle 160: Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030), KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)**

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq									
ESR-Emissionen	407,3	409,1	398,7	385,4	368,8	350,5	331,9	312,3	291,1	266,3
ESR-Höchstmengen	428,7	414,2	392,5	370,8	349,0	349,7	322,4	295,1	267,8	240,4
Abweichung von ESR-Höchstmengen	-21,4	-5,1	6,2	14,6	19,7	0,8	9,5	17,2	23,3	25,9
BEHG-Emissionen	286,4	291,6	289,6	278,8	263,7	248,8	233,4	217,2	199,4	178,9
BEHG-Höchstmengen	293,4	283,4	280,0	264,5	249,0	249,5	230,0	210,5	191,0	171,5
Abweichung von BEHG-Höchstmengen	-7,0	8,1	9,6	14,3	14,7	-0,7	3,4	6,7	8,4	7,4

Anmerkung: Siehe auch Öko-Institut et al. (2021), Abschnitt 14.4, zu den verwendeten GWPs. ESR-Trajektorie basiert auf dem COM-Vorschlag von 2021.

Quelle: (EU-Kommission 2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

In Tabelle 161 sind für jeden KSG-Sektor die auf jeweils auf den EU-ETS und die ESR entfallenden Emissionen dargestellt. Die ESR-Emissionen sind zusätzlich noch in Brennstoffemissionen gemäß BEHG und sonstige Emissionen unterteilt.

**Tabelle 161: Emissionsentwicklung der KSG-Sektoren nach Regime im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2005-2040**

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq					
<b>Energiewirtschaft</b>	<b>396,9</b>	<b>305,1</b>	<b>155,3</b>	<b>75,3</b>	<b>47,0</b>	<b>25,9</b>
davon EU-ETS	361,1	268,8	123,9	49,8	25,9	9,1
davon ESR	35,9	36,3	31,4	25,5	21,1	16,8
<i>davon BEHG</i>			11,0	7,8	4,0	0,1
<i>davon sonstige ESR</i>			20,3	17,7	17,1	16,7
<b>Industrie</b>	<b>191,0</b>	<b>194,9</b>	<b>155,7</b>	<b>118,4</b>	<b>96,2</b>	<b>76,5</b>
davon EU-ETS	152,6	152,4	121,8	93,6	75,3	60,0
davon ESR	38,4	42,5	33,9	24,7	20,9	16,5
<i>davon BEHG</i>			16,7	13,7	10,9	7,4
<i>davon sonstige ESR</i>			17,2	11,0	10,0	9,2
<b>Gebäude</b>	<b>153,9</b>	<b>116,6</b>	<b>100,2</b>	<b>68,3</b>	<b>38,9</b>	<b>21,1</b>
davon EU-ETS	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
davon ESR	153,3	116,0	99,7	67,9	38,7	21,0
<i>davon BEHG</i>			98,9	67,4	38,2	20,6
<i>davon sonstige ESR</i>			0,9	0,6	0,5	0,4
<b>Verkehr</b>	<b>160,0</b>	<b>162,3</b>	<b>137,6</b>	<b>90,4</b>	<b>48,7</b>	<b>25,6</b>
davon EU-ETSa	2,2	2,0	1,8	1,7	0,9	0,3
davon ESR	157,7	160,3	135,8	88,7	47,8	25,3
<i>davon BEHG</i>			131,9	85,5	45,3	23,1
<i>davon sonstige ESR</i>			3,9	3,2	2,5	2,1
<b>Landwirtschaft</b>	<b>70,1</b>	<b>69,8</b>	<b>62,0</b>	<b>55,8</b>	<b>50,1</b>	<b>44,7</b>
davon EU-ETS	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3
davon ESR	69,5	69,2	61,6	55,4	49,7	44,4
<i>davon BEHG</i>			5,1	4,5	3,5	2,5
<i>davon sonstige ESR</i>			56,5	50,9	46,2	41,9
<b>Abfallwirtschaft &amp; Sonstige</b>	<b>21,3</b>	<b>9,7</b>	<b>6,3</b>	<b>4,0</b>	<b>2,8</b>	<b>2,6</b>
davon EU-ETS	NA	NA	NA	NA	NA	NA
davon ESR	21,3	9,7	6,3	4,0	2,8	2,6
<i>davon BEHG</i>			NA	NA	NA	NA
<i>davon sonstige ESR</i>			6,3	4,0	2,8	2,6
<b>Summe</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>617,1</b>	<b>412,2</b>	<b>283,6</b>	<b>196,4</b>

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
davon stationärer EU-ETS	514,9	422,3	246,6	144,1	101,8	69,5
davon nationaler Flugverkehr im EU-ETS	2,2	2,0	1,8	1,7	0,9	0,3
davon ESR	476,1	434,1	368,8	266,4	181,0	126,6
<i>davon BEHG</i>			263,7	178,9	101,9	53,7
<i>davon sonstige ESR</i>			105,1	87,5	79,1	72,9

Anmerkung: <sup>a</sup> Bezieht sich lediglich auf vom Inventar erfassten nationalen Flugverkehr. Der ebenfalls vom EU-ETS erfasste internationale Flugverkehr ist nicht dargestellt.

Quelle: (UBA 2020c; 2020e), (EU-Kommission 2020), EEA (2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

## 15.4 MMS

### 15.4.1 Emissionen aus Verbrennungsprozessen

Im MMS entwickeln sich die Treibhausgasemissionen aus Verbrennungsprozessen wie in Tabelle 162 dargestellt. Im Jahr 2030 sind insbesondere die Emissionen aus Braun- und Steinkohle mit 68,3 bzw. 88,9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um ein Vielfaches höher als im KIS-2030, da im MMS noch von einem bedeutenden Einsatz von Kohlen in der Energiewirtschaft und in der Industrie bis nach 2030 ausgegangen wird. Die Emissionen aus der Verbrennung von Mineralöl sind mit 228,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um rund 32 % höher als im KIS-2030, und die Emissionen aus fossilen Gasen sind mit 147,0 Mio t CO<sub>2</sub>-Äq um rund 13 % höher.

**Tabelle 162: Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen (inklusive internationalem Verkehr) nach Brennstoffen zwischen 1990 und 2040 im MMS**

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Braunkohle	346,5	178,2	160,6	118,1	68,3	57,9	1,4
Steinkohle	203,7	165,7	116,8	96,6	88,9	38,3	35,8
Mineralöl	336,5	311,6	276,6	262,5	228,4	192,0	160,5
Fossile Gase	122,5	175,2	168,2	156,6	147,0	130,4	119,1
Abfall	7,7	13,4	19,8	17,6	16,1	16,0	15,9
Biomasse*	0,5	1,2	3,4	3,1	2,9	2,9	2,8
<b>Brennstoffe gesamt</b>	<b>1.017,4</b>	<b>845,3</b>	<b>745,5</b>	<b>654,5</b>	<b>551,6</b>	<b>437,6</b>	<b>335,6</b>
Rauchgasentschwefelung (REA)	0,6	1,1	0,9	0,7	0,4	0,3	0,0
<b>Gesamt inklusive REA</b>	<b>1.018,0</b>	<b>846,5</b>	<b>746,4</b>	<b>655,2</b>	<b>552,1</b>	<b>437,8</b>	<b>335,6</b>
<i>ggü. 2005</i>	<i>20,3 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-11,8 %</i>	<i>-22,6 %</i>	<i>-34,8 %</i>	<i>-48,3 %</i>	<i>-60,4 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-16,9 %</i>	<i>-26,7 %</i>	<i>-35,6 %</i>	<i>-45,8 %</i>	<i>-57,0 %</i>	<i>-67,0 %</i>
Nachrichtlich							

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
CO <sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung	22,1	57,3	100,8	110,2	113,5	104,5	98,0
CO <sub>2</sub> in CCS	0,0	0,0	0,0	0,3	0,7	1,2	1,7

Quelle: Tabelle übernommen aus (Öko-Institut et al. 2021)

Anmerkung: \* Bezieht sich auf die CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O-Emissionen, also ohne CO<sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung

#### 15.4.2 Emissionen nach Treibhausgasen

Die Emissionsentwicklung für die einzelnen Treibhausgase im MMS ist in Tabelle 163 dargestellt. Besonders bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen bestehen deutliche Unterschiede zum KIS-2030. Diese sind im Jahr 2030 mit 554,7 Mio. t um fast 65 % höher als im KIS-2030. Die Emissionen von Methan sind mit 42,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um 10 % höher als jene im KIS-2030, und die Lachgasemissionen sind mit 31,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um 12 % höher. Diese Unterschiede in den Emissionen der drei wichtigsten Treibhausgase ergeben sich durch die Vielzahl zusätzlicher Instrumente, die im KIS-2030 im Vergleich zum MMS über alle Sektoren hinweg eingesetzt werden.

Die Emissionen fluorierter Gase sind im MMS im Jahr 2030 annähernd identisch mit jenen im KIS-2030, da in diesem Szenario keine bedeutenden zusätzlichen Instrumente eingesetzt werden, bzw. da zusätzliche Instrumente ihre Wirkung erst nach dem Jahr 2030 entfalten.

**Tabelle 163: Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS**

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )*	1.052,3	866,4	755,3	660,3	554,7	438,2	334,7
Methan (CH <sub>4</sub> )	121,2	69,4	52,6	46,3	42,4	41,2	40,5
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	62,5	43,3	35,5	34,2	31,1	30,2	29,3
Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW)	0,1	9,0	10,5	7,4	3,5	3,4	3,2
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW)	3,1	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Schwefelhexafluorid (SF <sub>6</sub> )	4,4	3,3	3,9	2,3	0,7	0,5	0,5
Nicht spezifizierter Mix (HFKW/FKW)	5,8	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Stickstofftrifluorid (NF <sub>3</sub> )	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Gesamt</b>	<b>1.249,5</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>750,9</b>	<b>632,9</b>	<b>514,0</b>	<b>408,7</b>
<i>ggü. 2005</i>	<i>25,8 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-13,6 %</i>	<i>-24,4 %</i>	<i>-36,3 %</i>	<i>-48,2 %</i>	<i>-58,8 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-20,5 %</i>	<i>-31,3 %</i>	<i>-39,9 %</i>	<i>-49,3 %</i>	<i>-58,9 %</i>	<i>-67,3 %</i>
Nachrichtlich:							
CO <sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung	21,1	56,6	97,5	110,2	113,5	104,5	98,0

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
CO <sub>2</sub> in CCS	0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,7

Quelle: Tabelle übernommen aus (Öko-Institut et al. 2021)

Anmerkung: \* Ohne CO<sub>2</sub> aus Biomasseverfeuerung.

Ohne Freisetzung/Bindung aus LULUCF und ohne Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr

### 15.4.3 Emissionen nach KSG-Sektoren

Tabelle 164 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im MMS in den einzelnen KSG-Sektoren. In allen KSG-Sektoren sowie im Sektor LULUCF sind die Emissionen höher als im KIS-2030. In der Tabelle ist auch zu sehen, dass im MMS in allen Sektoren die Jahresemissionsmengen für 2030 überschritten werden. Die größte Überschreitung ist mit +85,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Sektor Energiewirtschaft zu beobachten.

**Tabelle 164: Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren zwischen 1990 und 2040 im MMS**

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Energiewirtschaft*	466,2	396,9	305,1	242,8	193,2 (+85,2)	135,4	74,9
Industrie*	281,5	191,0	194,9	174,8 (+17,8)	154,6 (+36,6)	143,2	139,4
Gebäude*	209,7	153,9	116,6	107,9 (+15,9)	90,9 (+23,9)	69,0	50,2
Verkehr*	163,9	160,0	162,3	151,4 (+28,4)	126,4 (+41,4)	100,1	78,7
Landwirtschaft*	89,9	70,1	69,8	67,3 (+4,3)	62,8 (+6,8)	62,4	62,0
Abfallwirtschaft und Sonstiges*	38,3	21,3	9,7	6,7 (-0,3)	5,0 (+1,0)	4,0	3,4
<b>Gesamt*</b>	<b>1.249,5</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>750,9</b>	<b>632,9</b>	<b>514,0</b>	<b>408,7</b>
Jahresemissionsmenge Bundes-Klimaschutzgesetz 2021					438		
Nachrichtlich:							
LULUCF	-28,8	-13,4	-26,9	16,9	22,3 (+47,3)	23,0	21,9
Internationaler Luft- und Seeverkehr	18,7	30,4	34,7	35,1	36,0	37,1	38,0

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

\*Die Abweichung von der Jahresemissionsmenge gemäß Klimaschutzgesetz 2021 ist in Klammern angegeben. Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt. Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

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

#### 15.4.4 Emissionen in EU-ETS, ESR und BEHG

Tabelle 165 „beschreibt die Emissionsentwicklung im Referenzszenario in den vom EU-ETS und in den von der Effort Sharing Regulation (ESR)<sup>122</sup> erfassten Sektoren. Bis 2030 gehen die Emissionen von stationären Anlagen im EU-ETS um gut 43 % gegenüber dem Jahr 2005 zurück, bis 2040 um gut 68 %. Die Emissionen in den von der ESR erfassten Sektoren sinken bis 2030 um rund 29 % gegenüber 2005, bis 2040 wird eine Minderung um gut 49 % erreicht.<sup>123</sup> Das Minderungsziel im Rahmen der ESR ist derzeit -38 % bis 2030 gegenüber 2005. Dies entspricht einer Reduktion der Gesamtemissionen auf 295 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030. Damit wird das ESR-Minderungsziel im Referenzszenario deutlich verfehlt“ (Öko-Institut et al. 2021). Das deutsche ESR-Ziel wird im Rahmen des Fit-for-55-Pakets der EU-Kommission voraussichtlich auf eine Reduktion von 50 % im Jahr 2030 gegenüber 2005 erhöht. Dies entspricht einem Ziel von etwa 240 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2030.

**Tabelle 165: Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor im MMS, 2005-2040**

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq					
Emissionen stationärer EU-ETS*	514,9	422,3	351,9	291,9	226,1	165,5
Emissionen ESR**	476,0	434,1	397,2	339,3	286,2	241,6
<b>Summe ESR und stationärer EU-ETS***</b>	<b>990,9</b>	<b>856,3</b>	<b>750,9</b>	<b>632,9</b>	<b>514,0</b>	<b>408,7</b>
Stationärer EU-ETS ggü. 2005	0,0 %	-18,0 %	-31,6 %	-43,3 %	-56,1 %	-67,9 %
ESR ggü. 2005	0,0 %	-8,8 %	-16,6 %	-28,7 %	-39,9 %	-49,3 %

Anmerkung: \* Vom EU-ETS erfasste Emissionen in der seit 2013 gültigen Abgrenzung. \*Jahre 2005-2018 aus Konsistenzgründen (Vergleich mit Daten für 2020-2040) mit CRF-Kategorien berechnet; in der ab 2013 gültigen EU-ETS-Abgrenzung. Entspricht nicht dem Basiswert für das Minderungsziel unter der Effort-Sharing-Entscheidung. \*\*\*Diese Summe ist kleiner als die nationalen Gesamtemissionen, da CO<sub>2</sub>-Emissionen des nationalen Flugverkehrs weder vom stationären EU-ETS noch von der ESR erfasst sind.

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

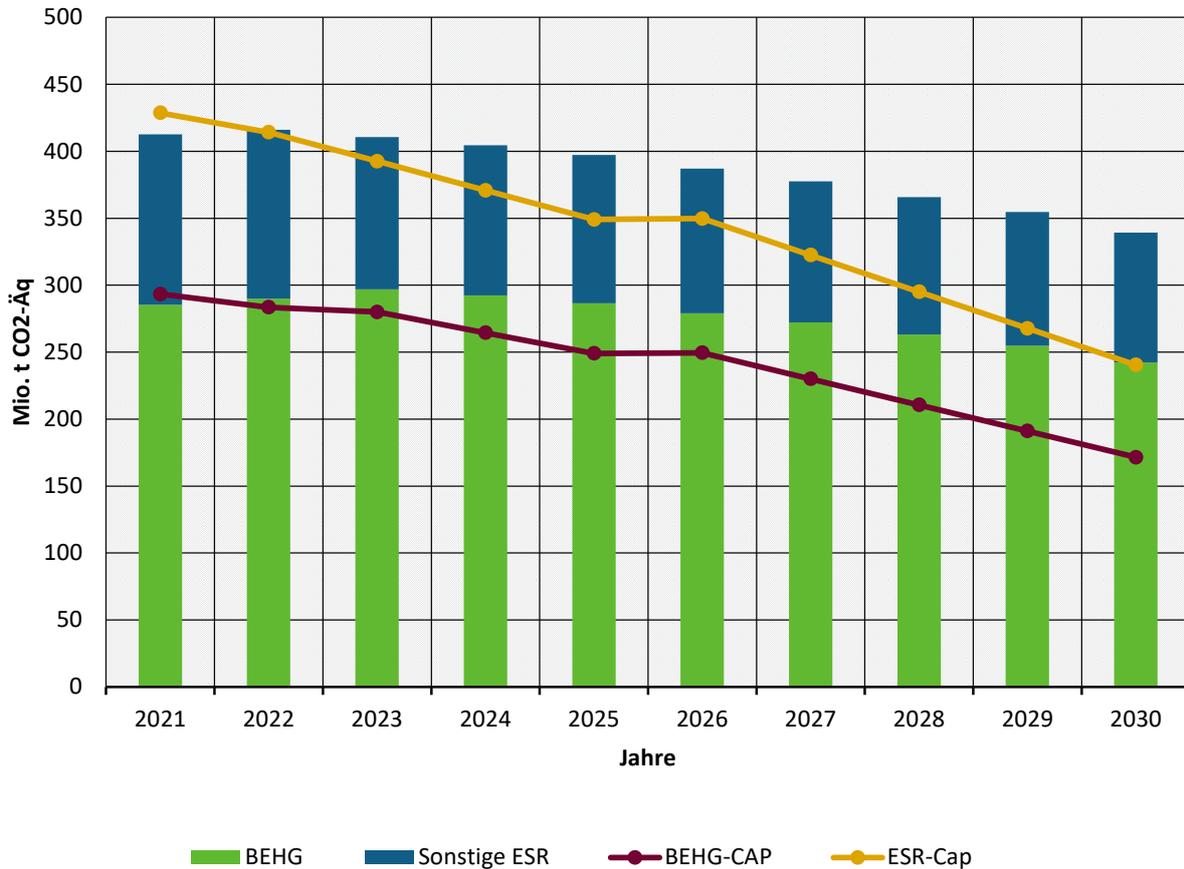
Abbildung 128 und Tabelle 166 „stellen die modellierten ESR- und BEHG-Emissionen den jeweils zulässigen jährlichen Emissionsmengen gegenüber. [...] Im Jahr 2021 werden zwar bedingt durch Auswirkungen der COVID-19-Pandemie noch die zulässigen ESR- und BEHG-Emissionen eingehalten. Aber bereits im Jahr 2022 liegen die Emissionen über den Zielwerten und bis zum Jahr 2030 vergrößert sich die jährliche Überschreitung der zulässigen Emissionsmengen kontinuierlich“ (Öko-Institut et al. 2021). Die Abweichung der Brennstoffemissionen von der BEHG-Höchstmenge beträgt im Jahr knapp 70 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq, die Abweichung der ESR-Emissionen von den zulässigen ESR-Emissionen sogar knapp 99 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. „Dies bedeutet, dass neben einer zu geringen Reduktion der Nutzung fossiler Energieträger die sonstigen Emissionsquellen unter der ESR zu etwa 30 % zur Verfehlung der zulässigen ESR-Emissionsmengen beitragen.“ (Öko-Institut et al.

<sup>122</sup> Bis 2020 Effort Sharing Decision (ESD).

<sup>123</sup> Die Minderungsverpflichtungen der Mitgliedstaaten wurden in absolute Emissionsbudgets umgerechnet, um den seit 2008 erfolgten Veränderungen in der Zuordnung der verschiedenen Quellbereiche zum Geltungsbereich der Effort-Sharing-Entscheidung und methodischen Änderungen bei der Inventarberechnung gerecht zu werden.

2021). Die kumulierte Zielverfehlung in den Jahren 2021 bis 2030 beträgt bei den Brennstoffemissionen 340 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq und bei den ESR-Emissionen 434 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

**Abbildung 128: Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030) im MMS**



Anmerkung: Siehe auch Öko-Institut et al. (2021), Abschnitt 14.4, zu den verwendeten GWPs. ESR-Trajektorie basiert auf dem COM-Vorschlag von 2021.

Quelle: (EU-Kommission 2020), (Gores 2022) auf Basis von EU (2020), EC (2021a) und EC (2021c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

**Tabelle 166: Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030) im MMS**

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq									
ESR-Emissionen	412,7	416,0	410,5	404,4	397,2	387,0	377,5	365,7	354,6	339,3
ESR-Höchstmengen	428,7	414,2	392,5	370,8	349,0	349,7	322,4	295,1	267,8	240,4
Abweichung von ESR-Höchstmengen	-16,0	1,8	18,0	33,6	48,1	37,3	55,1	70,6	86,8	98,9
BEHG-Emissionen	285,4	289,9	297,0	292,3	286,6	279,1	272,2	263,1	254,8	242,3
BEHG-Höchstmengen	293,4	283,4	280,0	264,5	249,0	249,5	230,0	210,5	191,0	171,5

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Abweichung von BEHG-Höchstmengen	-8,0	6,4	17,0	27,8	37,5	29,6	42,2	52,6	63,8	70,8

Anmerkung: Siehe auch Öko-Institut et al. (2021), Abschnitt 14.4, zu den verwendeten GWPs. ESR-Trajektorie basiert auf dem COM-Vorschlag von 2021.

Quelle: (EU-Kommission 2020), (Gores 2022) auf Basis von EU (2020), EC (2021a) und EC (2021c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

„Die folgende [Tabelle 167] stellt detailliert die modellierten Emissionen der KSG-Sektoren aufgeteilt nach EU-ETS und ESR dar. Für die ESR-Emissionen sind zusätzlich die unter das BEHG sowie die sonstigen ESR-Emissionen aufgetragen“ (Öko-Institut et al. 2021).

**Tabelle 167: Emissionsentwicklung der KSG-Sektoren nach Regime im MMS, 2005-2040**

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq					
<b>Energiewirtschaft</b>	<b>396,9</b>	<b>305,1</b>	<b>242,8</b>	<b>193,2</b>	<b>135,4</b>	<b>74,9</b>
davon EU-ETS	361,1	268,8	212,1	164,5	108,2	51,0
davon ESR	35,9	36,3	30,7	28,7	27,1	24,0
<i>davon BEHG</i>			10,4	9,9	8,5	5,8
<i>davon sonstige ESR</i>			20,3	18,8	18,6	18,2
<b>Industrie</b>	<b>191,0</b>	<b>194,9</b>	<b>174,8</b>	<b>154,6</b>	<b>143,2</b>	<b>139,4</b>
davon EU-ETS	152,6	152,4	138,7	126,4	117,0	113,8
davon ESR	38,4	42,5	36,0	28,2	26,2	25,6
<i>davon BEHG</i>			18,6	16,8	15,6	15,5
<i>davon sonstige ESR</i>			17,4	11,5	10,6	10,1
<b>Gebäude</b>	<b>153,9</b>	<b>116,6</b>	<b>107,9</b>	<b>90,9</b>	<b>69,0</b>	<b>50,2</b>
davon EU-ETS	0,7	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2
davon ESR	153,3	116,0	107,4	90,5	68,7	50,0
<i>davon BEHG</i>			106,2	89,2	67,5	49,0
<i>davon sonstige ESR</i>			1,3	1,2	1,2	1,1
<b>Verkehr</b>	<b>160,0</b>	<b>162,3</b>	<b>151,4</b>	<b>126,4</b>	<b>100,1</b>	<b>78,7</b>
davon EU-ETS*	2,2	2,0	1,8	1,7	1,7	1,6
davon ESR	157,7	160,3	149,6	124,7	98,4	77,1
<i>davon BEHG</i>			145,9	121,2	95,3	74,3
<i>davon sonstige ESR</i>			3,7	3,5	3,2	2,9
<b>Landwirtschaft</b>	<b>70,1</b>	<b>69,8</b>	<b>67,3</b>	<b>62,8</b>	<b>62,4</b>	<b>62,0</b>
davon EU-ETS	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6
davon ESR	69,5	69,2	66,7	62,2	61,8	61,5
<i>davon BEHG</i>			5,4	5,2	4,9	4,5
<i>davon sonstige ESR</i>			61,2	57,0	56,9	56,9

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Abfallwirtschaft &amp; Sonstige</b>	<b>21,3</b>	<b>9,7</b>	<b>6,7</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,4</b>
davon EU-ETS	NA	NA	NA	NA	NA	NA
davon ESR	21,3	9,7	6,7	5,0	4,0	3,4
<i>davon BEHG</i>			NA	NA	NA	NA
<i>davon sonstige ESR</i>			6,7	5,0	4,0	3,4
<b>Summe</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>750,9</b>	<b>632,9</b>	<b>514,0</b>	<b>408,7</b>
davon stationärer EU-ETS	514,9	422,3	351,9	291,9	226,1	165,5
davon nationaler Flugverkehr im EU-ETS	2,2	2,0	1,8	1,7	1,7	1,6
davon ESR	476,1	434,1	397,2	339,3	286,2	241,6
<i>davon BEHG</i>			286,6	242,3	191,8	149,0
<i>davon sonstige ESR</i>			110,6	97,0	94,5	92,6

Anmerkung: \* Bezieht sich lediglich auf vom Inventar erfassten nationalen Flugverkehr. Der ebenfalls vom EU-ETS erfasste internationale Flugverkehr ist nicht dargestellt.

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021)

## 15.5 Vergleich der Szenarien

### 15.5.1 Emissionen aus Verbrennungsprozessen

In Tabelle 168 werden die verbrennungsbedingten Emissionen im MMS, KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) einander gegenübergestellt. Wie bereits in den Abschnitten 0 und 15.4 diskutiert wird, bestehen die größten Unterschiede zwischen den Szenarien bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen. Im Jahr 2030 sind diese im KIS-2030 aufgrund zusätzlicher Instrumente in den Sektoren Energiewirtschaft und Industrie mit 334,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq um rund 39 % geringer als im MMS. Im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) sind die Emissionen aufgrund niedrigerer BEHG-CO<sub>2</sub>-Preise etwas höher als im KIS-2030. Mit 341,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq sind sie aber noch um 37 % niedriger als im MMS.

Bei Methan ist die relative Einsparung im KIS-2030 im Vergleich zum MMS geringer (- 22 %) als bei CO<sub>2</sub>, da mit Braun- und Steinkohle vor allem jene Brennstoffe reduziert werden, die relativ geringe Methanemissionen bei der Verbrennung aufweisen. Bei Lachgas ist der Unterschied zwischen KIS-2030/KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) und MMS mit 38 % vergleichbar mit CO<sub>2</sub>, da N<sub>2</sub>O-Emissionen bei allen Brennstoffen auftreten und im KIS-2030 über alle Brennstoffe hinweg reduziert werden.

**Tabelle 168: Entwicklung der verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	1.004,1	839,0	736,4				
MMS				646,2	544,0	430,6	329,3
KIS-2030				518,1	334,2	217,0	137,5

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				521,1	341,4	223,9	142,6
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	6,7	2,2	4,2				
MMS				3,8	3,7	3,6	3,5
KIS-2030				4,1	2,9	2,2	1,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				4,1	2,9	2,3	1,8
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	7,3	5,3	5,8				
MMS				5,1	4,3	3,6	2,7
KIS-2030				4,0	2,7	1,9	1,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				4,0	2,7	2,0	1,4
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	1.018,0	846,5	746,4				
MMS				655,2	552,1	437,8	335,6
KIS-2030				526,2	339,8	221,1	140,6
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				529,3	347,0	228,2	145,9
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
<b>Veränderung ab 1990 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018		-16,9	-26,7				
MMS				-35,6	-45,8	-57,0	-67,0
KIS-2030				-48,3	-66,6	-78,3	-86,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-48,0	-65,9	-77,6	-85,7
<b>Summe CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O</b>							
<b>Veränderung ab 2005 in %</b>							
Entwicklung 1990 – 2018			-11,8				
MMS				-22,6	-34,8	-48,3	-60,4
KIS-2030				-37,8	-59,9	-73,9	-83,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-37,5	-59,0	-73,0	-82,8

Anmerkung: nur energiebedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR; mit CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Rauchgasentschwefelung sowie mit internationalem Flugverkehr und Hochseeschifffahrt

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut für KIS-2030

### 15.5.2 Emissionen nach Treibhausgasen

Tabelle 169 zeigt den Vergleich der Gesamtemissionen in den drei Szenarien nach Treibhausgasen. Die größten Emissionseinsparungen im KIS-2030 im Vergleich zum MMS ergeben sich bei CO<sub>2</sub> mit 39 % im Jahr 2030. Diese sind durch die Vielzahl von zusätzlichen Instrumenten im KIS-2030 begründet, insbesondere in der Energiewirtschaft, und in den Sektoren Industrie, Gebäude

und Verkehr. Im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) ist die Einsparung gegenüber dem MMS mit 38 % im Jahr 2030 aufgrund niedrigerer BEHG-CO<sub>2</sub>-Preise etwas geringer als im KIS-2030. Dies entspricht fast genau dem Szenarienvergleich verbrennungsbedingter Emissionen (siehe 13.5.1).

Bei Methan und Lachgas sind die Unterschiede zwischen den Szenarien weniger ausgeprägt. Die relative Einsparung im KIS-2030 im Vergleich zum MMS beträgt bei Methan 9 % und bei Lachgas 18 %, jeweils im Jahr 2030. Diese Einsparungen ergeben sich hauptsächlich durch zusätzliche Instrumente im Landwirtschafts-, Abfall- und Industriesektor. Bei den fluorierten Gasen bestehen nur geringe Unterschiede (0,2 %) zwischen den Szenarien, da im KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) keine bedeutenden Instrumente mit Zeithorizont 2030 hinzukommen.

**Tabelle 169: Entwicklung der gesamte Treibhausgasemissionen nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq							
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	1.052,3	866,4	755,3				
MMS				660,3	554,7	438,2	334,7
KIS-2030				529,4	336,4	216,1	136,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				532,4	343,6	223,0	141,8
<b>CH<sub>4</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	121,2	69,4	52,6				
MMS				46,3	42,4	41,2	40,5
KIS-2030				44,4	38,4	33,5	29,8
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				44,5	38,5	33,5	29,8
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	62,5	43,3	35,5				
MMS				34,2	31,1	30,2	29,3
KIS-2030				30,1	25,4	22,8	20,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				30,1	25,5	22,9	20,8
<b>HFKW-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,1	9,0	10,5				
MMS				7,4	3,5	3,4	3,2
KIS-2030				7,4	3,5	3,3	3,1
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				7,4	3,5	3,3	3,1
<b>FKW-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	3,1	0,9	0,3				

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
MMS				0,3	0,3	0,3	0,3
KIS-2030				0,3	0,3	0,3	0,3
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,3	0,3	0,3	0,3
<b>SF<sub>6</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	4,4	3,3	3,9				
MMS				2,3	0,7	0,5	0,5
KIS-2030				2,3	0,7	0,4	0,4
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				2,3	0,7	0,4	0,4
<b>NF<sub>3</sub>-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	0,0	0,0	0,0				
MMS				0,0	0,0	0,0	0,0
KIS-2030				0,0	0,0	0,0	0,0
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Nicht spezifizierter Mix</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	5,8	1,0	0,2				
MMS				0,2	0,2	0,2	0,2
KIS-2030				0,2	0,2	0,2	0,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Summe Treibhausgas-Emissionen</b>							
Entwicklung 1990 – 2018	1.249,5	993,2	858,3				
MMS				750,9	632,9	514,0	408,7
KIS-2030				614,0	405,0	276,6	191,2
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				617,1	412,2	283,6	196,4
<b>Summe Treibhausgas-Emissionen</b>				<b>Veränderung ab 1990 in %</b>			
Entwicklung 1990 – 2018		-20,5	-31,3				
MMS				-39,9	-49,3	-58,9	-67,3
KIS-2030				-50,9	-67,6	-77,9	-84,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-50,6	-67,0	-77,3	-84,3
<b>Summe Treibhausgas-Emissionen</b>				<b>Veränderung ab 2005 in %</b>			
Entwicklung 1990 – 2018			-13,6				

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
MMS				-24,4	-36,3	-48,2	-58,8
KIS-2030				-38,2	-59,2	-72,2	-80,7
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)				-37,9	-58,5	-71,4	-80,2

Quelle: (UBA 2020c), (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut für KIS-2030

### 15.5.3 Emissionen nach KSG-Sektoren

Die Emissionen der einzelnen KSG-Sektoren sind in Tabelle 170 für die Jahre 2025 und 2030 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass im KIS-2030 alle Sektorziele im Jahr 2030 erreicht werden. Im Jahr 2025 werden die Ziele in den Sektoren Gebäude und Verkehr nicht eingehalten; die restlichen Ziele werden erreicht. Im MMS werden hingegen alle Ziele überschritten, mit Ausnahme des Ziels für den Sektor Abfallwirtschaft und Sonstige im Jahr 2025.

Für Energie und LULUCF bestehen keine Sektorziele für 2025, jedoch für 2030. Diese Ziele werden für die beiden Sektoren im KIS-2030 und im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) eingehalten.

**Tabelle 170: Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren in den Jahren 2025 und 2030 im Vergleich der Szenarien**

Sektor	KIS-2030		KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)		MMS	
	2025	2030	2025	2030	2025	2030
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Energiewirtschaft	155,5	76,3	155,3	75,3	242,8	193,2
Industrie	155,7	117,7	155,7	118,4	174,8	154,6
Gebäude	99,6	67,0	100,2	68,3	107,9	90,9
Verkehr	134,9	84,1	137,6	90,4	151,4	126,4
Landwirtschaft	62,0	55,8	62,0	55,8	67,3	62,8
Abfallwirtschaft & Sonstige	6,3	4,0	6,3	4,0	6,7	5,0
<b>Gesamt</b>	<b>614,0</b>	<b>405,0</b>	<b>617,1</b>	<b>412,2</b>	<b>750,9</b>	<b>632,9</b>
Nachrichtlich:						
LULUCF	-16,4	-25,1	-16,4	-25,1	16,9	22,3
Internationaler Luft- und Seeverkehr	34,4	35,2	34,4	35,2	35,1	36,0

Anmerkung: Emissionen, die das entsprechende Sektorziel überschreiten, sind fett dargestellt. Emissionen ohne Sektorziel sind kursiv dargestellt.

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut für KIS-2030.

Der geringe Unterschied zwischen dem KIS-2030 und der BEHG-Sensitivität liegt darin begründet, dass in der Sensitivitätsrechnung der gleiche Instrumentenmix zur Geltung kommt wie im KIS-2030 und dass dieser bereits sehr ambitioniert ausgestaltet ist. Darüber hinaus wirkt die

CO<sub>2</sub>-Bepreisung komplementär und unterstützt durch das Preissignal die Umsetzung der Instrumente. Dies entspricht den Ergebnissen einer weiteren Studie (Öko-Institut et al. 2022), in der gezeigt wurde, dass der Effekt einer ausschließlichen Erhöhung des BEHG-Preises gering im Vergleich zu einer Kombination der Bepreisung mit weiteren Maßnahmen ist.

Zusätzlich zur Zieleinhaltung bzw. -verfehlung in einzelnen Jahren (Tabelle 170) wird auch die kumulierte Zielabweichung betrachtet. Tabelle 171 zeigt die kumulierte Zielabweichung in den einzelnen Sektoren über den Zeitraum 2020 bis 2030.

**Tabelle 171: Kumulierte Zielabweichung (2020-2030) in den einzelnen KSG-Sektoren im Vergleich der Szenarien**

Sektor	KIS-2030	KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)	MMS
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq		
Energiewirtschaft	Jahresemissionsmengen sind nur für drei Jahre im Zeitraum 2020-2030 festgelegt, deshalb kann keine kumulierte Zielabweichung bestimmt werden.		
Industrie	-50,5	-48,9	154,0
Gebäude	47,3	54,0	156,5
Verkehr	87,2	120,1	274,8
Landwirtschaft	-24,7	-24,7	27,6
Abfallwirtschaft & Sonstige	-4,5	-4,5	0,7

Anmerkung: Negativer Wert: Die kumulierten Emissionen 2020-2030 sind geringer als die Summe der Jahresemissionsmengen 2020-2030. Positiver Wert: Die kumulierten Emissionen in diesem Zeitraum sind höher als die Summe der Jahresemissionsmengen.

Anmerkung: Die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 wurden nicht modelliert, sondern dem deutschen Treibhausgasinventar, Stand 14.1.2022, entnommen.

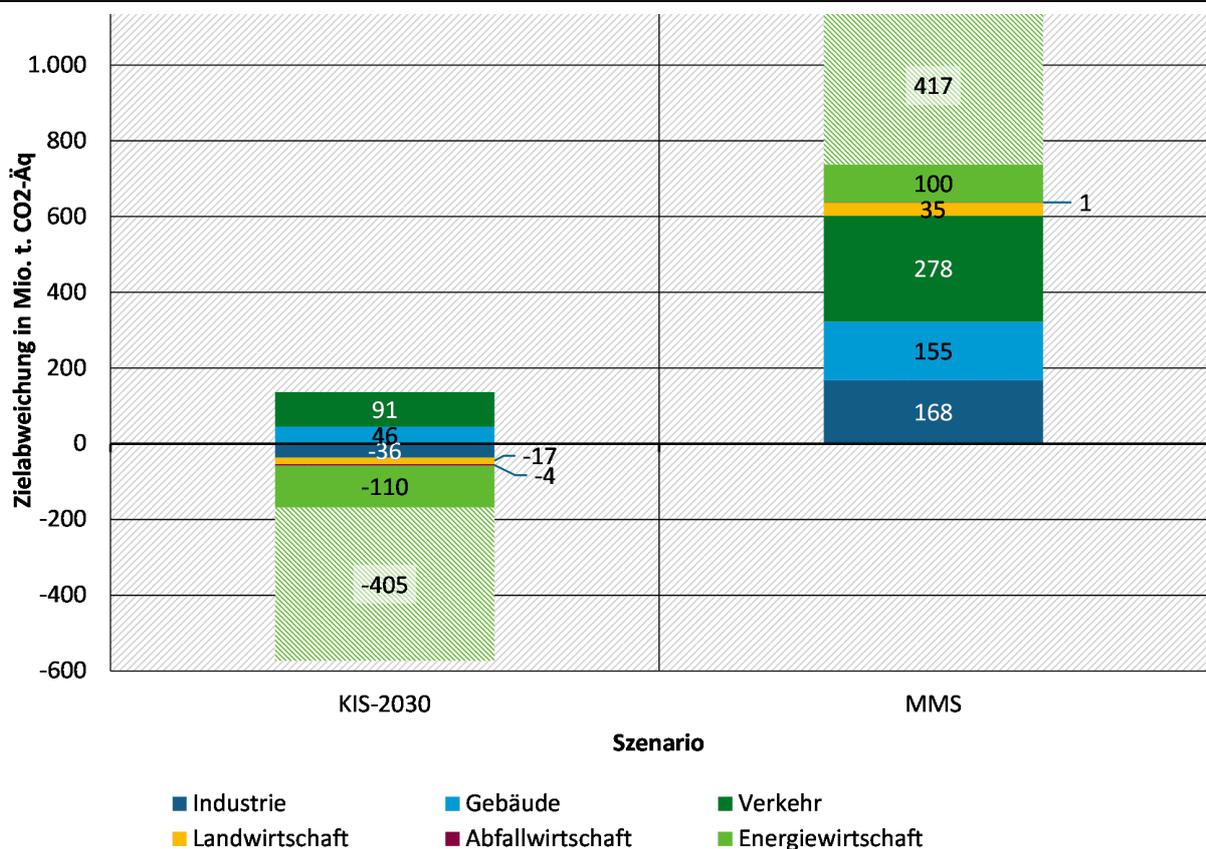
Quelle: (UBA 2022) für Treibhausgasemissionen im Jahr 2020, (Öko-Institut et al. 2021) für MMS, Modellrechnungen Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut für KIS-2030.

Aus Tabelle 171 ist ersichtlich, dass im KIS-2030 sowie im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) in den Sektoren Industrie, Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft und Sonstige die Gesamtemissionen im Zeitraum 2020-2030 geringer als die Summe der Jahresemissionsmengen sind. In den Sektoren Gebäude und Verkehr wird hingegen die Summe der Jahresemissionsmengen überschritten. Die Überschreitung in den Sektoren Gebäude und Verkehr erklärt sich daraus, dass in diesen beiden Sektoren in den meisten Jahren die Zieltrajektorie überschritten wird. Nur in den Jahren 2020 (Sektor Verkehr) und 2030 (Verkehr und Gebäude) wird das Ziel knapp eingehalten. In den anderen drei Sektoren wird das Ziel hingegen in allen Jahren von 2020 bis 2030 eingehalten. Im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), für welches niedrigere CO<sub>2</sub>-Preise angenommen wurden, ist die Überschreitung höher. Im MMS wird die Summe der Jahresemissionsmengen in allen Sektoren überschritten. Für den Sektor Energiewirtschaft kann keine Summe der Jahresemissionsmengen 2020-2030 angegeben werden, da diese nur für die Jahre 2020, 2022 und 2030 festgelegt wurden.

Für modellierten Emissionen des Zeitraums von 2021 bis 2030 stellt Abbildung 129 die kumulierten sektoralen Zielabweichungen im KIS-2030 denen des MMS gegenüber. Die Abweichung der Energiewirtschaft ist dabei in zwei Teile unterteilt, um abzubilden, dass im KSG für die Energiewirtschaft nur für die Jahre 2022 und 2030 Jahreshöchstmengen festgelegt wurden. Während

im MMS alle Sektoren kumuliert über die Jahre 2021 bis 2030 ihre Ziele verfehlen, so sind dies im KIS-2030 nur noch der Verkehr und der Gebäudesektor, während die übrigen Sektoren kumulierte Zielüberfüllungen haben.

**Abbildung 129: Vergleich der kumulierten Abweichung der Treibhausgasmissionen von den KSG-Sektorzielen im Zeitraum 2021-2030**



Anmerkung: Die Energiewirtschaft ist in zwei Teilen dargestellt. Durchgehend hellgrün stellt die Zielabweichung der Jahre 2022 und 2030 dar, schraffiert hellgrün die Zielabweichung der übrigen Szenarienjahren.

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

### 15.5.4 Emissionen in EU-ETS, ESR und BEHG

Tabelle 172 zeigt den Vergleich der Emissionen im EU-ETS, im ESR und unter dem BEHG in den drei Szenarien.

**Tabelle 172: Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor zwischen 1990 und 2040 im Vergleich der Szenarien**

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
<b>Emissionen stationärer EU-ETS*</b>						
Entwicklung 2005 – 2018	514,9	422,3				
MMS			351,9	291,9	226,1	165,5
KIS-2030			246,8	144,4	101,5	69,1

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)			246,6	144,1	101,8	69,5
<b>Emissionen ESR**</b>						
Entwicklung 2005 – 2018	476,0	434,1				
MMS			397,2	339,3	286,2	241,6
KIS-2030			365,5	258,8	174,2	121,8
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)			368,8	266,3	181,0	126,6
<b>Emissionen BEHG</b>						
MMS			286,6	242,3		
KIS-2030			260,5	171,4		
KIS-2030 (BEHG-Sensitivität)			263,7	178,9		

Anmerkung: \* Vom EU-ETS erfasste Emissionen in der seit 2013 gültigen Abgrenzung. \*\* Jahre 2005-2018 aus Konsistenzgründen (Vergleich mit Daten für 2020-2040) mit CRF-Kategorien berechnet; in der ab 2013 gültigen EU-ETS-Abgrenzung. Entspricht nicht dem Basiswert für das Minderungsziel unter der Effort-Sharing-Entscheidung.

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021) für MMS; (UBA 2020c; 2020e), (EU-Kommission 2020), (EEA 2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut für KIS-2030 und KIS-2030 (BEHG).

Es ist zu sehen, dass insbesondere die Emissionen unter dem ETS in den neuen Szenarien deutlich reduziert werden. Sowohl im KIS-2030 als auch im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) sind die Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 um 51 % geringer als im MMS. Jene Emissionen, die dem ESR unterliegen, reduzieren sich im Jahr 2030 im KIS-2030 um 24 % gegenüber dem MMS. Im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) ist die Reduktion mit 22 % etwas geringer – dies ist auf die niedrigeren BEHG-CO<sub>2</sub>-Preise in diesem Szenario zurückzuführen. Schließlich sind jene Emissionen, die dem BEHG unterliegen, im KIS-2030 um 29 % geringer als im MMS; im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität) beträgt die Reduktion im Vergleich zum MMS noch 26 %.

## Quellenverzeichnis

- AGEB - AG Energiebilanzen (2008-2020a): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Jahre 2008-2018. Stand 2008 für die Jahre 1990-2002, Stand 2012 für die Jahre 2003-2010, Stand 2013 für das Jahr 2011, Stand 2014 für das Jahr 2012, Stand 2015 für das Jahr 2013, Stand 2016 für das Jahr 2014, Stand 2017 für das Jahr 2015, Stand 2018 für das Jahr 2016, Stand 2019 für das Jahr 2017, Stand 2020 für das Jahr 2018, 2008-2020. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2018.html>.
- AGEB - AG Energiebilanzen (2008-2020b): Satellitenbilanz Erneuerbare Energien, Jahre 2000-2018. Stand 2008 für die Jahre 2000-2002, Stand 2010 für die Jahre 2003-2008, Stand 2012 für die Jahre 2009-2010, Stand 2013 für das Jahr 2011, Stand 2014 für das Jahr 2012, Stand 2015 für das Jahr 2013, Stand 2016 für das Jahr 2014, Stand 2017 für das Jahr 2015, Stand 2018 für das Jahr 2016, Stand 2019 für das Jahre 2017, Stand 2020 für das Jahr 2018, 2008-2020. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2018.html>.
- AGEB - Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (Hg.) (2019): Energie in Zahlen, Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen, 2019. Online verfügbar unter [https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2019/01/ageb-energie\\_in\\_zahlen\\_2019.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2019/01/ageb-energie_in_zahlen_2019.pdf), zuletzt geprüft am 04.05.2022.
- AGEB (2020): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2019, Stand September 2020. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (Hg.), 2020. Online verfügbar unter <https://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>.
- AGEB (2022): Bilanzen 1990 bis 2020, 2022. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2020/>.
- Agora Energiewende (2021): Transformationskostenrechner Klimaschutzverträge (KSV) - Stahlbranche, Software & Daten. Version: 1.1, 2021. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaschutzvertraege-fuer-die-industrietransformation-stahl-datenanhang>.
- Ariadne-Projekt (2021): Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich, 2021. Online verfügbar unter <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitat-2045-szenarienreport/>, zuletzt geprüft am 09.05.2022.
- Barthel, C.; Franke, M.; Müller, P.; Dittmar, C. (2010): Analyse der Vorstudien für Wohnungslüftung und Klimageräte, Veröffentlichung im Rahmen des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes) Arbeitspaket 14. Umweltbundesamt (Hg.), 2010.
- Bauer, U.; Hertel, M.; Buchmann, L. (2018): Geht doch!, Grundzüge einer bundesweiten Fußverkehrsstrategie (UBA Texte, 75/2018). Umweltbundesamt (Hg.), Oktober 2018. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/geht-doch>, zuletzt geprüft am 24.06.2021.
- BBSR (2015): Wohnungsmarktprognose 2030. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hg.). Bonn, 2015.
- BCG (2021): Klimapfade 2.0, Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Gutachten für den BDI, 2021. Online verfügbar unter <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/>, zuletzt geprüft am 09.05.2022.
- BITKOM - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (2008): Die Zukunft der digitalen Consumer Electronics. Berlin, 2008.
- Blanck, R.; Zimmer, W.; Runkel, M.; Klinski, Stefan; Kresin, J. (2020): Klimaschutz im Verkehr: Reformbedarf der fiskalpolitischen Rahmenbedingungen und internationale Beispiele (UBA Texte, 165/2020). Umweltbundesamt (Hg.), September 2020, zuletzt geprüft am 28.10.2020.

BLE (2021): Bericht zur Markt- und Versorgungslage mit Fleisch 2021. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2021. Online verfügbar unter [https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Fleisch/2021BerichtFleisch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Fleisch/2021BerichtFleisch.pdf?__blob=publicationFile&v=2).

BMI (2021): Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) - Informationsportal Nachhaltiges Bauen, 2021. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/beg/>.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Berlin, 2019. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 10.05.2021.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): Moorschutzstrategie der Bundesregierung, Diskussionspapier, 2020. Online verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Naturschutz/diskussionspapier\\_moorschutzstrategie\\_bundesregierung\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/diskussionspapier_moorschutzstrategie_bundesregierung_bf.pdf).

BMVI (2018): Verkehr in Zahlen 2018/2019. Online verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen\\_2018-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2018-pdf.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 05.08.2020.

BMVI (2020): Verkehr in Zahlen 2020/2021, 49. Jahrgang, 2020. Online verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-pdf.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 16.05.2022.

BMW i (2019): Energieeffizienzstrategie 2050. Online verfügbar unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=12), zuletzt geprüft am 21.05.2022.

BMW i (2021): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 1990-2020, Februar 2021. Online verfügbar unter [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html), zuletzt aktualisiert am 16.03.2021.

Brandt, E.; Sanden, J.; Lübbert, M. (2003): Verfassungsrechtliche Zulässigkeit neuer übergreifender Rechtsinstrumente zur Begrenzung des Flächenverbrauchs (Berichte des Umweltbundesamtes, 04/03). Erich Schmidt Verlag (Hg.). Berlin, 2003.

Bundesministerium der Justiz (2021): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, 2021. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/>, zuletzt geprüft am 20.02.2022.

Bundesnetzagentur (2020a): Genehmigung des Szenariorahmens 2021-2035, 2020. Online verfügbar unter [https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmen\\_2035\\_Genehmigung\\_0.pdf](https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmen_2035_Genehmigung_0.pdf).

Bundesnetzagentur (2020b): Kraftwerksstilllegungsanzeigenliste der Bundesnetzagentur, Stand: 15.04.2020, 2020. Online verfügbar unter [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/KWSAL/KWSAL\\_2020\\_02.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/KWSAL/KWSAL_2020_02.pdf?__blob=publicationFile&v=3).

Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2010. Online verfügbar unter [http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/\\_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5), zuletzt geprüft am 07.07.2014.

Bundesregierung (2017): Projektionsbericht 2017 für Deutschland, gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013, 2017. Online verfügbar unter [http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/klima-klimaschutz-download/artikel/projektionsbericht-der-bundesregierung-2017/?tx\\_ttnews%5BbackPid%5D=217](http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/klima-klimaschutz-download/artikel/projektionsbericht-der-bundesregierung-2017/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=217), zuletzt geprüft am 08.09.2017.

BVerfG - Bundesverfassungsgericht (2021): Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021. 1 BvR 2656/18, 1 BvR 288/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20, 24.03.2021. Online verfügbar unter [https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Downloads/DE/2021/03/rs20210324\\_1bvr265618.pdf;jsessionid=ED9E8B38059290397370411244DF2BEB.1\\_cid319?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Downloads/DE/2021/03/rs20210324_1bvr265618.pdf;jsessionid=ED9E8B38059290397370411244DF2BEB.1_cid319?__blob=publicationFile&v=6), zuletzt geprüft am 30.03.2022.

Cischinsky, H.; Diefenbach, N. (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 - Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand, Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der Auswertungsdatenbank (1. Aufl.). Institut Wohnen und Umwelt, 17.04.2018. Online verfügbar unter [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018\\_IWU\\_CischinskyEtDiefenbach\\_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf), zuletzt geprüft am 30.03.2022.

Clausnitzer, K.-D.; Jahnke, M.; Rohde, C.; Steinbach, J. (2015): Datenerhebung Gebäudebestand – Erfassung von statistischen Basisdaten zum Nichtwohngebäudebestand und empirische Analyse der energetischen Qualität ausgewählter Gebäudetypen., Band II : Mengengerüst Nichtwohngebäude u. energetische Eigenschaften., 2015.

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. significance; CE Delft, 2010, zuletzt geprüft am 04.10.2016.

dena (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Abschlussbericht, 2021. Online verfügbar unter <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/abschlussbericht-dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>, zuletzt geprüft am 09.05.2022.

DENEFF, Fraunhofer ISI, Öko-Institut (2021): Kurzstudie: Weißbuch Green Recovery - Wirtschaft hoch, CO2 runter. Deneff (Hg.). Berlin, Freiburg, Karlsruhe, 01.04.2021. Online verfügbar unter [https://www.effizienzrepublik.de/wp-content/uploads/2021/04/202104041\\_Weissbuch\\_Green\\_Recovery.pdf](https://www.effizienzrepublik.de/wp-content/uploads/2021/04/202104041_Weissbuch_Green_Recovery.pdf).

Department of Finance Ireland (2017): A REVIEW OF THE ACCELERATED CAPITAL ALLOWANCES SCHEME FOR ENERGY EFFICIENT EQUIPMENT, Oktober 2017.

Destatis (2019): Wohnen in Deutschland, Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018. Destatis (Hg.), 2019. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html>.

Destatis (2020): Fachserie 8 Reihe 1.2 Verkehr, Verkehr im Überblick, 2020. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publikationen/Downloads-Querschnitt/verkehr-ueberblick-2080120187004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publikationen/Downloads-Querschnitt/verkehr-ueberblick-2080120187004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 20.05.2022.

Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.-D. (2010): Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt; Bremer Energie Institut (BEI). Darmstadt, 09.10.2010. Online verfügbar unter [https://datenbasis.iwu.de/dl/Endbericht\\_Datenbasis.pdf](https://datenbasis.iwu.de/dl/Endbericht_Datenbasis.pdf), zuletzt geprüft am 30.03.2022.

DON, A.; Flessa, H.; Marx, K.; Poeplau, C.; Tiemeyer, B.; Osterburg, B. (2018): Die 4-Promille-Initiative „Böden für Ernährungssicherung und Klima“ –Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland (Thünen Working Paper, 112). Braunschweig, 2018. Online verfügbar unter [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn060523.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060523.pdf), zuletzt geprüft am 05.05.2021.

EC - European Commission (2020): Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2021, Version after consultation of WG2 under the Climate Change Committee., Brussels, 30.06.2020.

EC - European Commission (2021a): Energy Modelling, EU Reference Scenario 2020. European Commission (Hg.). Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020\\_en](https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en), zuletzt geprüft am 13.09.2021.

EC - European Commission (2021b): Proposal for a Council Directive restructuring the Union framework for the taxation of energy products and electricity (recast), COM(2021) 563 final, 2021. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision\\_of\\_the\\_energy\\_tax\\_directive\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision_of_the_energy_tax_directive_0.pdf), zuletzt geprüft am 29.07.2021.

EC - European Commission (2021c): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EU) 2018/842 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement. COM(2021) 555 final. Brussels, 14.07.2021. Online verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/requirement.html?uri=cellar:bb3257a0-e4ee-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_3&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/requirement.html?uri=cellar:bb3257a0-e4ee-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_3&format=PDF), zuletzt geprüft am 30.04.2022.

EEA (2020): EU Emissions Trading System (ETS) data viewer. Activity code 29 Production of cement clinker, 2020. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1>, zuletzt geprüft am 21.09.2020.

ENCON.Europe GmbH (2018): Potentialatlas für Wasserstoff, Analyse des Marktpotentials für Wasserstoff, der mit erneuerbarem Strom hergestellt wird, im Raffineriesektor und im zukünftigen Mobilitätssektor. Im Auftrag der IG BCE Innovationsforum Energiewende e.V., Mineralölwirtschaftsverband e.V. Online verfügbar unter <https://www.dvw-info.de/wp-content/uploads/2018/04/Potentialstudie-f%C3%BCr-gr%C3%BCnen-Wasserstoff-in-Raffinerien.pdf>, zuletzt geprüft am 07.05.2022.

ENTSO-E; ENTSO-G (2020): TYNDP 2020, Scenario Report, 2020. Online verfügbar unter [https://2020.entsoe-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2020/06/TYNDP\\_2020\\_Joint\\_ScenarioReport\\_final.pdf](https://2020.entsoe-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2020/06/TYNDP_2020_Joint_ScenarioReport_final.pdf).

EU: COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2020/2126 of 16 December 2020 on setting out the annual emission allocations of the Member States for the period from 2021 to 2030 pursuant to Regulation (EU) 2018/842 of the European Parliament and of the Council. In: OJ. Online verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2020.426.01.0058.01.ENG](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2020.426.01.0058.01.ENG), zuletzt geprüft am 01.03.2020.

EU-Kommission (2020): Durchführungsbeschluss (EU) 2020/2126 der Kommission vom 16. Dezember 2020 zur Festlegung der jährlichen Emissionszuweisungen an die Mitgliedstaaten für den Zeitraum 2021 bis 2030 gemäß der Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32020D2126>, zuletzt geprüft am 15.03.2021.

EuP Preparatory Studies Lot 10 (2008): Residential room conditioning appliances (airco and ventilation). Final Report., 2008. Online verfügbar unter <http://www.ecoaircon.eu/>.

Fehrenbach, H.; Bischoff, M.; Böttcher, H.; Reise, J.; Hennenberg, K. J. (2022): The missing limb: Including impacts of biomass extraction on forest carbon stocks in greenhouse gas balances of wood use. In: *Forests* (13), S. 1–14. DOI: 10.3390/f13030365.

Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Herbst, A.; Elstrand, 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.

FNR (2020): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2020, Broschüre. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2020. Online verfügbar unter [https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2020/Mediathek/broschuere\\_basisdaten\\_bioenergie\\_2020\\_web.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2020/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2020_web.pdf).

Fraunhofer ISI; Consentec; IFEU; TU Energy and Resources (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3, Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Karlsruhe, 2021. Online verfügbar unter [https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS\\_Kurzbericht\\_final\\_v5.pdf](https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS_Kurzbericht_final_v5.pdf).

Fraunhofer ISI; DVGW-Forschungsstelle (2019): Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors. In: *Climate change* (12/2019). Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15\\_cc\\_12-2019\\_roadmap-gas\\_2.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_cc_12-2019_roadmap-gas_2.pdf), zuletzt geprüft am 07.05.2022.

Fraunhofer ISI; PTV Group; M-Five (2017): Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, Schlussbericht „Entwicklung eines attraktiven europäischen Nachtzugsystems und Potenziale für den Nachtzugverkehr von, nach und innerhalb Deutschlands“, 2017. Online verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/schlussbericht-entwicklung-nachtzugsysteme.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/schlussbericht-entwicklung-nachtzugsysteme.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 29.09.2020.

Fraunhofer IZM (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland: Abschlussbericht., 2015.

GfK - Gesellschaft für Konsumforschung (2002-2010): GfK Retail Panel Haushaltsgeräte Deutschland 1998-2008 – Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschine, Kühlschrank, Gefrierschrank, Kochen und Klimaanlagen. Nürnberg, 2002-2010.

Gores, S. (2022): ESR-Zielpfad Deutschland Fit-for-55-Paket, Abschätzung. Unter Mitarbeit von Emele, L., 2022.

Gutser, R.; Ebertseder, T.; Schraml, M.; Tucher, S. von; Schmidhalter, U. (2014): Stickstoffeffiziente und umweltschonende organische Düngung (KTBL Schrift, 483). KTBL (Hg.), 2014.

Haas, M. de; Hamersma, M. (2020): Cycling facts: new insights. KiM Netherlands Institute for Transport Policy Analysis (Hg.), 2020. Online verfügbar unter <https://english.kimnet.nl/publications/publications/2020/11/03/cycling-facts-new-insights>, zuletzt geprüft am 15.06.2021.

Haß, M.; Banse, M.; Deblitz, C.; Freund, F.; Geibel, I.; Gocht, A.; Kreins, P.; Laquai, V.; Offermann, F.; Osterburg, B.; Pelikan, J.; Rieger, J.; Rösemann, C. et al. (2020): Agrarökonomische Projektionen für Deutschland, Thünen Rep. 82. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig, 2020. Online verfügbar unter [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn062723.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn062723.pdf).

Hautzinger, H.; Mayer, K.; Helms, M.; Kern, C.; Wiesenhütter, M.; Haag, G.; Binder, J. (2004): Analyse von Änderungen des Mobilitätsverhaltens - insbesondere der Pkw-Fahrleistung - als Reaktion auf geänderte Kraftstoffpreise, des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2004.

Hendriks, R.; Louwerse, K.; Tetteroo, E. (2017): Bicycle Agenda 2017-2020, Tour de Force 2020, 2017, zuletzt geprüft am 15.06.2021.

Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Herold, A.; Bohn, F.; Gutsch, M.; Reyer, C. (2021): Interpretation des Klimaschutzgesetzes für die Waldbewirtschaftung verlangt adäquate Datenbasis, Reaktion auf die Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Waldpolitik beim BMEL (vom 22.06.2021) (Working Paper, 03/21). Öko-Institut; Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ; Potsdam Institute for Climate Impact Research. Öko-Institut (Hg.). Berlin, 2021. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/interpretation-des-klimaschutzgesetzes-fuer-die-waldbewirtschaftung-verlangt-adaequate-datenbasis-reaktion-auf-die-stellungnahme-des-wissenschaftlichen-beirats-fuer-waldpolitik-beim-bmel-vom-22062021>, zuletzt geprüft am 06.09.2021.

Hermann, A.; Klinski, Stefan; Heyen, D. A.; Kasten, P. (2019): Rechtliche Hemmnisse und Innovationen für eine nachhaltige Mobilität, untersucht an Beispielen des Straßenverkehrs und des öffentlichen Personennahverkehrs.

kehrts in Räumen schwacher Nachfrage (UBA Texte, 94/20109). Umweltbundesamt (Hg.), Juli 2019. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-08-20\\_texte\\_94-2019\\_rechtsinmobil\\_1-teilbericht-recht-innovation\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-08-20_texte_94-2019_rechtsinmobil_1-teilbericht-recht-innovation_0.pdf), zuletzt geprüft am 10.11.2020.

Icha, P.; Lauf, T.; Kuhs, G. (2021): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid - Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020 (Climate Change, 45/2021). Umweltbundesamt, 2021. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26\\_cc-45-2021\\_strommix\\_2021\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021_0.pdf).

Institut für System- und Innovationsforschung - Fraunhofer IZM (Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration), Fraunhofer ISI (2009): Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Studie im Auftrag des BMWi. Berlin, Karlsruhe, 2009.

IPCC (2006a): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan., 2006. Online verfügbar unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, zuletzt geprüft am 09.06.2021.

IPCC (2006b): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hg. v. Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara und Kiyoto Tanabe. Japan: IGES. Online verfügbar unter <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.

IPCC (2007): Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC (Hg.), 2007. Online verfügbar unter [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4\\_wg1\\_full\\_report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf), zuletzt geprüft am 26.11.2020.

IREES (2021): Bewertung des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials ausgewählter Maßnahmen im Bereich Gebäude & Wohnen für das Land Bremen, Endbericht. Online verfügbar unter [http://www.bremische-buerger-schaft.de/presse/EK/IREES\\_Endbericht\\_Gutachten\\_CO2-Reduktionspotenziale\\_Gebaeudemassnahmen.pdf](http://www.bremische-buerger-schaft.de/presse/EK/IREES_Endbericht_Gutachten_CO2-Reduktionspotenziale_Gebaeudemassnahmen.pdf), zuletzt geprüft am 11.05.2022.

IWU et al. (2020): Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (dataNWG). Online verfügbar unter [www.dataNWG.de](http://www.dataNWG.de).

Jochem, D.; Weimar, H.; Dieter, M. (2020): Holzeinschlag 2019 steigt – Nutzung konstant. In: *Holz-Zentralblatt* (33), S. 593–594. Online verfügbar unter [https://www.thuenen.de/media/institute/wf/HM\\_div.\\_Statistik\\_Dateien/Dateien\\_-\\_Bilanzen\\_-\\_Tabellen/Wald/Einschlagrueckrechnung/dn062585.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/wf/HM_div._Statistik_Dateien/Dateien_-_Bilanzen_-_Tabellen/Wald/Einschlagrueckrechnung/dn062585.pdf).

Köck, W.; Bovet, J.; Gawron, T.; Hofmann, E.; Möckel, S. (2007): Effektivierung des raumbezogenen Planungsrechts zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme. Unter Mitarbeit von Rath, K. (Berichte des Umweltbundesamtes, 01/07). Umweltbundesamt. Erich Schmidt Verlag (Hg.). Berlin, 2007.

Kranzl, L.; Anagnostopoulos, F.; Aichinger, E.; Müller, A.; Staniaszek, D.; Steinbach, J.; Toleikyte, A. (2016): Energy Saving Cost Curves for the Case of the German Building Stock (14. Symposium Energieinnovation an der Technische Universität Graz). Graz, 2016. Online verfügbar unter [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Events/Eninnov2016/files/kf/Session\\_F4/KF\\_Kranzl.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/kf/Session_F4/KF_Kranzl.pdf), zuletzt geprüft am 17.06.2021.

Kranzl, L.; Hummel, M.; Müller, A.; Steinbach, J. (2013): Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments. In: *Energy Policy* 59, S. 44–58.

Matthes, F. C.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Göckeler, K.; Heinemann, C.; Hermann, H.; Mendelevitch, R.; Mottschall, M.; Seebach, D.; Cook, V. (2021): Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland. Untersuchung im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität (SKN). Öko-Institut. Berlin, 13.05.2021. Online verfügbar unter <https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/Öko-Institut-2021-Die-Wasserstoffstrategie-2.0-fuer-Deutschland-1.1.pdf>, zuletzt geprüft am 30.03.2022.

Müller, A. (2015): Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften bei der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Wien, 2015. Online verfügbar unter [http://www.invert.at/Dateien/Dissertation\\_AndreasM.pdf](http://www.invert.at/Dateien/Dissertation_AndreasM.pdf).

Naumann, R.; Pasold, S.; Frölicher, J. (2019): Finanzierung der ÖPNV, Status quo und Finanzierungsoptionen für die Mehrbedarfe durch Angebotsausweitungen (Gutachten). KCW GmbH (Hg.), 2019. Online verfügbar unter [https://www.kcw-online.de/content/6-veroeffentlichungen/165-finanzierung-des-oepnv/2019\\_finanzierung\\_des\\_oepnv\\_fin.pdf](https://www.kcw-online.de/content/6-veroeffentlichungen/165-finanzierung-des-oepnv/2019_finanzierung_des_oepnv_fin.pdf), zuletzt geprüft am 25.03.2021.

NPM (2021): Wege für mehr Klimaschutz im Verkehr, Arbeitsgruppe 1 Klimaschutz im Verkehr, 2021. Online verfügbar unter [https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/07/NPM\\_AG1\\_Wege-fuer-mehr-Klimaschutz.pdf](https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/07/NPM_AG1_Wege-fuer-mehr-Klimaschutz.pdf), zuletzt geprüft am 20.05.2022.

Öko-Institut (2020): Stickstoff- und Tierwohlpolitiken in ausgewählten EU-Ländern und ihre Umsetzung in der GAP, Kurzpapier. Gefördert von der Stiftung Zukunftserbe. Unter Mitarbeit von Wiegmann, K.; Scheffler, M.; Schmeink, H.; Urrutia, C. und Wolff, F., 2020. Online verfügbar unter [https://www.zukunftserbe.de/fileadmin/user\\_upload/PDF/Paper\\_2\\_Stickstoff\\_Tierwohlpolitik.pdf](https://www.zukunftserbe.de/fileadmin/user_upload/PDF/Paper_2_Stickstoff_Tierwohlpolitik.pdf), zuletzt geprüft am 26.04.2022.

Öko-Institut (2021a): Datenkonzepte im EU-Emissionshandel, Handbuch. Unter Mitarbeit von Graichen, V.; Jörß, W.; Emele, L. und Nissen, C. (Climate Change, 75/2021). Umweltbundesamt (Hg.), 2021. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-06-03\\_cc\\_75-2021\\_ets-handbuch\\_datenkonzepte.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-06-03_cc_75-2021_ets-handbuch_datenkonzepte.pdf), zuletzt geprüft am 20.07.2022.

Öko-Institut (2021b): Konzept für die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Mindestpreises im Stromsektor in Deutschland, Studie für die Stiftung Klimaneutralität. Unter Mitarbeit von Hermann, H.; Matthes, F. C. und Keimeyer, F., 2021. Online verfügbar unter [https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/05/2021\\_05-11\\_Öko-Institut2021-SKN-Konzept-CO2-Mindestpreis-final.pdf](https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/05/2021_05-11_Öko-Institut2021-SKN-Konzept-CO2-Mindestpreis-final.pdf), zuletzt geprüft am 01.07.2022.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2020): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms, 4. Quantifizierungsbericht (2019), 2020. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/umsetzung-aktionsprogramm-klimaschutz-2020-begleitung-der-umsetzung-der-massnahmen-des-aktionsprogramms>.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES (2022): Klimaschutzbeitrag verschiedener CO<sub>2</sub>-Preispfade in den BEHG-Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie. Unter Mitarbeit von Harthan, R.; Repenning, J.; Blanck, R.; Emele, L.; Görz, W. K. et al. (Climate Change, 19/2022). Umweltbundesamt (Hg.), 2022. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzbeitrag-verschiedener-co2-preispfade-in>, zuletzt geprüft am 10.06.2022.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES GmbH; Thünen-Institut (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. Unter Mitarbeit von Repenning, J.; Harthan, R. O.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S. et al., 2021. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/projektionsbericht\\_2021\\_uba\\_website.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/projektionsbericht_2021_uba_website.pdf), zuletzt geprüft am 29.10.2021.

Oppermann, R.; Pfister, S.; Eirich, A. (2020): Sicherung der Biodiversität in der Agrarlandschaft, Quantifizierung des Maßnahmenbedarfs und Empfehlungen zur Umsetzung. Institut für Agrarökologie und Biodiversität (Hg.). Mannheim, 2020.

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. Abschlussbericht. In: *Climate*

change (54/2021). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-des-wirtschaftlichen-potenzials-fuer-eine>, zuletzt geprüft am 22.02.2022.

Papapetrou, M.; Kosmadakis, G.; Cipollina, A.; La Commare, U. (2018): Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country. In: *Applied Thermal Engineering* (138), S. 207–216, zuletzt geprüft am 20.05.2022.

Penn-Bressel, G.; Jering, A.; Lindemann, H.-H.; Seidel, W.; Musolff, A.; Burger, A.; Berg, H.; Wehrspau, M.; Locher, B.; Hülsmann, W.; Solms, J.; Dickow-Hahn, R.; Roy, L. et al. (2003): Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr. Materialienband (Texte, 90/03). Umweltbundesamt (Hg.). Berlin, 2003. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2587.pdf>, zuletzt geprüft am 19.04.2021.

Peter, M.; Bertschmann-Aeppli, D.; Zandonella, R.; Maibach, M. (2012): Auswirkungen der Einführung der Luftverkehrsteuer auf die Unternehmen des Luftverkehrssektors in Deutschland, Ex-post Analyse nach einem Jahr, im Auftrag für das Bundesministerium der Finanzen. Zusammenfassung Schlussbericht. infras. Zürich, 2012. Online verfügbar unter [http://www.infras.ch/media/filer\\_public/d3/de/d3de69df-a4d9-4d4c-9367-60237b62b815/wirkunglvs\\_sb\\_infras\\_270612\\_zusammenfassung.pdf](http://www.infras.ch/media/filer_public/d3/de/d3de69df-a4d9-4d4c-9367-60237b62b815/wirkunglvs_sb_infras_270612_zusammenfassung.pdf).

Prognos (2021): Sofortprogramm 2020 für den Gebäudesektor, Gutachterliche Bewertung einer Anhebung der Fördervolumina der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG). Online verfügbar unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/G/20211021-sofortprogramm-2020-fur-den-gebauedesektor.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/G/20211021-sofortprogramm-2020-fur-den-gebauedesektor.pdf?__blob=publicationFile&v=8), zuletzt geprüft am 21.05.2022.

Prognos et al. (2018): Grundsatzstudie Energieeffizienz (Endbericht BfEE 03/15). BfEE (Hg.), 2018. Online verfügbar unter [https://www.bfee-online.de/SharedDocs/Downloads/BfEE/DE/Effizienzpolitik/grundsatzstudie\\_energieeffizienz.html](https://www.bfee-online.de/SharedDocs/Downloads/BfEE/DE/Effizienzpolitik/grundsatzstudie_energieeffizienz.html).

Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut - Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045, Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Berlin, 2021. Online verfügbar unter [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_01\\_DE\\_KNDE2045/KNDE2045\\_Langfassung.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf), zuletzt geprüft am 20.10.2021.

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.

Reichelt, F.; Lechtape, C. (2019): Greifswalder Moorstudie - Abschlussbericht Emissionsbilanzierung und Handlungsempfehlungen für die Moorflächen im Greifswalder Stadtgebiet, Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 01/ 2019 (Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe, 01/2019). Greifswald, 2019.

Schlomann, B.; Rohde, C.; Bentele, S. (2021): Mögliche Ausgestaltung eines Energieeinsparverpflichtungssystems für Deutschland (Climate Change) (11/2021). Umweltbundesamt (Hg.), 2021. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-02-26\\_cc\\_11-2021\\_energieeinsparverpflichtungssystem.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-02-26_cc_11-2021_energieeinsparverpflichtungssystem.pdf).

Schlomann, B.; Steinbach, J.; Kleeberger, H.; Geiger, B.; Pich, A.; Gruber, E.; Mai, M.; Schiller, W.; Gerspacher, A. (2014): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) für die Jahre 2004 bis 2006. Fraunhofer Verlag. Stuttgart, 2014.

SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen, Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit - Koalitionsvertrag 2021-2025. Berlin, 07.12.2021. Online verfügbar unter [https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag\\_2021-2025.pdf](https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf), zuletzt geprüft am 30.03.2022.

StÄBL - Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2022): Regionaldatenbank, Landwirtschaftliche Betriebe mit Viehhaltung und Zahl der Tiere - Stichtag - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte. Online verfügbar unter <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online>, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

StBA - Statistisches Bundesamt (2010): Produktionsdatenbank (Prodcom). Wiesbaden, 2010. Online verfügbar unter <http://www.eds-destatis.de/de/theme4/prodcom.php>.

StBA (2014), 2014. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsgueter/Tabellen/Haushaltsgeraete\\_D.html;jsessionid=C31652E6733135B52042C3DE401DC823.cae4#tab221342No1](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsgueter/Tabellen/Haushaltsgeraete_D.html;jsessionid=C31652E6733135B52042C3DE401DC823.cae4#tab221342No1).

StBA (2017): Entwicklung der Privathaushalte bis 2035, Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/HaushalteMikrozensus/EntwicklungPrivathaushalte.html>.

StBA: Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes, Fachserie 4, Reihe 4.3, Statistisches Bundesamt.

Steinbach, J. (2015): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grads eines Doktors der Wirtschaftswissenschaften bei der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologien.

Steinbach, J. (2021): Wie erreichen wir die Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 – die Sicht der Wissenschaft, Impulsvortrag Akteurstreffen der energetischen Gebäudesanierung am 12. April. Netzwerktreffen der Akteure der energetischen Gebäudemodernisierung erörtert. IREES, 2021.

UBA - Umweltbundesamt (2020a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018, Umweltbundesamt - UNFCCC-Submission, 2020.

UBA - Umweltbundesamt (2020b): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, 1990-2018. Stand EU-Submission 15.01.2020, 2020. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>.

UBA (2018a): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016, Gekürzte Version für die EU. UBA. Dessau-Roßlau, 14.01.2018. Online verfügbar unter [http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07\\_inventory/ghg\\_inventory/envwldoww/2018\\_01\\_15\\_EU-NIR\\_2018.pdf](http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envwldoww/2018_01_15_EU-NIR_2018.pdf), zuletzt geprüft am 20.02.2018.

UBA (2018b): Zentrales System Emissionen (ZSE), Datenausspielung, Stand Januar-Submission 2018. Umweltbundesamt, 2018.

UBA (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). Unter Mitarbeit von Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J. et al. (115/2019). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau, 2019.

UBA (2020c): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018, Umweltbundesamt - UNFCCC-Submission, 2020.

UBA (2020d): Zentrales System Emissionen (ZSE). Datenausspielung, Stand 01.09.2020. Umweltbundesamt, 2020.

UBA (2020e): Zentrales System Emissionen (ZSE). Datenausspielung, Stand 01.09.2020. Umweltbundesamt, 2020.

UBA (2021a): National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2019, 2021. Online verfügbar unter <https://unfccc.int/documents/273433>, zuletzt geprüft am 16.02.2022.

UBA (2021b): Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020. Umweltbundesamt, Dessau, 15.03.2021. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/2021\\_03\\_10\\_trendtabellen\\_thg\\_nach\\_sektoren\\_v1.0.xlsx](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/2021_03_10_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx).

UBA (2022): Emissionsübersichten nach KSG-Sektoren, 2022. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2021-01-12\\_em\\_entwicklung\\_in\\_d\\_thg\\_sektoren\\_v1.0\\_0.xlsx](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2021-01-12_em_entwicklung_in_d_thg_sektoren_v1.0_0.xlsx), zuletzt geprüft am 07.03.2022.

Umweltbundesamt (2021): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2019 (Climate Change, 43/2021). Umweltbundesamt, 2021. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19\\_cc\\_43-2021\\_nir\\_2021\\_1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19_cc_43-2021_nir_2021_1.pdf), zuletzt geprüft am 04.10.2021.

UNFCCC (2000): UNFCCC guidelines on reporting and review, Review of the implementation of commitments and of other provisions of the convention. FCCC/CP/1999/7. Online verfügbar unter <http://unfccc.int/resource/docs/cop5/07.pdf>, zuletzt geprüft am 13.12.2018.

UNFCCC (2013): Revision of the UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention, Decision 24/CP.19. Online verfügbar unter [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/reporting\\_requirements/items/2759.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/reporting_requirements/items/2759.php), zuletzt geprüft am 21.09.2017.

Uthes, S. (2022): Einfluss steigender Energiepreise auf den Düngemittleinsatz (Opinion Paper, 1/22). Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., 2022. Online verfügbar unter [https://www.zalf.de/de/forschung\\_lehre/publikationen/Documents/Policy\\_Paper/Opinion\\_Paper\\_Duengemittel\\_1-22.pdf](https://www.zalf.de/de/forschung_lehre/publikationen/Documents/Policy_Paper/Opinion_Paper_Duengemittel_1-22.pdf), zuletzt geprüft am 26.04.2022.

Van Holsteijn en Kemna B.V. et al. (2014): "Omnibus" Review Study on Cold Appliances, Washing Machines, Dishwashers, Washer-Driers, Lighting, Set-top Boxes and Pumps., 2014.

VCI (2022): Chemiewirtschaft in Zahlen online, Kennzahlen, Zeitreihen und Strukturdaten für Ihre Recherche, 2022. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/chemiewirtschaft-in-zahlen-online.jsp>.

VDZ (2022): Zahlen und Daten. Online verfügbar unter <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/zahlen-und-daten>.

Vogl, V.; Åhman, 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, 2022.

Wiesmeier, M.; Mayer, S.; Burmeister, J.; Hübner, R.; Kögel-Knabner, I. (2020): Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios. In: *Geoderma* 369, S. 114333. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114333.

World Steel Association (2021): Steel Statistical Yearbook, 2020 concise version. Brüssel, 2021.

ZVEI (2006-2009): Zahlenspiegel des deutschen Elektro-Hausgerätemarktes 2005-2008. Frankfurt, 2006-2009.

## A Anhang

### A.1 Instrumententypen

**Tabelle A 1: Klassifikation der Instrumententypen**

Instrumententyp		Erläuterung, Beispiele
Ökonomische Instrumente	E	Preis- und mengenpolitische Steuerungsmechanismen: Umweltabgaben-/Steuern, Handelbare Zertifikate, Handelbare Quoten, Tarifpolitik, Marktreform/-öffnung
Fiskalische Instrumente	F	Subventionen und öffentliche Infrastrukturausgaben: Zuschüsse, verbilligte Kredite, Steuererleichterungen, Staatliche Investitionen
Verpflichtungserklärungen	V	Freiwillige und verhandelte Selbstverpflichtungen: Vereinbarungen von Wirtschaftsbereichen, Branchen oder Unternehmen
Regulierung	R	Ordnungsrechtliche Vorschriften: Ver- und Gebote, technische Standards, Produktkennzeichnung
Information	I	Allgemeine Information und Beratung: Broschüren, Informationszentralen, Agenturen, Beratungsstellen
Bildung	ET	Regelung und Förderung der Bildung: Aus-, Fort- und Weiterbildung
Forschung und Entwicklung	D	Förderung der Forschung, Entwicklung und Demonstration: Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung, Projektförderung
Andere	O	Andere Instrumente: Appelle, indikative Zielvorgaben/Planung, Hemmnisabbau

Quelle: (UNFCCC 2000)

### A.2 Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen

**Tabelle A 2: Entwicklung der gesamten Emissionen nach CRF-Quellgruppen im KIS-2030, 1990-2040**

Sektor	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Energiewirtschaft	427,4	379,4	295,2	147,1	69,0	41,3	20,5
Industrie	186,7	115,3	130,1	103,5	78,7	61,8	44,8
GHD	88,4	47,9	39,1	33,3	24,1	15,6	9,3
Haushalte	131,9	112,0	83,7	71,6	47,6	26,6	14,0
Verkehr	165,0	161,5	163,6	136,4	85,1	42,9	21,5
Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	37,7	16,1	8,5	7,0	6,3	5,6	5,1
Industrieprozesse	94,8	75,6	64,8	52,3	39,0	33,6	31,4
Landwirtschaft	79,3	64,2	63,6	56,7	51,1	46,3	42,0
Abfallwirtschaft	38,3	21,3	9,7	6,3	4,0	2,8	2,6

Sektor	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<b>Gesamt</b>	<b>1.249,5</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>614,0</b>	<b>405,0</b>	<b>276,6</b>	<b>191,2</b>
<i>ggü. 2005</i>			-13,6 %	-38,2 %	-59,2 %	-72,2 %	-80,7 %
<i>ggü. 1990</i>		-20,5 %	-31,3 %	-50,9 %	-67,6 %	-77,9 %	-84,7 %
Nachrichtlich:							
LULUCF	-28,8	-13,4	-26,9	-16,4	-25,1	-33,7	-40,4
Internationaler Luft- und Seeverkehr	18,7	30,4	34,7	34,4	35,2	32,9	30,5

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

**Tabelle A 3: Entwicklung der gesamten Emissionen nach CRF-Quellgruppen im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 1990-2040**

Sektor	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Energiewirtschaft	427,4	379,4	295,2	146,8	68,0	40,8	20,6
Industrie	186,7	115,3	130,1	103,5	79,4	62,5	45,1
GHD	88,4	47,9	39,1	33,4	24,3	15,6	9,4
Haushalte	131,9	112,0	83,7	72,2	48,7	27,0	14,5
Verkehr	165,0	161,5	163,6	139,1	91,5	49,3	25,8
Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	37,7	16,1	8,5	7,0	6,313	5,6	5,1
Industrieprozesse	94,8	75,6	64,8	52,2	39,0	33,7	31,4
Landwirtschaft	79,3	64,2	63,6	56,7	51,1	46,3	42,0
Abfallwirtschaft	38,3	21,3	9,7	6,3	4,0	2,8	2,6
<b>Gesamt</b>	<b>1.249,5</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>617,1</b>	<b>412,2</b>	<b>283,6</b>	<b>196,4</b>
<i>ggü. 2005</i>			-13,6 %	-37,9 %	-58,5 %	-71,4 %	-80,2 %
<i>ggü. 1990</i>		-20,5 %	-31,3 %	-50,6 %	-67,0 %	-77,3 %	-84,3 %
Nachrichtlich:							
LULUCF	-28,8	-13,4	-26,9	-16,4	-25,1	-33,7	-40,4
Internationaler Luft- und Seeverkehr	18,7	30,4	34,7	34,4	35,2	33,0	30,5

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

**Tabelle A 4: Entwicklung der gesamten Emissionen nach CRF-Quellgruppen im MMS, 1990-2040**

Sektor	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq						
Energiewirtschaft	427,4	379,4	295,2	234,5	185,3	127,9	67,9

Sektor	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Industrie	186,7	115,3	130,1	119,3	106,8	97,5	94,9
GHD	88,4	47,9	39,1	35,0	29,5	23,1	18,1
Haushalte	131,9	112,0	83,7	78,6	66,8	51,0	36,9
Verkehr	165,0	161,5	163,6	152,7	127,6	101,2	79,7
Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	37,7	16,1	8,5	7,0	6,8	6,4	6,0
Industrieprozesse	94,8	75,6	64,8	55,5	47,8	45,7	44,5
Landwirtschaft	79,3	64,2	63,6	61,6	57,3	57,3	57,3
Abfallwirtschaft	38,3	21,3	9,7	6,7	5,0	4,0	3,4
<b>Gesamt</b>	<b>1.249,5</b>	<b>993,2</b>	<b>858,3</b>	<b>750,9</b>	<b>632,9</b>	<b>514,0</b>	<b>408,7</b>
<i>ggü. 2005</i>			-13,6 %	-24,4 %	-36,3 %	-48,2 %	-58,8 %
<i>ggü. 1990</i>		-20,5 %	-31,3 %	-39,9 %	-49,3 %	-58,9 %	-67,3 %
Nachrichtlich:							
LULUCF	-28,8	-13,4	-26,9	16,9	22,3	23,0	21,9
Internationaler Luft- und Seeverkehr	18,7	30,4	34,7	35,1	36,0	37,1	38,0

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021).

### A.3 Bruttostromerzeugung

Tabelle A 5: Bruttostromerzeugung im KIS-2030, 2008-2040

Energieträger	2008	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Kernenergie	148,8	76,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	150,6	145,6	34,4	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	124,6	82,6	21,5	0,0	0,0	0,0
Erdgas	89,1	82,5	159,1	107,9	54,0	0,0
Mineralöl	9,7	5,2	4,4	2,3	1,3	0,8
Wasserkraft	20,4	18,0	20,9	21,0	21,1	21,2
Windenergie onshore	41,4	90,5	134,5	202,1	262,2	308,9
Windenergie offshore	0,0	19,5	42,0	121,1	184,1	218,7
Photovoltaik	4,4	45,8	94,4	192,1	278,7	358,9
Biomasse*	28,0	50,9	43,8	38,6	38,4	39,1
Geothermie	0,0	0,2	0,5	0,7	1,0	1,1

Energieträger	2008	2018	2025	2030	2035	2040
Sonstige	24,5	26,8	19,4	25,7	29,5	29,2
Wasserstoff	0,0	0,0	0,0	0,0	16,6	40,3
<b>Bruttostromerzeugung</b>	<b>641,5</b>	<b>643,5</b>	<b>574,8</b>	<b>711,5</b>	<b>886,9</b>	<b>1.018,2</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,3 %</i>	<i>-10,4 %</i>	<i>10,9 %</i>	<i>38,3 %</i>	<i>58,7 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>14,7 %</i>	<i>34,9 %</i>	<i>58,5 %</i>	<i>80,9 %</i>	<i>88,6 %</i>	<i>93,1 %</i>
Stromhandelssaldo**	-20,1	-48,7	31,0	16,8	-40,2	-95,9
<b>Bruttostromverbrauch</b>	<b>621,4</b>	<b>594,7</b>	<b>605,8</b>	<b>728,4</b>	<b>846,6</b>	<b>922,2</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-4,3 %</i>	<i>-2,5%</i>	<i>17,2%</i>	<i>36,2%</i>	<i>48,4%</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>15,2 %</i>	<i>37,8 %</i>	<i>55,5%</i>	<i>79,0%</i>	<i>92,8%</i>	<i>102,8%<sup>b</sup></i>

Quelle: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellrechnungen des Öko-Institut.

Anmerkungen:

\* Einschließlich organischen Anteils des Abfalls. b Ein positives Vorzeichen zeigt einen Importüberschuss, ein negatives Vorzeichen einen Exportüberschuss an.

\*\* Ein erneuerbarer Anteil größer als 100 % bedeutet, dass mehr Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird als in Deutschland verbraucht wird.

**Tabelle A 6: Bruttostromerzeugung im KIS-2030 (BEHG-Sensitivität), 2008-2040**

Energieträger	2008	2018	2025	2030	2035	2040
	<b>TWh</b>					
Kernenergie	148,8	76,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	150,6	145,6	34,3	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	124,6	82,6	21,4	0,0	0,0	0,0
Erdgas	89,1	82,5	158,6	104,6	52,3	0,0
Mineralöl	9,7	5,2	4,4	2,2	1,3	0,7
Wasserkraft	20,4	18,0	20,9	21,0	21,1	21,2
Windenergie onshore	41,4	90,5	134,5	202,1	262,0	308,8
Windenergie offshore	0,0	19,5	42,0	120,9	183,2	219,3
Photovoltaik	4,4	45,8	94,4	192,1	278,6	358,9
Biomasse*	28,0	50,9	43,8	38,6	38,4	39,1
Geothermie	0,0	0,2	0,5	0,7	1,0	1,1
Sonstige	24,5	26,8	19,3	26,1	29,5	29,1
Wasserstoff	0,0	0,0	0,0	0,0	14,6	37,6
<b>Bruttostromerzeugung</b>	<b>641,5</b>	<b>643,5</b>	<b>574,1</b>	<b>708,3</b>	<b>882,1</b>	<b>1.015,9</b>
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,3 %</i>	<i>-10,5 %</i>	<i>10,4 %</i>	<i>37,5 %</i>	<i>58,4 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>14,7 %</i>	<i>34,9 %</i>	<i>58,6 %</i>	<i>81,2 %</i>	<i>88,9 %</i>	<i>93,4 %</i>

Energieträger	2008	2018	2025	2030	2035	2040
Stromhandelssaldo**	-20,1	-48,7	30,9	11,8	-45,9	-105,8
<b>Bruttostromverbrauch</b>	<b>621,4</b>	<b>594,7</b>	<b>605,0</b>	<b>720,1</b>	<b>836,2</b>	<b>910,0</b>
Änderung ggü. 2008	0,0 %	-4,3 %	-2,6%	15,9%	34,6%	46,4%
Erneuerbarer Anteil	15,2 %	37,8 %	55,6%	79,9%	93,8%	104,2% <sup>b</sup>

Quelle: (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), Modellrechnungen des Öko-Institut.

Anmerkungen:

\* Einschließlich organischen Anteils des Abfalls. b Ein positives Vorzeichen zeigt einen Importüberschuss, ein negatives Vorzeichen einen Exportüberschuss an.

\*\* Ein erneuerbarer Anteil größer als 100 % bedeutet, dass mehr Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird als in Deutschland verbraucht wird.

**Tabelle A 7: Bruttostromerzeugung im MMS, 2008-2040**

Energieträger	2008	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Kernenergie	148,8	76,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	150,6	145,6	111,1	67,8	59,0	0,0
Steinkohle	124,6	82,6	62,3	58,4	0,0	0,0
Erdgas	89,1	82,5	99,7	112,0	106,3	106,9
Mineralöl	9,7	5,2	4,9	3,5	2,5	2,3
Wasserkraft	20,4	18,0	20,9	21,0	21,1	21,2
Windenergie onshore	41,4	90,5	120,8	140,1	190,8	229,2
Windenergie offshore	0,0	19,5	42,7	81,8	131,8	162,7
Photovoltaik	4,4	45,8	66,1	90,3	108,5	115,4
Biomasse*	28,0	50,9	45,3	42,1	37,4	35,5
Geothermie	0,0	0,2	0,5	0,7	1,0	1,1
Sonstige	24,5	26,8	21,9	19,7	20,3	19,6
Wasserstoff	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Bruttostromerzeugung</b>	<b>641,5</b>	<b>643,5</b>	<b>596,2</b>	<b>637,4</b>	<b>678,7</b>	<b>694,0</b>
Änderung ggü. 2008	0,0 %	0,3 %	-7,1 %	-0,6 %	5,8 %	8,2 %
Erneuerbarer Anteil	14,7 %	34,9 %	48,2 %	59,6 %	72,9 %	81,5 %
Stromhandelssaldo*	-20,1	-48,7	-17,0	-39,6	-46,7	-20,5
<b>Bruttostromverbrauch</b>	<b>621,4</b>	<b>594,7</b>	<b>579,2</b>	<b>597,8</b>	<b>632,0</b>	<b>673,4</b>
Änderung ggü. 2008	0,0 %	-4,3 %	-6,8 %	-3,8 %	1,7 %	8,4 %
Erneuerbarer Anteil	15,2 %	37,8 %	51,2 %	62,9 %	77,6 %	83,9 %

Quelle: (Öko-Institut et al. 2021).

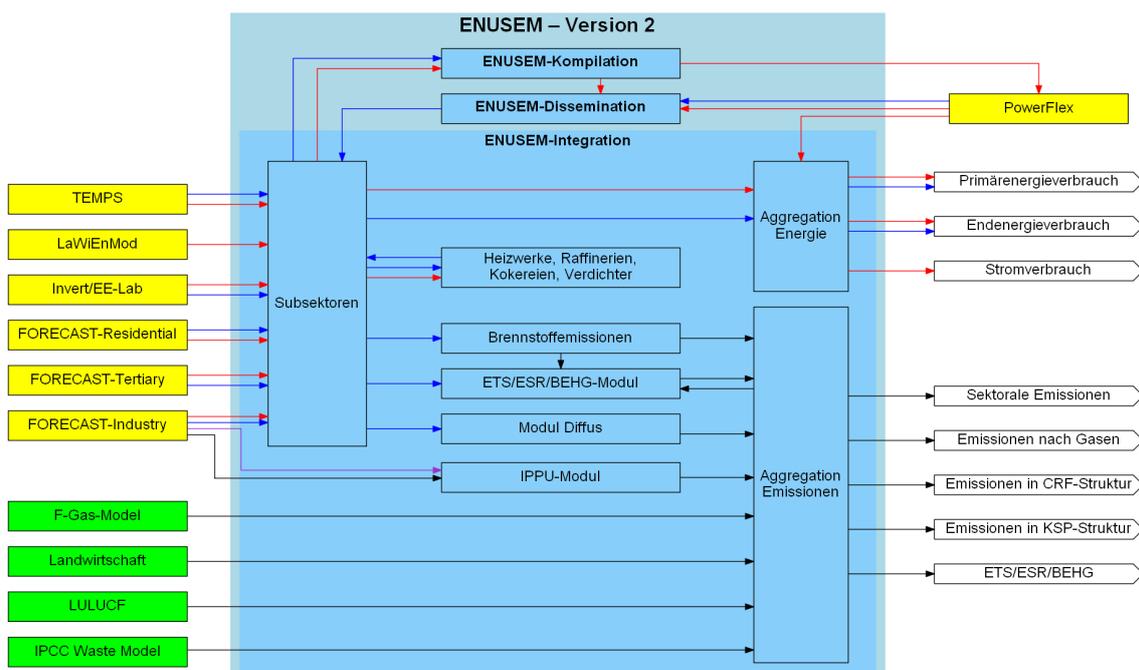
Anmerkung: \* Einschließlich organischen Anteils des Abfalls. \*\* Ein positives Vorzeichen zeigt einen Importüberschuss, ein negatives Vorzeichen einen Exportüberschuss an.

## B Modellbeschreibungen

### B.1 ENUSEM

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 130: Struktur von ENUSEM und Interaktion mit anderen Modellen



blaue Kästen: Integrationsmodell ENUSEM  
gelbe Kästen: Sektormodelle Energie  
grüne Kästen: sonstige Sektormodelle  
lila Pfeile: sonstige Aktivitätsdaten

rote Pfeile: Brennstoffverbräuche  
blaue Pfeile: sonstige Energieverbräuche  
schwarze Pfeile: Emissionen

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

In Abbildung 130 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. Wasserstoff) 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 Lastenteilungsverordnung (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.

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 in einem separaten Modell berechnet und in das Datengerüst der gesamten prozessbedingten Emissionen integriert.

Die in Abbildung 130 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 der Common Reporting Format (Struktur des Nationalen Inventarberichts),
- ▶ Treibhausgasemissionen nach Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG),
- ▶ Treibhausgasemissionen unterteilt in EU-ETS und ESR.

Da ENUSEM alle wesentlichen Energie- und Emissionsdaten des Modellverbunds enthält, können weitere Ergebnisdaten einfach ermittelt werden. Eingesetzt wird ENUSEM vor allem im Verbund mit weiteren Modellen des Öko-Instituts sowie der FORECAST-Modellfamilie des Fraunhofer-ISI und dem Modell Invert/EE-Lab von IREES.

Implementiert ist ENUSEM in Excel und besteht dabei aus drei Modulen:

- ▶ ENUSEM-Integration sammelt zentral die Energiedaten aller Modelle und berechnet daraus die verbrennungsbedingten Emissionen. Hier werden auch die Teile der Energiewirtschaft berechnet, die nicht durch das Strommarktmodell PowerFlex abgedeckt werden. Ebenso berechnet das Modul die diffusen Emissionen der Brennstoffe und die Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung.

- ▶ ENUSEM-Kompilation bereitet die Verbräuche von Strom, netzgebundener Wärme und synthetischen Brennstoffen als Eingangsdaten für das Strommarktmodell auf.
- ▶ ENUSEM-Dissemination teilt die Brennstoffeinsätze der Kraftwerke auf Subsektoren auf und berücksichtigt dabei Randbedingungen, die nicht in PowerFlex implementiert sind, beispielsweise zur Deckung der industriellen KWK-Wärmeeigenerzeugung.

## B.2 INVERT/EE-Lab Modellbeschreibung und INVERT-Agents

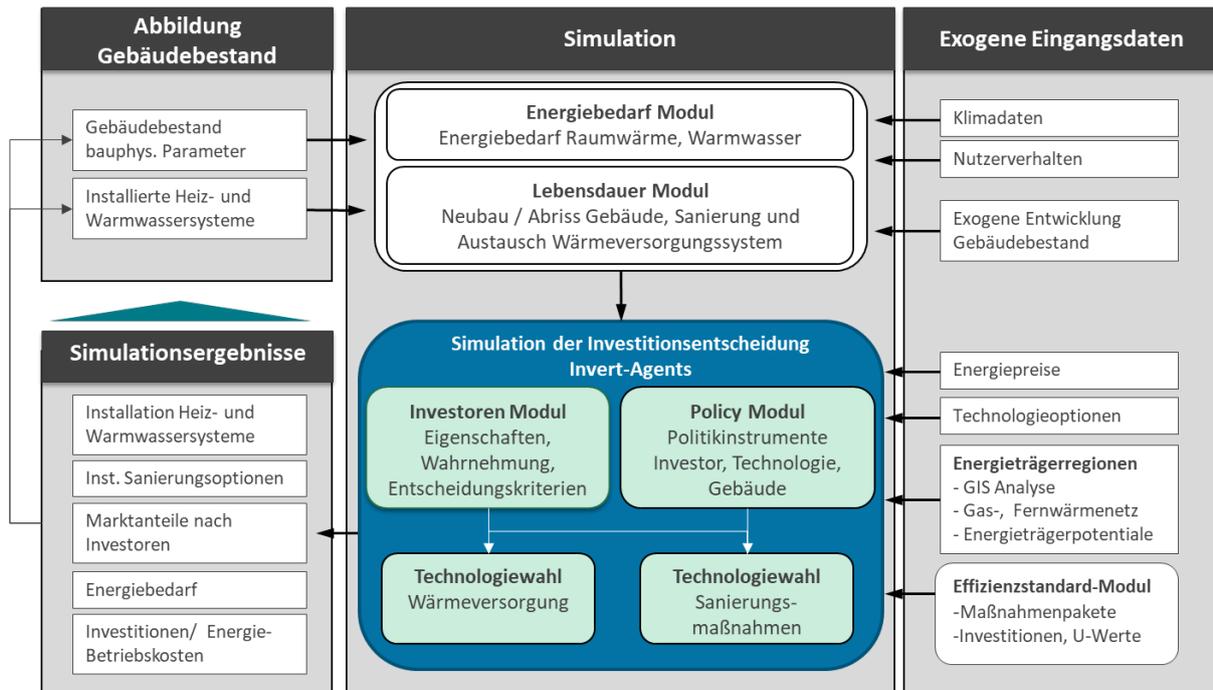
Methodisch stellt Invert/EE-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, techno-ökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden können. Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualterklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen im Modul INVERT-Agents 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. Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes *Diffusion EE* wird das Modell, um den Bereich der Intermediäre als zentrale Change Agents erweitert, um den Einfluss auf die Investitionsentscheidung im Gebäudebereich abzubilden.

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.
- ▶ Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, hier besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Bereitstellungstechnologien. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.
- ▶ Die Modellierung der Energiebereitstellung aus solarthermischen Anlagen erfolgt auf monatlicher Basis unter Berücksichtigung der entsprechenden solaren Einstrahlung. Zudem wird entsprechend der Geometrie der Referenzgebäude, die den solarthermischen Anlagen zur Verfügung stehende Dachfläche im Modell berücksichtigt.
- ▶ Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Effizienzmaßnahmen wie Investitionszuschüsse (Marktanreizprogramm), Nutzungspflichten (EEWärmeG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technologie- und gebäudespezifisch (Neubau, Bestand, öffentliche Gebäude) definiert.
- ▶ Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der Limitierung erneuerbarer Energieträger über definierte Kostenpotenziale inklusive deren Entwicklung über den Simulationszeitraum.

Abbildung 131: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab

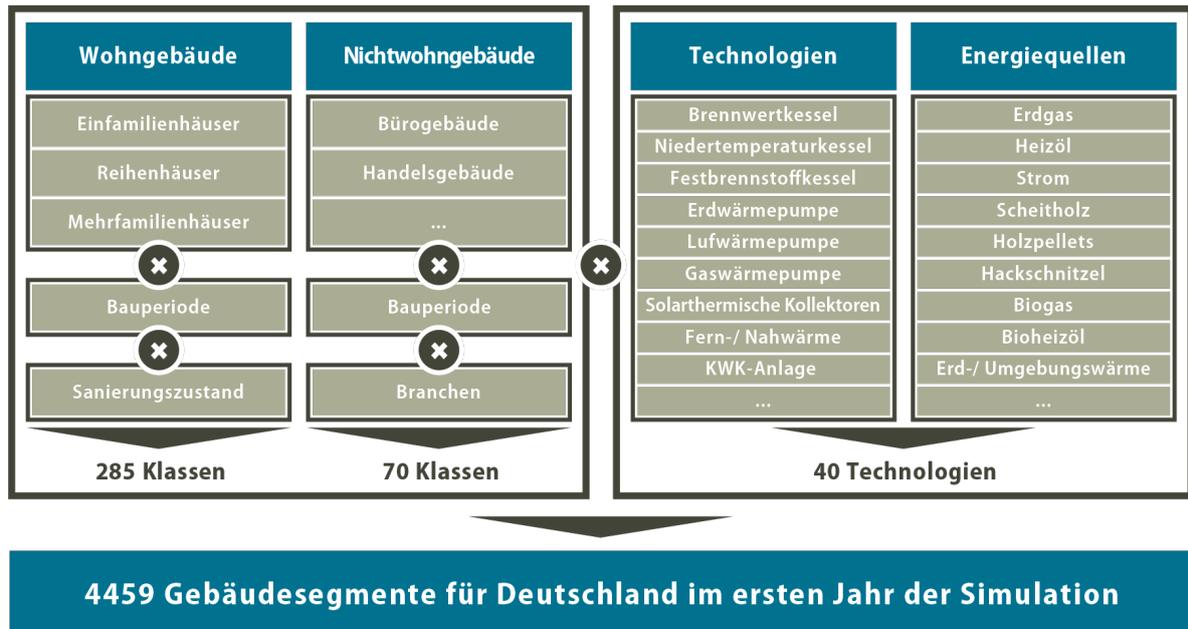


Quelle: (Steinbach 2015)

### Gebäudetypologische Abbildung von Referenzgebäuden und Wärmeversorgungstechnologien

Derzeit werden 40 verschiedene Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser unterschieden, welche über detaillierte technische und ökonomische Daten abgebildet werden. Die Referenzgebäudetypologie mit den entsprechenden Zuordnungen von Gebäuden und Technologien wird auf Basis der Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Diefenbach et al. 2010) und deren Aktualisierung aus dem Jahr 2018 (Cischinsky und Diefenbach 2018). Die Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden basiert ursprünglich auf der Studie „Energieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (Fraunhofer ISI et al., 2013) und wird derzeit mit den Daten aus dem Projekt dataNWG: Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (<https://www.datanwg.de>) aktualisiert. Der aus der Modellrechnung resultierende Energiebedarf ist auf die temperaturbereinigten Werte der Anwendungsbilanzen sowie der EE-Wärmebereitstellung nach AGEE-Stat kalibriert.

Abbildung 132: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab

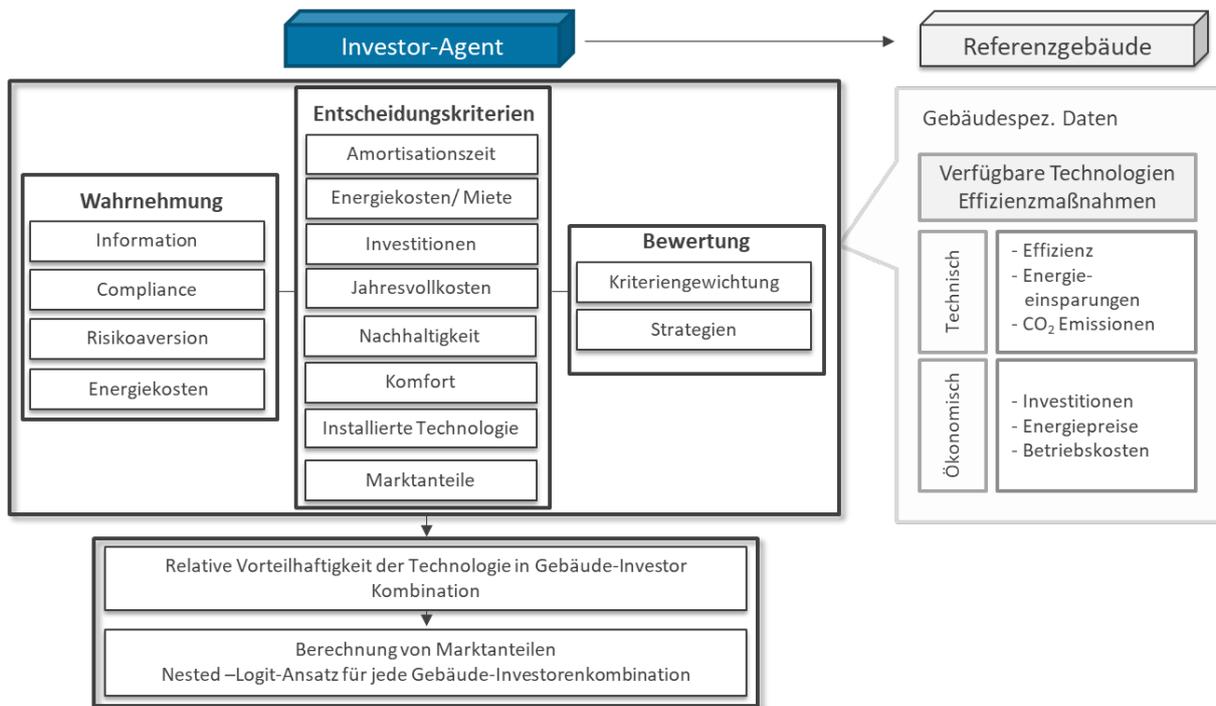


Quelle: eigene Darstellung, IREES

### Modellierung von Investoren im Gebäudebereich

Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer*, *Private Vermieter*, *Eigentümergeinschaften*, *Wohnungsbaugesellschaften*, *gewerbliche Gebäudebesitzer*. Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nicht – ökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, andererseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt werden.

Abbildung 133: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten

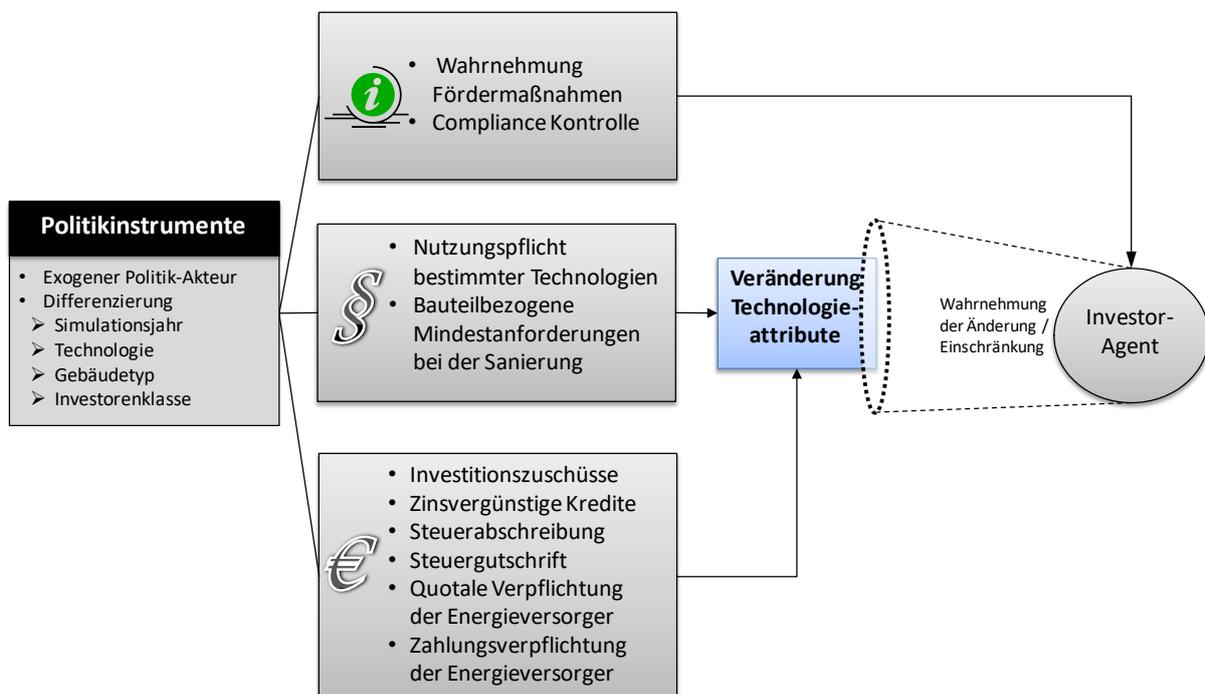


Quelle: eigene Darstellung, IREES

### Modellierung von Politikinstrumenten

Um die Wirkung der Politikinstrumente auf die Investitionsaktivität in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme zu untersuchen, werden diese explizit im Modell abgebildet. Dies geschieht als integrale Modellierung von Politikinstrumenten und Investoren, die eine akteursspezifische Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen sollen.

Abbildung 134: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumente in Invert-Agenten



Quelle: (Steinbach 2015)

Die Politikinstrumente und deren Ausgestaltung werden zunächst aus Sicht eines Politik-Akteurs für jedes Simulationsjahr exogen definiert. Dabei werden Förder- und Anforderungsbedingungen nach den adressierten Technologien und Maßnahmen sowie den Adressaten – Investorenklassen und Gebäudetypen differenziert. Ordnungsrechtliche und finanzielle Fördermaßnahmen verändern die Attribute der Technologiealternativen oder schränken die Wahlmöglichkeiten durch Nutzungspflichten oder Mindestanforderungen ein. In Abhängigkeit der definierten Investor-Agenten werden diese Veränderungen oder Einschränkungen bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt. Ein Investitionszuschuss beispielsweise verändert die relative Vorteilhaftigkeit einer Technologie hinsichtlich des Attributes Investitionen, wobei dies nicht zwangsläufig der wahrgenommenen Attributausprägung eines Investor-Agenten entspricht. Informativische Maßnahmen wiederum wirken indirekt auf die Attribute der Wahlmöglichkeiten, indem die investorenspezifische Wahrnehmung verändert wird.

Weitere Beschreibungen des Modells können Kranzl et al. (2013), Kranzl et al. (2016), Müller (2015) und Steinbach (2015) sowie der Modellwebsite ([www.invert.at](http://www.invert.at)) entnommen werden.

Die Datengrundlage für die Gebäude ist in Cischinsky und Diefenbach (2018), Clausnitzer et al. (2015), Diefenbach et al. (2010), Schlomann et al. (2014) und IWU et al. (2020) dokumentiert.

### B.3 FORECAST-Industry

**FORECAST als Sektormodell für die Industriesimulation:** Zur Berechnung der Szenarien für den Industriesektor setzen wir das Modell FORECAST ein (siehe Fleiter et al. (2018)). Es ermöglicht detaillierte Tiefenanalysen hinsichtlich der Struktur von Vermeidungskosten und -Potenzialen im Industriesektor.

**Modellstruktur:** *FORECAST* ist ein bottom-up Energienachfragemodell. Es bildet die Technologiestruktur der Industrie ab und berechnet Energieverbrauch und Emissionen sowie Kosten auf Prozessebene. Eingangsdaten für die Modellierung sind übergreifende Aktivitätsgrößen wie die Wirtschaftsleistung je Branche, Energie- und CO<sub>2</sub>-Preise, Annahmen zu Instrumenten, Strukturdaten wie Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie techno-ökonomische Daten der abgebildeten Technologien. Zur Parametrisierung wird auf statistische Daten, empirische Studien, Literatur und Expertenschätzungen zurückgegriffen. *FORECAST* ist hierarchisch aufgebaut und unterteilt die Industrie anhand von Energiebilanzen in einzelne Wirtschaftszweige bzw. Subsektoren. Diesen sind Prozesse zugeordnet, welche durch einen spezifischen Energieverbrauch und eine Aktivitätsgröße beschrieben werden. Weiterhin werden Technologiebereiche wie Elektromotoren, Industrieöfen, Raumwärme und Dampferzeugung separat modelliert.

**Dekarbonisierungsstrategien:** Für die Berechnung von Dekarbonisierungsszenarien/-pfaden kann eine große Bandbreite an unterschiedlichen Dekarbonisierungsstrategien berücksichtigt werden:

**Steigerung der Energieeffizienz:** Hohe Auflösung bei Prozessen und umfassende Datenbank zu Einspartechniken erlaubt Bewertung des vorhandenen Effizienz-Potenzials und endogene Modellierung abhängig von Energie- und CO<sub>2</sub>-Preisen.

**Prozesswechsel auf CO<sub>2</sub>-arme bzw. CO<sub>2</sub>-neutrale Verfahren:** Hohe Auflösung bei Produktionsrouten und Prozessen erlaubt technologiescharfe Modellierung des Wechsels auf neue Herstellungsverfahren je Produktionsroute. Neue Verfahren sind ggfs. auch mit dem Wechsel auf einen anderen Energieträger verbunden (z. B. Wasserstoff oder Strom).

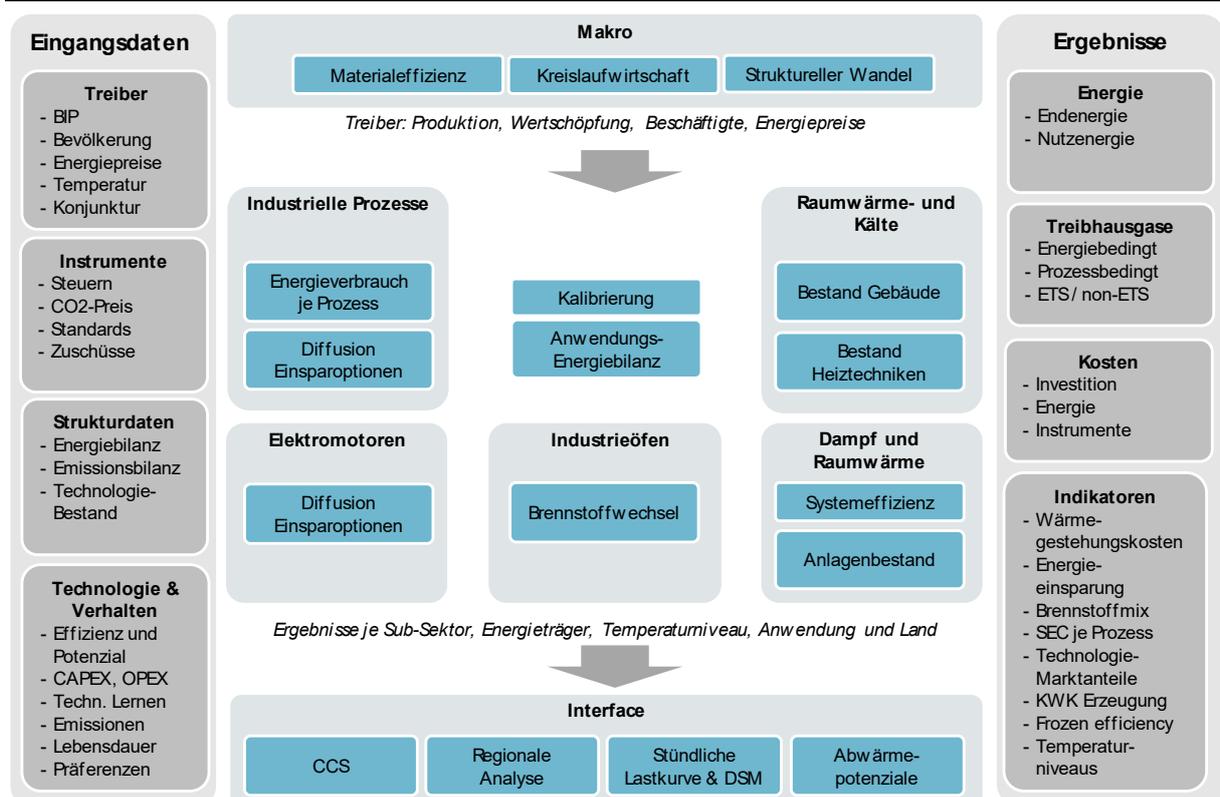
**Brennstoffwechsel:** Bestandsmodell der Dampferzeuger inkl. *discrete choice* Modellierung der Investitionsentscheidung erlaubt endogene Simulation des Brennstoffwechsels entsprechend

Wirtschaftlichkeit und Technologiebestand der verschiedenen Dampferzeuger. Ein vereinfachter *discrete choice* Ansatz wird für die Modellierung des Brennstoffwechsels bei Industrieöfen verwendet (siehe Rehfeldt et al. (2018)) Dabei ist ein durch Preissignale motivierter Wechsel auf Biomasse, Strom (Elektrokessel, Wärmepumpen), Wasserstoff oder synthetische Brennstoffe möglich. Trägheiten von Anlagenbeständen und Investierendenverhalten werden abstrahiert berücksichtigt.

**CO<sub>2</sub> Abscheidung und Speicherung:** Hohe Prozessauflösung erlaubt Zuordnung von CCS zu ausgewählten Prozessen, z. B. um verbleibende prozessbedingte Emissionen in Produktionsrouten gezielt zu mindern.

**Recycling und Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungskette:** Große Anzahl berücksichtigter Produkte und separate Modellierung von Primär- und Sekundärrouten erlaubt je Szenario spezifische Annahmen zum Fortschritt bei Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft.

Abbildung 135: Übersicht Modell FORECAST-Industry



Quelle: Darstellung Fraunhofer ISI

**Das Modell ist kalibriert und einsatzfähig für EU-weite Rechnungen:** FORECAST umfasst aktuell alle Länder der EU27 (zusätzlich das Vereinigte Königreich, Norwegen und die Schweiz) und verfügt für diese über eine ausgeprägte und regelmäßig aktualisierte Datenbasis. Es wurde in verschiedenen Beratungsprojekten z. B. für die Europäische Kommission im EU-Kontext eingesetzt und ist kompatibel sowohl mit den deutschen (AGEB) als auch den Eurostat Energiebilanzen. Der methodische Ansatz (Darstellung der Industrie auf Prozessebene) erlaubt es, landestypische Besonderheiten der industriellen Struktur abzubilden (Rehfeldt et al. 2017, 2018).

**Simulation von Technologiediffusion und Investitionsentscheidungen:** FORECAST Industry legt besonderen Schwerpunkt auf die Abbildung von Transformationspfaden mit hohem technischem Detailgrad. So wird die Dampferzeugung mit einem Bestandsmodell abgebildet. Dieses

ermöglicht es, anhand der Altersstruktur der bestehenden Anlagen, der an die technische Lebensdauer der Anlagen geknüpften Austauschgeschwindigkeit und (abstrahierten) Annahmen zu Markteigenschaften (z. B. die Transparenz des Marktes) die Trägheit der Reaktion auf Preissignale abzubilden. Insbesondere im Kontext begrenzter Zeithorizonte lassen sich so Gelegenheitsfenster für den Technologieaustausch beschreiben. Ergänzend sind Anlagen der energieintensiven Industrie von erheblicher Bedeutung (u.a. Hochöfen, Dampfpaltöfen, Papiermaschinen). Diese sind auf Standortebene und mit ihrer Altersstruktur individuell erfasst. Die mit der Dekarbonisierung ihrer Branchen verbundenen zeitlichen Restriktionen (Infrastruktur, Preissignale, Modernisierungszyklen...) können so detailliert berücksichtigt werden. Im Rahmen der Szenariotechnik werden verschiedene Optionen verglichen (Manz et al 2021).

**Modelldatenbank:** FORECAST Industry nutzt eine Vielzahl verschiedener Datenquellen, welche in einer Modelldatenbank strukturiert und gebündelt sind. Maßgebliche, jährlich aktualisierte Daten umfassen die Energiebilanzen (AGEB, Eurostat), Produktionsmengen (verschiedene Quellen, Verbände, nationale/europäische Statistiken) und Emissionsmengen (Nationale Inventarberichte, CRF-Tabellen). Hinzu kommen techno-ökonomische Daten zu den Prozessen, Prozesswärmeerzeugungstechnologien und innovative Technologieoptionen (CCU/S, H<sub>2</sub>-DRI, neue Zementsorten usw.) und ökonomische Daten (Energieträgerpreise, CO<sub>2</sub>-Preise). Weiterhin ist eine EU-weite Datenbank mit den Standorten der Grundstoffindustrie an das Modell angebunden.

**Simulation von Politikinstrumenten:** FORECAST Industry ermöglicht an vielen Stellen der Modellierung Interventionen in den simulierten Ablauf. Diese werden zur Integration politischer Maßnahmen genutzt. Dazu gehören Preissignale und ordnungsrechtliche Maßnahmen ebenso wie eher weiche Hebel (z. B. Zugang zu Informationen). Der Grad der Abstrahierung variiert dabei stark, abhängig von der Verfügbarkeit empirischer Daten. An verschiedenen Stellen spielen Verhaltensaspekte eine Rolle, insbesondere wenn die Reaktion auf Preissignale bewertet wird. Das EU ETS als zentrales Instrument der Dekarbonisierungsbemühungen der EU wird auf Prozess- oder Subsektorebene (entsprechend der ETS-Aktivitäten) abgebildet. Entsprechend werden nicht im EU ETS vertretene Brennstoffbedarfe nationalen (z. B. BEHG) Bepreisungssystemen zugeordnet.

**Ausgewählte Referenzen:** FORECAST Industry wird in vielen nationalen und europäischen Projekten und zur Beantwortung unterschiedlicher inhaltlicher Fragestellungen eingesetzt. Darunter sind Projekte, die die Transformation des deutschen (Langfrist- und Klimaszenarien) und europäischen (Industrial Innovation: Pathway to deep decarbonisation of industry) Industriesektors in verschiedenen ausgeprägten Szenarien untersuchen, aber auch fokussierte Betrachtungen der Wirkung von ETS-Preissignalen auf die Industrie (ETS Vermeidungskostenkurven). Weiterhin wird das Modell in der langjährigen Projektreihe der Politiksznarien zur Modellierung der Wirkung der Klimaschutzmaßnahmen der Bundesregierung eingesetzt.

## B.4 FORECAST-Tertiary

Das Modul FORECAST-Tertiary ist vom Aufbau vergleichbar mit dem Industriemodul FORECAST-Industry, allerdings an Datenverfügbarkeit und Technologiestruktur im Dienstleistungssektor angepasst. D.h. im Modell wird über ein Mengengerüst der Energieverbrauch einzelner Branchen und Energiedienstleistungen in Abhängigkeit von Rahmenbedingungen (u.a. Wirtschaftsentwicklung, Effizienzpolitik, Energiepreise) berechnet.

Zentrale Aktivitätsgrößen sind die Anzahl der Beschäftigten und die Nutzfläche je Branche des tertiären Sektors. Der Energieverbrauch der einzelnen Branchen setzt sich wiederum als Summe einzelner Energiedienstleistungen zusammen. Die Verbreitung von Effizienzmaßnahmen senkt

den spezifischen Energieverbrauch einzelner Energiedienstleistungen und spiegelt so eine unterschiedliche Überwindung von Hemmnissen durch politische Instrumente zur Förderung der Energieeffizienz wider bzw. variierende Energiepreise. Modelliert wird die Diffusion von Effizienzmaßnahmen als eine Summe von Investitionsentscheidungen der Unternehmen. Im Folgenden wird auf die einzelnen Ebenen Aktivitätsgrößen, Energiedienstleistungen und Technologiestruktur sowie die Modelllogik detaillierter eingegangen.

Die Aktivitätsgrößen Anzahl der Beschäftigten und Nutzfläche je Branche bilden die zentralen Größen im Mengengerüst für die Hochrechnung des Energieverbrauchs. Beide Größen sind direkter an den Energieverbrauch gekoppelt als die Wertschöpfung des Sektors. Dabei sind die Beschäftigten eher für Energiedienstleistungen wie EDV-Ausstattung relevant, während die Nutzfläche für die gebäudebezogenen Energiedienstleistungen die zentrale Größe ist. Die Sektorale Einteilung der Aktivitätsgrößen orientiert sich dabei an der Klassifizierung der Wirtschaftszweige 2003 (WZ 2003) und unterscheidet acht Branchen (Tabelle 171). Entsprechend erlaubt sie über das hinterlegte Mengengerüst eine „bottom-up“-Berechnung des Energieverbrauchs für jede der Branchen, was deutlich über die Detaillierung der Energiebilanzen nach AGEB hinausgeht, welche den Energieverbrauch nur den tertiären Sektor als Ganzes ausweisen.

**Tabelle 173: Klassifizierung der Branchen des tertiären Sektors im Modell FORECAST**

Bezeichnung	WZ 2003
Beherbergungs- und Gaststätten	H
Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen	N
Erziehung und Unterricht	M
Groß- und Einzelhandel	G
Verkehr und Nachrichtenübermittlung	I
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	L
Kreditinstitute und Versicherungen	J
Sonstige Dienstleistungen (Abfall, Sport, Soziale Dienstleistungen) + Grundstücks- und Wohnungswesen	O+K

Quelle: Fraunhofer ISI

Der Energiebedarf je Branche wird als Summe des Energiebedarfs von bis zu 13 einzelnen Energiedienstleistungen (EDL) berechnet, die zusammen für den Großteil des Stromverbrauches im tertiären Sektor verantwortlich sind (Tabelle 172). Beispiele für EDL sind Beleuchtung, Kühlung oder IKT-Anwendungen. Bei den meisten EDL ergibt sich die absolute Nachfrage aus der globalen Aktivitätsgröße (entweder Fläche oder Beschäftigte) und der EDL-bezogenen Aktivitätsgröße (z. B. Anteil beleuchtete Fläche). Einige EDL sind nicht an die globalen Aktivitätsgrößen geknüpft, wie z. B. die Straßenbeleuchtung.

**Tabelle 174: Energiedienstleistungen (EDL), die für die Berechnung des Energiebedarfes je Branche summiert werden**

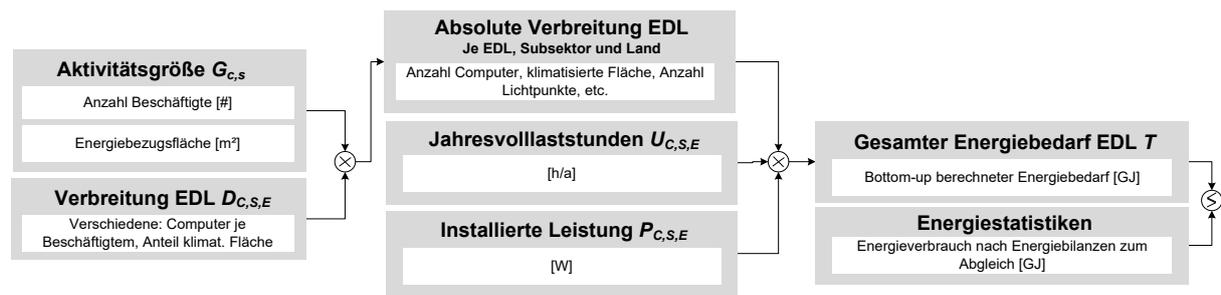
Typ	Energiedienstleistung	Beschreibung	Aktivitätsgröße EDL (D)	Aktivitätsgröße global (G)
El	Beleuchtung	Raumbeleuchtung	Anteil beleuchtete Gebäudefläche	Gebäudefläche
El/Th	Klimatisierung und Lüftung	Klimatisierung und Lüftung von Räumen und Gebäuden durch raumlufttechnische Anlagen	Anteil klimatisierte und gelüftete Gebäudefläche	Gebäudefläche
El	Umwälzpumpen	Verteilung von Fluiden in Heizungssystemen	-	Gebäudefläche
El	IKT im Büro	PC, Monitor, Kopierer/Drucker, etc.	IKT-Ausstattung eines durchschnittlichen Arbeitsplatzes	Anzahl Beschäftigte
El	IKT Server	Server sowohl in Datacentern als auch dezentral	Anzahl der Server	-
Th	Heißwasser	Heißwasser und Prozesswärme (z. B. Reinigung)	-	Gebäudefläche
Th	Raumwärme	Wärmepumpen und Elektrodirektheizungen	Anteil Gebäudefläche mit Elektroheizung	Gebäudefläche
Th/El	Wäscherei	Wäscherei vorwiegend in Hotels und Gesundheitssektor	Anzahl der Betten/Gäste	-
Th/El	Kochen	Kochen in Restaurants und Gesundheitssektor	Anzahl der Gerichte, Gäste, Betten	-
El	Kühlung	Kühlung von Produkten, vorwiegend Kühlregale in Supermärkten, aber auch Restaurants und Hotels)	-	Anzahl Beschäftigte
El	Verschiedene gebäudebezogene EDL	Restgröße	Gebäudefläche	Gebäudefläche
El	Straßenbeleuchtung	Beleuchtung von Straßen und öffentlichen Plätzen	Anzahl Lichtpunkte	-
El	Aufzüge	Zur Bereitstellung von vertikalem Transport in Gebäuden	Anzahl Aufzüge	-

El: Strombasiert (kaum substituierbar) Th: zur Wärmebereitstellung (Substituierbar durch andere Energieträger)

Quelle: Fraunhofer ISI

Das Mengengerüst zur Berechnung von Stromverbrauch und Einsparpotenzialen der Energiedienstleistungen ist dabei wie in Abbildung 136 dargestellt aufgebaut. Ausgehend von den globalen Aktivitätsgrößen Beschäftigte oder Nutzfläche des Subsektors wird mit Hilfe einer weiteren, der EDL zugeordneten spezifischen Aktivitätsgröße (z. B. Lichtpunkte pro Fläche oder Computer je Beschäftigtem) das absolute Nachfrageniveau nach einer Energiedienstleistung berechnet. Multipliziert mit den jährlichen Volllaststunden und der mittleren installierten Leistung ergibt sich der absolute Energiebedarf der Energiedienstleistung. Die Wirkung von Effizienzmaßnahmen setzt bei der spezifischen installierten Leistung oder den jährlichen Volllaststunden an, die abhängig von der Diffusion der Effizienzmaßnahmen gesenkt werden.

**Abbildung 136: Vereinfachte Darstellung des “bottom-up“-Mengengerüsts für den tertiären Sektor im Modell FORECAST**



Quelle: Fraunhofer ISI

Für die Diffusionsrate werden dabei im Modell exogen zunächst eine „technisch maximale“ Entwicklung und eine Art „autonome / business as usual“ Entwicklung hinterlegt. Diese stellen den Rahmen für die tatsächliche Entwicklung dar. Abhängig von den Energiepreisen ergibt sich eine Diffusionsgeschwindigkeit, welche zugrunde legt, dass wirtschaftliche Investitionen in Effizienzmaßnahmen durchgeführt werden. Entsprechend können mit einer höheren Wirtschaftlichkeitsanforderung Hemmnisse simuliert werden, z. B. über eine Diskontierungsrate, die deutlich über den typischen Anforderungen von Unternehmen liegt.

## B.5 FORECAST-Appliances

Das Modell für den Haushaltssektor, Forecast Residential, ist der dritte Bestandteil der ISI-Modellumgebung FORECAST. Während mittels des INVERT-Modelles der gebäudebezogene Energiebedarf (für Raumwärme und Warmwasserbereitung) ermittelt wird, bildet das Model FORECAST-Appliances den Strombedarf durch Elektrogeräte ab. Die Anzahl der Haushalte stellt die zentrale Aktivitätsgröße dar.

Für die elektrischen Haushaltsgeräte (Tabelle 175) wird ein Bestandsmodell zugrunde gelegt, welches über die Marktanteile der Effizienzklassen, die Lebensdauer der Geräte sowie deren Verteilung im Bestand und die Ausstattungsrate der Haushalte den zukünftigen Bestand berechnet. Effizienzfortschritte werden über die Zunahme der Marktanteile von effizienten Geräten modelliert. Hier können explizit die Wirkungen von politischen Maßnahmen, wie z. B. eine Pflicht zur Energiekennzeichnung oder Mindeststandards der EU-Verordnungen zur umweltgerechten Produktgestaltung berücksichtigt werden.

**Tabelle 175: Gerätetypen im Haushaltssektor**

Gerätegruppe	Gerätetyp
IKT-Geräte	Fernseher
	Set-Top Boxen
	Desktop Computer
	Laptops
	Modems/Router
Großgeräte	Computer-Bildschirme
	Gefriergeräte

Gerätegruppe	Gerätetyp
	Kühlschränke
	Waschmaschinen
	Spülmaschinen
	Trockner
Kochen	Elektroherde
Sonstige & neue Anwendungen	Aggregierte Abbildung der restlichen und neuen Haushaltsgeräte

Quelle: Fraunhofer ISI

Für die Geräte sind bei diesem Modell derzeit noch die Effizienzklassen entsprechend der früheren Einteilung der EU-Energiekennzeichnung hinterlegt. Diese reichen von G bis A+++ und berücksichtigen eine weitere, noch effizientere Klasse, welche die zukünftige Weiterentwicklung des Kennzeichnungssystems abbildet. Für einzelne Geräte, zu denen bisher keine Effizienzklassen definiert sind, werden die Effizienzunterschiede anhand der unterschiedlichen verfügbaren Technologien abgebildet. Für Bildschirme werden z. B. explizit Röhrenmonitore (CRT), LCD-Bildschirme und Plasmabildschirme unterschieden. Der Stromverbrauch der Geräte im Standby-Modus wird explizit über die Standby-Leistung und die Standby-Dauer je Gerätetyp modelliert und ausgewiesen.

## B.6 Landwirtschaft, LULUCF und Abfall

### B.6.1 Modellverbund

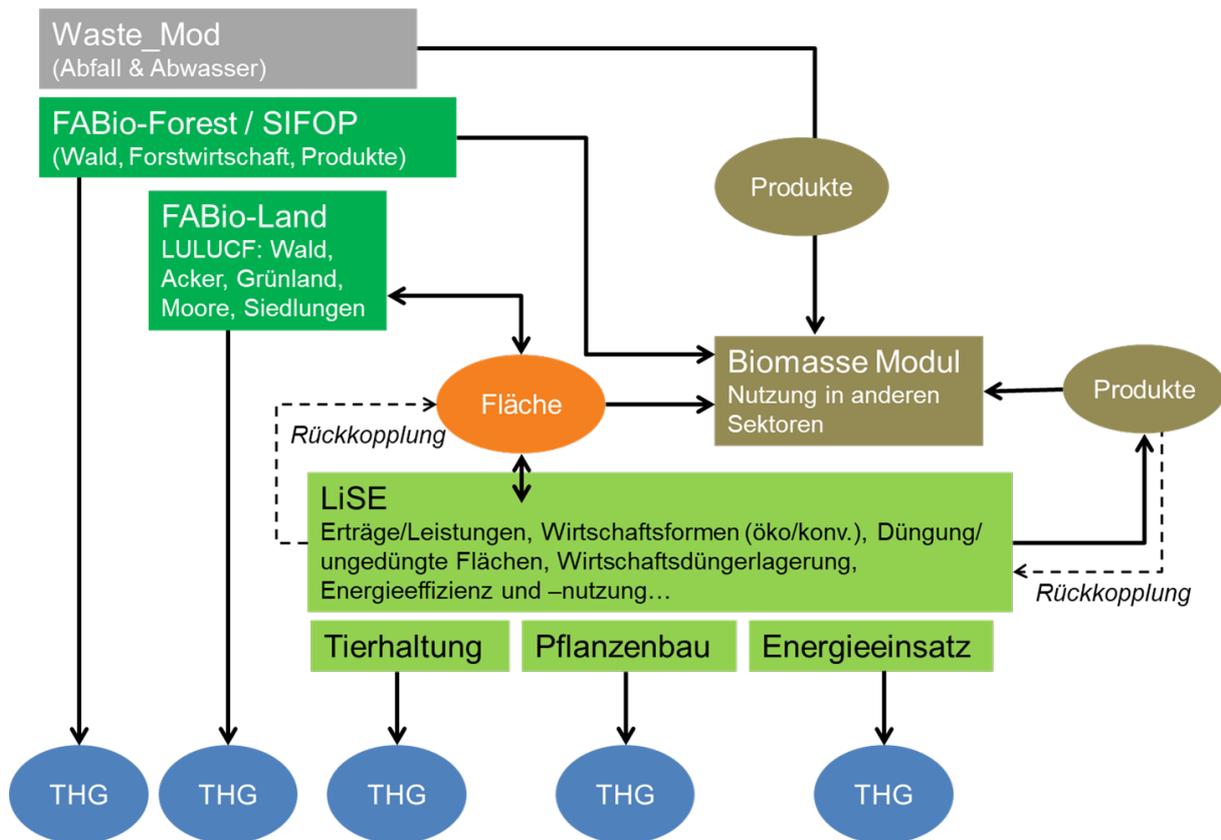
Das Öko-Institut entwickelt seit 2015 den FABio Modellverbund (Forestry and Agriculture Biomass Model). Er besteht aus drei Teilmodellen: FABio-Land, FABio-Forest/ SIFOP<sup>124</sup> und dem Agrarmodell LiSE. Diese Modelle beschreiben mit Hilfe der Methode der Systemdynamik und Szenarienmodellierung die Produktion und Nutzung von Biomasse in der Land- und Forstwirtschaft und deren Auswirkungen auf bestimmte Umweltindikatoren.

Auf Basis der Modellergebnisse aus den Sektoren Landwirtschaft, LULUCF und Abfall werden in einem Biomassemodul in einem ersten Schritt die Mengen an Biomasse ermittelt, die in anderen Sektoren eingesetzt werden können. In einem zweiten Schritt wird die Biomasse auf die anderen Sektoren verteilt (siehe Abbildung 137).

Die Kopplung der einzelnen Modelle erfolgt über Excel-basierte Schnittstellen. Die Übergabegrößen sind dabei Sets an verschiedenen Flächentypen (Flächengrößen) und Produktionsmengen (Produkte).

<sup>124</sup> Im KIS-2030 wird SIFOP eingesetzt. Die Beschreibung von SIFOP findet sich in Abschnitt 12.2.2. Da FABio-Forest im KIS-2030 nicht verwendet wird, wird auf eine Modellbeschreibung an dieser Stelle verzichtet.

Abbildung 137: Modellverbund FABio (Landwirtschaft, Abfall und LULUCF)



Quelle: Öko-Institut

### B.6.2 LiSE

Das Landwirtschaftsmodell **LiSE** (LiSE steht für Livestock, Soil and Energy Emissions) ist ein Excel-basiertes Modell des Öko-Instituts, das die Treibhausgasemissionen aus der Tierhaltung und der Nutzung landwirtschaftlicher Böden in Deutschland sowie die energiebedingten Emissionen<sup>125</sup> aus Land- und Gartenbau kalkuliert. In einem zusätzlichen Modellmodul wird außerdem das Bioenergiepotenzial der Landwirtschaft gemäß den getroffenen Szenario Annahmen hochgerechnet. Dabei werden Reststoffpotenziale (Gülle, Erntereste/Stroh) ebenso wie mögliche Flächennutzungen betrachtet (KUP, annuelle Kulturen als Kosubstrate auf Ackerland, Paludikulturen auf Moorstandorten). Zusätzlich werden in diesem Teilmodul auch die Bioenergiepotenziale der Forstwirtschaft (aus FABio-Forest) und der Abfallwirtschaft (aus Waste\_Mod) zusammengefasst, so dass das gesamte Bioenergiepotenzial aus Reststoffen, Forst- und Anbaubiomasse eines Szenarios zentral für feste und flüssige Bioenergie sowie Biogas ausgewiesen werden kann.

Das Modell LiSE beinhaltet alle relevanten Quellkategorien, Unterquellgruppen und Gase, die nach den IPCC Guidelines zur Berechnung der landwirtschaftlichen Emissionen erforderlich sind. Das Modell setzt auf den Bestands- und Strukturdaten der Nationalen Treibhausgasinventare auf und produziert bottom-up Emissionen für die entsprechenden Quellgruppen. Diese werden auf der Basis folgender Aktivitätsdaten ermittelt:

<sup>125</sup> Diese wurden im Rahmen des Klimaschutzplans in das Sektorziel für die Landwirtschaft einbezogen.

Für die direkten und indirekten Lachgas-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Bodennutzung werden die Düngieranwendung (mineralische, sowie tierische und pflanzliche Wirtschaftsdünger), Erntereste, die Bewirtschaftung organischer Böden, Klärschlammausbringung und Exkremte aus der Weidehaltung berücksichtigt.

Im Bereich der Tierhaltung sind es die Bestandsgrößen der Nutztiere, Milchleistung, N- und VS-Exkretionsrate, Methanbildungsraten für Wirtschaftsdünger, sowie die Güllevergärung.

Die Emissionen aus der Lagerung und Vergärung der Energiepflanzen basieren auf den eingesetzten Energiepflanzenmengen und dem Anwendungsgrad in Bezug auf Abdeckung und Vergärung.

Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Harnstoffanwendung und dem Einsatz von Kalkdüngern erfolgt über die eingesetzten Düngemengen.

Als Eingangsdaten für das Modell stehen externe Annahmen zu Produktionsumfängen, dazu gehören insbesondere Nutztierbestände, verschiedene Landbau- und Tierhaltungsformen und deren Ertragsentwicklungen, Düngemittelanwendungen sowie Bioenergienutzungen und ökologische Vorrangflächen. Diese Größen werden mit Abgleich mit der Fachliteratur und politischen Vorgaben extern vorgegeben oder aus anderen Modellen des Öko-Instituts-internen Modellverbundes zur Landnutzung ermittelt.

Für die Berechnung der Emissionen aus dem Landwirtschaftssektor sind vor allem die Annahmen aus dem LULUCF-Modell FABio-Land in Bezug auf die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche (z. B. Verluste wegen Versiegelung oder Moorwiedervernässung) und die unterschiedlichen Nutzungsformen entscheidend. Die Entwicklung des Grünlandanteils und die Nutzung von organischen Böden haben Einfluss auf die Emissionen, die im Landwirtschaftssektor bilanziert werden. Bezüglich der Flächenentwicklung bzw. Nutzungsänderungen erfolgt daher ein Abgleich mit diesem Modell. Aber auch innerhalb des LiSE-Modells werden Informationen zur Flächenbelegung durch die Landwirtschaft generiert. Dazu gehören die Ausweisung des Futterflächenbedarfs aus der Tierhaltung, differenziert in den Bedarf nach Ackerfutterflächen und Grünland. Ferner können Vorgaben zum Flächenanteil des ökologischen Landbaus gemacht werden sowie zum Anteil ungedüngter Flächen (ökologischer Vorrangflächen, Strukturelemente etc.) und zur Fruchtfolge bzw. Belegung der Ackerflächen und zur Intensität der Grünlandnutzung.

Über die Flächennutzung wird der Stickstoffdüngereinsatz ermittelt. Dazu sind Düngbedarf einzelner Kulturen aus der jeweils aktuellsten Fassung der Düngeverordnung hinterlegt. Wahlweise können auch andere Bedarfswerte übernommen werden. Aus dem Tiermodell wird der anfallende Wirtschaftsdünger auf Basis der Stickstoffexkretion der einzelnen Tierarten ermittelt. Der Stickstoffstrom über Nawaro-Biogasssubstrate wird über externe Vorgaben zur Bioenergie einbezogen. Je nach Stickstoffbedarf und verwendeten Anrechnungsregeln für organische Stickstoffdünger wird der verbleibende Bedarf mit mineralischem Stickstoff gedeckt. Die Emissionsfaktoren für die Wirtschaftsdüngerausbringung können technologiebezogen über den betrachteten Szenario-Zeitraum verändert werden und so sich ändernde gesetzliche Vorgaben einbeziehen. Auf Ebene der Stickstoffflüsse kann die Gesamtbilanz als zentraler Umweltindikator in der Landwirtschaft ausgewiesen werden.

Das Modul zur Nutztierhaltung umfasst alle relevanten Nutztierklassen und deren Methan-, sowie direkte und indirekte Lachgasemissionen. Wichtigste Aktivitätsgröße sind zunächst die Tierbestände selbst. Hier gibt es eine Schnittstelle zu einem einfachen Konsummodell, mit dem Verhaltensänderungen und Selbstversorgungsgrade im Bereich des Milch- und Fleischverzehr quantifiziert und in das Tiermodell zur Bestandsanpassung einfließen können.

Weitere wichtige Kenngrößen charakterisieren die Stallungen (stroh- bzw. güllebasiert, Anbindehaltung oder Freilaufsysteme) und die Wirtschaftsdüngerlagerung. Bei letzterer wird spezifiziert, welcher Anteil anaerob vergoren wird und in welchem Umfang die Gärrestlagerung gasdicht erfolgt. Auch für die nicht vergorenen Wirtschaftsdünger kann der Effekt einer abgedeckten Lagerung ermittelt werden.

Über den gesamten Szenario-Zeitraum können außerdem Leistungsparameter und eine stickstoffoptimierte Fütterung berücksichtigt werden. Der Einfluss der Futtergrundlage und deren Verdaulichkeit für Wiederkäuer, wird dagegen im Modell bisher nicht berücksichtigt. Für die enterische Verdauung und die Emissionen aus Stall und Wirtschaftsdüngerlagerung werden die spezifischen Emissionsfaktoren der einzelnen Tiergruppen fortgeschrieben.

Das Modul für die energiebezogenen Emissionen umfasst die mobile (Binnen- und Außenwirtschaft) und die stationäre Energienutzung. Hier werden für die Szenarien Annahmen zur Effizienz- und Energieeinsparung und der Wechsel auf regenerative Energieträger für die Landwirtschaft kombiniert. Mit Hilfe der im Inventar verwendeten Emissionsfaktoren werden aus dem resultierenden neuen Energiemix die Treibhausgasemissionen ermittelt.

Inputgrößen fließen über Fünf- bis Zehnjahresschritte in das Modell ein, d.h. äußere Einflüsse wie z. B. gesetzliche Auflagen oder Annahmen zu wichtigen Konsum- oder Leistungsentwicklungen werden in größeren Schritten festgelegt und die sich ergebenden Aktivitätsgrößen und Emissionsfaktoren werden für die Zwischenjahre interpoliert, wodurch eine jahresscharfe Ausgabe der Ergebnisse möglich ist.

Überschneidungseffekte und Wechselwirkungen der Emissionsminderungen können maßnahmenspezifisch ausgewiesen werden. Davon ist insbesondere der ganze Bereich der Verringerung der Nährstoffsalden betroffen. Beispielsweise verringert sich der Beitrag der Ausweitung des Ökolandbaus, wenn sich die Stickstoffüberschüsse in der konventionellen Landwirtschaft verringern, das gleiche gilt für die Schaffung ungedüngter Flächen. Der Beitrag der Güllevergärung verliert an Gewicht, wenn die Tierbestände sinken.

### **B.6.3 Abfall**

Das Modell „Waste\_Mod“ ist ein modulares Abfallmodell, welches auf Basis von drei Modulen die Emissionen aus der CRF-Kategorie 5 (nicht-energiebedingte Emissionen des Abfallsektors) abbildet. Die drei Module des Modells bilden die relevanten Quellkategorien der Abfall- und der Abwasserbehandlung ab.

Das erste Modul berechnet die Emissionen aus der Deponierung basierend auf dem vom IPCC entwickelten und vom Öko-Institut erweiterten Multi-Phasen-Abfallmodell (Emissionen der Deponierung, Quellgruppe 5.A) werden die statistischen Daten der aktuellsten Emissionsberichterstattung als Rahmendaten eingesetzt und die Treibhausgasemissionen aus den Deponien berechnet. 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 erfolgten Emissionen. Neben den Altdeponien werden die Emissionen aus der Deponierung von Rückständen aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) im o.g. Modell einbezogen. Zusätzlich können die Minderungswirkungen der Maßnahmen zur Deponiebelüftung berücksichtigt werden.

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 sind die während der Bearbeitung vorliegenden aktuellsten Daten zur Abfallstatistik von DeStatis und aktuelle Studien zur Anlagentechnik auszuwerten. Die Entwicklung des Anlagendurchsatzes erfolgt in Abhängigkeit von umgesetzten oder geplanten Maßnahmen zur getrennten Erfassung und Verwertung von Abfällen im Rahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, wird aber auch beeinflusst von Maßnahmen des Klimaschutzplans zur Reduktion von Lebensmittelabfällen.

Im dritten Modell werden für die Unterquellgruppen kommunale und industrielle Abwasserbehandlung (5.D) und andere (5.E) die einwohnerspezifischen Rahmendaten eingesetzt und die Emissionsfaktoren aus dem aktuellsten Inventarbericht entsprechend der Annahmen zur Entwicklung der Proteinaufnahme und dem Anschlussgrad an die öffentliche Kanalisation fortgeschrieben.

## B.7 PowerFlex

Die Modellierung der Strom- und Wärmeerzeugung wird mit Hilfe des Strommarktmodells PowerFlex des Öko-Instituts vorgenommen.<sup>126</sup> Ausgangsjahr der Modellierung ist 2018.

Das am Öko-Institut entwickelte Strommarktmodell PowerFlex ist ein Fundamentalmodell, welches thermische Kraftwerke, die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die Strom- und Fernwärmenachfragen zu decken. 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. Diese 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. Hier findet die Modellierung auf aggregierter Ebene statt.

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 größere thermische Kraftwerke blockscharf und mit individuellem Wirkungsgrad erfasst. Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen sind in technologie- und baujahrspezifischen Gruppen zusammengefasst und durch typspezifische Parameter charakterisiert. Biogaskraftwerke 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. 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 Mo-

---

<sup>126</sup> Diese Modellbeschreibung ist aus dem Projektionsbericht 2021 übernommen und leicht angepasst, siehe Öko-Institut et al. (2021), S. 71f.

dellierung nicht sinnvoll ist, diese voneinander zu trennen, wird der gesamte Bereich der Kraftwerke gemeinsam modelliert. Die Treibhausgasemissionen und sonstigen Indikatoren werden in einem nachgelagerten Schritt auf die einzelnen Inventarquellgruppen aufgeteilt.

Das Stromdargebot aus den fluktuierenden erneuerbaren Erzeugern Laufwasser, Wind (onshore und offshore) 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. Das Stromdargebot aus Kraftwerken, die als Brennstoff Kuppelgase (Gichtgas, Kokereigas, Raffineriegas), Abfall oder feste bzw. flüssige Biomasse verwenden, ist mit dem Dargebot an Brennstoffen verknüpft.

Die jährliche Stromnachfrage wird PowerFlex 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.

## B.8 TEMPS

Die Modellierung der Maßnahmen im Verkehr erfolgt mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts. Das Modell wurde bereits in bisherigen Projektionsberichten der Bundesregierung eingesetzt und ermöglicht eine Berechnung der zukünftigen Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in Abhängigkeit von politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen.

## Modellierung von Neuzulassungen und Bestand

Kernbestandteil der Modellierungen mit TEMPS ist das Neuzulassungsmodell, welches unter gegebenen Rahmenbedingungen – wie CO<sub>2</sub>-Zielwerten für Neufahrzeuge, Anschaffungspreisen von Fahrzeugen, Energiepreisen, CO<sub>2</sub>-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<sup>127</sup>) 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen) wird aus den Neuzulassungen mittels Überlebenskurven der Fahrzeuge abgeleitet. Die gesamten Treibhausgasemissionen des Bestands ergeben sich infolgedessen aus der zu Grunde gelegten Fahrleistung, dem Fahrzeugbestand, der Energieeffizienz je Antrieb und dem Anteil erneuerbarer Kraftstoffe.

## Verkehrsnachfrage und Preiselastizitäten

Ausgangspunkt für die Annahmen zur Entwicklung der Verkehrsnachfrage ist die Referenzentwicklung der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM). Diese enthält Maßnahmen bis zum Stichtag 30. Juni 2017. Für die Entwicklung der Verkehrsnachfrage im MMS wurde die Wirkung zusätzlicher Maßnahmen berücksichtigt, ebenso wie aktuelle Trends, sodass der aktuelle Politikstand des Projektionsberichts 2021 abgebildet wird. Für das Basisjahr 2018 wurde das Fahrleistungsgerüst aus TREMOD 6.01 zu Grunde gelegt sowie aktuelle Daten zur Verkehrsnachfrage gemäß Verkehr in Zahlen (BMVI 2018). Die Wirkung zusätzlicher Maßnahmen auf die Verkehrsnachfrage wurde überwiegend über Preiselastizitäten hergeleitet.

Für den Personenverkehr wird auf empirisch abgeleitete Werte von Hautzinger et al. (2004) zurückgegriffen. Für den motorisierten Individualverkehr ist darin eine Preiselastizität von -0,3 auf Kraftstoffpreisänderungen sowie eine Kreuzpreiselastizität<sup>128</sup> für den öffentlichen Verkehr von 0,13 angegeben. Im Güterverkehr sind Elastizitäten aus de Jong et al. (2010) entnommen.

Für Änderungen der Transportkosten im Straßengüterverkehr wird dort anhand einer Literaturrecherche ein konsistentes Set an Elastizitäten angegeben und mit -0,6 in Bezug die Verkehrsleistung im Straßengüterverkehrs bestimmt. Die Kreuzelastizität für andere Verkehrsträgeroptionen wird dabei auf 0,3 abgeschätzt

## Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen

Der Endenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen beziehen sich in diesem Papier auf die Berichterstattung gemäß des Zentralen Systems Emissionen (ZSE). Da die Modellierung des Verkehrssektors in dieser Studie auf das Inlandsprinzip zurückgreift, wird eine Kalibrierung auf die Energiebilanz für das Jahr 2018 vorgenommen.

---

<sup>127</sup> Total Cost of Ownership = Gesamtbetriebskosten.

<sup>128</sup> Die Kreuzpreiselastizität gibt an, um wie viel Prozent sich die Nachfrage nach einem Gut (hier: ÖV) erhöht, wenn der Preis für ein anderes Gut (hier: MIV) ansteigt. Eine Kreuzpreiselastizität von 0,13 bedeutet beispielsweise, dass bei einem Anstieg der Pkw-Nutzerkosten um 10 % der öffentliche Verkehr um 1,3 % zunimmt.