

Teil-Abschlussbericht

Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech

**Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Transformation
zu einem vollständig treibhausgasneutralen
Deutschland (CARE)“**

von:

Ralph Harthan, Julia Repenning (beide Projektleitung), Malte Bei der Wieden, Veit Bürger, Sibylle Braungardt, Vanessa Cook, Lukas Emele, Klaus Hennenberg, Wolfram Jörß, Peter Kasten, Sylvie Ludig, Roman Mendelevitch, Lorenz Moosmann, Mirjam Pfeiffer, Margarethe Scheffler, Inia Steinbach, Kirsten Wiegmann

Öko-Institut, Berlin, Freiburg, Darmstadt

Simon Bussmann, Tobias Fleiter, Meta Thurid Lotz, Tim Mandel, Matthias Rehfeldt, Songmin Yu
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 78/2025

KLIFOPLAN des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3720 41 506 0
FB001844

Teil-Abschlussbericht

Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Transformation
zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland
(CARE)“

von

Ralph Harthan, Julia Repenning (beide Projektleitung),
Malte Bei der Wieden, Veit Bürger, Sibylle Braungardt,
Vanessa Cook, Lukas Emele, Klaus Hennenberg, Wolfram
Jörß, Peter Kasten, Sylvie Ludig, Roman Mendelevitch,
Lorenz Moosmann, Mirjam Pfeiffer, Margarethe
Scheffler, Inia Steinbach, Kirsten Wiegmann
Öko-Institut, Berlin, Freiburg, Darmstadt

Simon Bussmann, Tobias Fleiter, Meta Thurid Lotz, Tim
Mandel, Matthias Rehfeldt, Songmin Yu
Fraunhofer ISI, 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
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

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

Abschlussdatum:

September 2025

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie
David Pfeiffer, Karlotta Schultz, Katja Purr, Kai Wehnemann, (Kirsten op de Hipt – Layout)

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7983>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2025

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

Kurzbeschreibung: Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech

In dieser Studie werden zwei Szenarien verglichen, CARESupreme und CARETech. Grundlage ist eine umfassende Dekarbonisierung mit dem Ziel der sicheren Treibhausgasneutralität bis 2045.

In CARESupreme wird angenommen, dass Klima- und Ressourcenschutz in der Wirtschaft und Bevölkerung verinnerlicht sind. Effizienz und Suffizienz spielen eine wichtige Rolle, es handelt sich jedoch nicht um ein reines Suffizienz-Szenario. Es wird Nullwachstum ab 2035 unterstellt.

CARETech hat ein ähnliches Ambitionsniveau wie CARESupreme, setzt dieses jedoch v.a. durch technische Lösungen und weniger Verhaltensänderungen um. Auch steigt das BIP nach 2035 weiter an. CARETech basiert auf CARESupreme, wobei Instrumente in Bezug auf Effizienz und Suffizienz abgesenkt und teilweise gestrichen wurden. Entstehende Zielerreichungslücken wurden v.a. durch Technologiewechsel und zusätzlichen Energiebedarf (z. B. EE, Strom, H₂) gedeckt.

Aufgrund mangelnder Effizienz und Suffizienz ist eine Zielerreichung in CARETech ohne Abscheidung und unterirdische Speicherung von Kohlenstoff (CCS) nicht erreichbar. Deshalb kommen CCS, BECCS (CCS mit Bioenergie), WACCS (CCS an Müllverbrennungsanlagen) und DACCS (CO₂-Abscheidung aus der Luft) zum Einsatz. Obwohl in CARESupreme die Netto-Treibhausgasneutralität inklusive der natürlichen Kohlenstoff-Senke des LULUCF-Sektors erreicht wird, wird für eine sichere und robuste Zielerreichung ebenfalls die Nutzung von WACCS und BECCS zugelassen. Der angestrebte Sicherheitspuffer in CARESupreme und CARETech wurde in gleicher Größenordnung exogen vorgegeben, konkret -15 Mio. t CO₂-Äq.

Beide Szenarien erreichen 2045 Netto-Treibhausgasneutralität. Im Vergleich zu CARESupreme wird in CARETech mehr CO₂ geologisch eingespeichert. Dieses stammt aus biogenbefeuerten Kraftwerken und Heizwerken, CCS im Industriesektor und der Atmosphäre entnommenem CO₂.

Abstract: Ambitious paths for greenhouse gas neutrality in Germany: CARESupreme and CARETech

This study compares two scenarios, CARESupreme and CARETech. Both are based on comprehensive decarbonisation with the aim of securely achieving greenhouse gas neutrality by 2045.

In the CARESupreme scenario, it is assumed that climate and resource protection are internalised in the economy and population. Efficiency and sufficiency play an important role; however, it is not a pure sufficiency scenario. Zero growth is assumed from 2035 onwards.

CARETech has a similar level of ambition to CARESupreme but implements it mainly through technical solutions and less through behavioural changes. GDP also continues to rise after 2035. CARETech is based on CARESupreme, but instruments relating to efficiency and sufficiency have been reduced and, in some cases, eliminated. Any gaps in target achievement were primarily covered by technological changes and an additional need for energy (e.g. RE, electricity, H₂).

Due to a lack of efficiency and sufficiency, it is not possible to achieve the targets in the CARETech scenario without carbon capture and storage (CCS). CCS, bioenergy with carbon capture and storage (BECCS), waste CCS (WACCS) and direct air carbon capture and storage (DACCS) are therefore used. Although net greenhouse gas neutrality that includes the natural carbon sink of the LULUCF sector is achieved in CARESupreme, the use of WACCS and BECCS is also permitted to ensure that the target is securely and robustly met. The targeted safety buffer in CARESupreme and CARETech was set exogenously in the same order of magnitude, specifically -15 million tonnes of CO₂-eq.

Both scenarios achieve net greenhouse gas neutrality in 2045. Larger quantities of CO₂ are stored geologically in CARETech than in CARESupreme. These quantities come from biomass-fired power and heating plants, CCS in the industrial sector and direct air capture.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	14
Tabellenverzeichnis.....	19
Abkürzungsverzeichnis.....	22
Zusammenfassung.....	27
Summary	31
1 Einleitung.....	34
2 Gesamtergebnisse	39
2.1 CARESupreme	39
2.1.1 Treibhausgasemissionen.....	39
2.1.2 Kohlenstoffbilanz	44
2.1.3 Primärenergieverbrauch.....	45
2.1.3.1 Primärenergieverbrauch nach Energieträgern.....	45
2.1.3.2 Verbrauch von Biomassebrennstoffen und Abgleich mit Biomasse-Aufkommen	46
2.1.4 Endenergieverbrauch.....	48
2.1.5 Bruttostromverbrauch	50
2.2 CARETech	51
2.2.1 Treibhausgasemissionen.....	51
2.2.2 Kohlenstoffbilanz	61
2.2.3 Nachfrage nach synthetischen Energieträgern.....	62
2.2.4 Primärenergieverbrauch.....	64
2.2.4.1 Primärenergieverbrauch nach Energieträgern.....	64
2.2.4.2 Verbrauch von Biomassebrennstoffen und Abgleich mit Biomasse-Aufkommen	65
2.2.5 Endenergieverbrauch.....	67
2.2.6 Bruttostromverbrauch	69
3 Energiewirtschaft	70
3.1 CARESupreme	70
3.1.1 Narrativ	70
3.1.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente	71
3.1.3 Zentrale Ergebnisse.....	72
3.2 CARETech	81
3.2.1 Narrativ	81
3.2.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente	82
3.2.3 Zentrale Ergebnisse.....	83

4	Industrie	92
4.1	CARESupreme	92
4.1.1	Narrativ	92
4.1.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	92
4.1.3	Zentrale Ergebnisse.....	96
4.2	CARETech	102
4.2.1	Narrativ	102
4.2.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	102
4.2.3	Zentrale Ergebnisse.....	103
5	Gebäude	112
5.1	CARESupreme	112
5.1.1	Narrativ	112
5.1.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	113
5.1.3	Zentrale Ergebnisse.....	115
5.2	CARETech	121
5.2.1	Narrativ	121
5.2.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	122
5.2.3	Zentrale Ergebnisse.....	123
6	Verkehr	127
6.1	CARESupreme	127
6.1.1	Narrativ	127
6.1.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	127
6.1.3	Zentrale Ergebnisse.....	130
6.2	CARETech	137
6.2.1	Narrativ	137
6.2.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	138
6.2.3	Zentrale Ergebnisse.....	138
7	Landwirtschaft.....	146
7.1	CARESupreme	146
7.1.1	Narrativ	146
7.1.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	146
7.1.3	Zentrale Ergebnisse.....	149
7.1.3.1	Entwicklung der Treibhausgasemissionen.....	149
7.1.3.2	Entwicklung der Flächennutzung.....	151

7.1.3.3	Entwicklung der Nutztierbestände und der Produktion tierischer Produkte	151
7.1.3.4	Entwicklung der Stickstoffeinsätze	154
7.1.3.5	Entwicklung des landwirtschaftlichen Energieverbrauchs	155
7.2	CARETech	155
7.2.1	Narrativ	155
7.2.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	156
7.2.2.1	Instrumente zur Steuerung der Lebensmittelnachfrage	156
7.2.2.2	Instrumente für die Landwirtschaft.....	156
7.2.3	Zentrale Ergebnisse.....	157
7.2.3.1	Entwicklung der Treibhausgasemissionen.....	157
7.2.3.2	Entwicklung der Flächennutzung.....	159
7.2.3.3	Entwicklung der Nutztierbestände und der Produktion tierischer Produkte	160
7.2.3.4	Entwicklung der Stickstoffeinsätze	161
7.2.3.5	Entwicklung des landwirtschaftlichen Energieverbrauchs	162
8	Abfallwirtschaft und Sonstiges	164
8.1	CARESupreme	164
8.1.1	Narrativ	164
8.1.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	164
8.1.3	Zentrale Ergebnisse.....	165
8.2	CARETech	166
8.2.1	Narrativ	166
8.2.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	167
8.2.3	Zentrale Ergebnisse.....	167
9	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft	169
9.1	CARESupreme	169
9.1.1	Narrativ	169
9.1.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	169
9.1.2.1	Instrumente zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen (Quellen).....	169
9.1.2.2	Instrumente zur Förderung der CO ₂ -Einbindung (Senken).....	170
9.1.3	Zentrale Ergebnisse.....	170
9.2	CARETech	177
9.2.1	Narrativ	177
9.2.2	Zentrale Maßnahmen und Instrumente	178
9.2.3	Zentrale Ergebnisse.....	178

Quellenverzeichnis	182
A Anhang: Maßnahmen und Instrumente CARESupreme.....	188
A.1 Einleitung	188
A.2 Sektorübergreifende Maßnahmen und Instrumente	189
A.2.1 Bepreisung von Treibhausgasemissionen.....	189
A.2.2 Reduktion von Lebensmittelabfällen und -verlusten (S/R).....	190
A.2.3 Reduktion der Proteingehalte im Abwasser (S).....	191
A.2.4 Förderung von Agroforstsystemen	191
A.3 Energiewirtschaft	191
A.3.1 Ausstieg aus fossilen Brennstoffen in der Strom- und gekoppelten Fernwärmeerzeugung und Ausbau von Wasserstoffkraftwerken.....	191
A.3.2 Aufbau von Carbon Capture-Anlagen für die Erzeugung von Negativ-Emissionen.....	193
A.3.3 Beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien.....	193
A.3.4 Dekarbonisierung der Fernwärme.....	195
A.3.5 Ausbau der Elektrolyse	196
A.3.6 Umstellung von einem Erdgasnetz auf ein Wasserstoffnetz.....	197
A.3.7 Weitere Maßnahmen der sonstigen Energiewirtschaft	198
A.4 Industrie	198
A.4.1 Eisen und Stahl.....	198
A.4.2 Verarbeitung von Steinen und Erden (hier: Zement)	200
A.4.3 Verarbeitung von Steinen und Erden (hier: Kalk) (R, S)	200
A.4.4 Grundstoffchemie	201
A.4.5 Glas	202
A.4.6 NE-Metalle	202
A.4.7 Papier	203
A.4.8 Allgemeine Prozesswärme.....	203
A.4.9 Reduktion der Prozessemisionen in der Aluminiumproduktion (R)	203
A.4.10 Reduktion der Prozessemisionen in der Zinkproduktion (R).....	204
A.4.11 Verkaufsverbot von Paraffinwachs (R)	204
A.4.12 Verbote und Ersatz von Lösemitteln (R)	204
A.4.13 Anspruchsvolle Verschärfung und Verlängerung des EU-weiten HFKW-Phase-Down (R)	205
A.4.14 Inverkehrbringungsverbote für SF ₆ in elektrischen Schaltanlagen (R)	205
A.4.15 Initiative für die optimierte Entsorgung von SF ₆ aus elektrischen Schaltanlagen (R)....	206

A.4.16	Förderprogramm zum Ersatz persistenter Klimagase in der Halbleiter- und Photovoltaikindustrie (R)	206
A.4.17	Weitere Kategorien.....	206
A.5	Gebäude – Raumwärme und Warmwasser	207
A.5.1	Reform der Steuern, Abgaben, Umlagen bei den Energiepreisen sowie CO ₂ -Bepreisung	207
A.5.2	Gebäudeenergiegesetz (GEG)	207
A.5.3	65 %-Anforderung.....	208
A.5.4	Mindesteffizienzstandards (MEPS)	209
A.5.5	Einsatz von Biomasse	210
A.5.6	Heizungsoptimierung.....	210
A.5.7	Energieeffizienzverpflichtungssystem mit „Weißen Zertifikaten“	210
A.5.8	Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)	211
A.5.9	Wärmepumpen-Offensive	211
A.5.10	Kommunale Wärmeplanung	212
A.5.11	(Teil)Warmmietenmodell.....	212
A.5.12	Gebäudeindividueller Sanierungsfahrplan (iSFP)	212
A.5.13	Serielle Sanierung	213
A.5.14	Reduzierung des Flächenbedarfs (Wohn- und Nutzfläche) (S)	213
A.5.15	Absenkung der Raumtemperatur (S).....	214
A.6	Gebäude – Geräte und Prozesse.....	214
A.6.1	Mindesteffizienzstandards unter der EU Ökodesign-Richtlinie.....	214
A.6.2	Anforderungen an kreislauforientiertes Produktdesign unter der EU Ökodesign-Richtlinie	214
A.6.3	Informationskampagne für Klima- und Ressourcenschutz (S).....	215
A.7	Verkehr – Personenverkehr	215
A.7.1	EU CO ₂ -Flottenzielwerte für Pkw und leichte Neufahrzeuge	215
A.7.2	Anpassung der Kfz-Steuer (Einführung einer Klimaabgabe).....	216
A.7.3	Umweltbonus / Kaufprämie für Pkw	216
A.7.4	Abschaffung der Entfernungspauschale	216
A.7.5	Umgestaltung der Besteuerung von Dienstwagen.....	217
A.7.6	Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut	217
A.7.7	Angebotsausweitung ÖPNV	217
A.7.8	Fortführung des Deutschlandtickets.....	218
A.7.9	Erhöhte Förderung des Radverkehrs	218

A.7.10	Erhöhung der Luftverkehrsteuer	218
A.7.11	Stärkere Implementierung der Parkraumbewirtschaftung	219
A.8	Verkehr – Güterverkehr	219
A.8.1	CO ₂ -Flottenzielwerte für schwere Nutzfahrzeuge	219
A.8.2	Ausweitung und CO ₂ -Spreizung der Lkw-Maut sowie Ausbau der Lkw-Energieinfrastruktur.....	220
A.8.3	Kaufförderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben	220
A.8.4	Ausbau der Förderung effizienter Trailer	221
A.9	Verkehr – Kraftstoffe	221
A.9.1	Abschaffung des Dieselsteuerprivilegs	221
A.9.2	EU-Mindestenergiesteuersatz für Kerosin.....	221
A.9.3	Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) / ETS 2	221
A.9.4	ETS 1 im Flugverkehr.....	222
A.9.5	THG-Quote/Energetische Quoten für erneuerbare Kraftstoffe	222
A.9.6	PtL im Flugverkehr	222
A.10	Verkehr – Übergreifende Maßnahmen und Instrumente	223
A.10.1	Tempolimit.....	223
A.11	Landwirtschaft	223
A.11.1	Ernährungsstrategie zur Umsetzung der Planetary Health Diet [S].....	223
A.11.2	Zukunftsfähiges Tierhaltungs-Gesetz (ZukTierG).....	224
A.11.3	Reduktion der Stickstoffemissionen [R].....	225
A.11.4	Strukturelle Änderungen in der Landwirtschaft und Extensivierung	225
A.11.5	Reduktion der Emissionen durch technische Maßnahmen.....	226
A.11.6	Reduktion der energiebedingten Emissionen [R]	227
A.12	LULUCF	228
A.12.1	Reduzierung des Flächenverbrauchs der Netto-Flächenneuinanspruchnahme	228
A.12.2	Einstellung des Torfabbaus (Moorbodenschutz)	229
A.12.3	Begrenzung und Einstellung der Torfnutzung sowie Nutzung von Torfersatzstoffen (Moorbodenschutz)	229
A.12.4	Vernässung landwirtschaftlich genutzter organische Böden (Ackerland, Grünland; Moorbodenschutz)	230
A.12.5	Optimierung des Wassermanagements bestehender Feuchtgebiete.....	232
A.12.6	Erhalt von Dauergrünland.....	233
A.12.7	Humusaufbau in der Landwirtschaft	233

A.12.8	Waldbewirtschaftung	234
A.12.9	Zunahme langlebiger Holzprodukte	235
A.12.10	Methodische Einordnung von CARESupreme zu den aktuellen Treibhausgas-Projektionen 2025.....	236
A.13	Abfallwirtschaft.....	242
A.13.1	Deponieverordnung.....	242
A.13.2	Kreislaufwirtschaftsgesetz	243
A.13.3	Ausweitung und Beschleunigung der Deponiebelüftung	243
A.13.4	Optimierte Gaserfassung	244
A.13.5	Optimierte Abwasserbehandlung.....	244
B	Anhang: Verursacherbilanz	245

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Brutto-Emissionsminderung in CARESupreme und CARETech, 2025-2045.....	29
Abbildung 2:	Netto-Emissionsminderung in CARESupreme und CARETech, 2025-2045 (inkl. LULUCF und technischer Senkenmaßnahmen)	30
Figure 3:	Gross emission reduction in CARESupreme and CARETech, 2025-2045.....	32
Figure 4:	Net emission reduction in CARESupreme and CARETech, 2025- 2045 (incl. LULUCF and technical sink measures)	33
Abbildung 5:	Erzeugte Treibhausgase in den KSG-Sektoren im Szenario CARESupreme, 2021-2045.....	39
Abbildung 6:	Brutto- und Netto-Emissionsminderung im Szenario CARESupreme 2021-2045.....	41
Abbildung 7:	Kumulierte sektorale Jahresemissionsgesamtmengen und kumulierte Zielerreichung/Zielverfehlung der KSG-Sektoren und gesamt in CARESupreme, 2021-2030.....	44
Abbildung 8:	Kohlenstoffbilanz CARESupreme im Jahr 2045 in Mio. t CO ₂ ...45	
Abbildung 9:	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in CARESupreme, 2021-2045.....	46
Abbildung 10:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern in CARESupreme, 2021-2045.....	49
Abbildung 11:	Bruttostromverbrauch in CARESupreme nach Sektoren, 2021- 2045	50
Abbildung 12:	Erzeugte Treibhausgase in den KSG-Sektoren im Szenario CARETech 2021-2045	52
Abbildung 13:	Brutto- und Netto-Emissionsminderung im Szenario CARETech 2021-2045.....	53
Abbildung 14:	Emissionsminderung in den Szenarien CARESupreme und CARETech mit und ohne Berücksichtigung der Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels im nationalen Verkehr 2021-2045	56
Abbildung 15:	Brutto-Emissionsminderung in CARESupreme und CARETech 2025-2045.....	58
Abbildung 16:	Netto-Emissionsminderung in CARESupreme und CARETech 2025-2045 (inkl. LULUCF und technischer Senken).....	59
Abbildung 17:	Kohlenstoffbilanz CARETech 2045 in Mio. t CO ₂	62
Abbildung 18:	Einsatz von Wasserstoff CARESupreme und CARETech, 2025- 2045	63
Abbildung 19:	Einsatz von synthetischen Flüssigkraftstoffen in CARESupreme und CARETech, 2025-2045	64

Abbildung 20:	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in CARESupreme und CARETech, 2021-2045	65
Abbildung 21:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern in CARESupreme und CARETech, 2021-2045	68
Abbildung 22:	Bruttostromverbrauch nach Endverbrauchern in CARESupreme und CARETech, 2021-2045	69
Abbildung 23:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft, CARESupreme, 2021-2045	72
Abbildung 24:	Entwicklung der installierten Leistung im Szenario CARESupreme, 2025-2045.....	74
Abbildung 25:	Entwicklung der installierten Leistung von Müll-Heizkraftwerken, die mit Carbon Capture ausgestattet sind, CARESupreme, 2035-2045.....	76
Abbildung 26:	Entwicklung der Nettostromerzeugung im Szenario CARESupreme, 2024-2045.....	77
Abbildung 27:	Netzgebundene Netto-Wärmeerzeugung, CARESupreme, 2024-2045	80
Abbildung 28:	Resultierende Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme, CARESupreme, 2021-2045.....	81
Abbildung 29:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft, CARESupreme und CARETech, 2021-2045	83
Abbildung 30:	Vergleich der Nettostromerzeugung und des EE-Anteils am Bruttostromverbrauch zwischen CARESupreme und CARETech, 2025-2045.....	85
Abbildung 31:	Vergleich der Installierten Leistungen zum Jahresende von Photovoltaik, Windenergieanlagen an Land und auf See zwischen CARESupreme und CARETech, 2025-2045.....	86
Abbildung 32:	Vergleich der installierten Leistungen von Kraftwerken, die mit Carbon Capture ausgestattet sind, zwischen CARESupreme und CARETech, 2035-2045	87
Abbildung 33:	Netzgebundene Netto-Wärmeerzeugung im Vergleich zwischen CARESupreme und CARETech, 2025-2045.....	90
Abbildung 34:	Resultierende Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme in CARESupreme und CARETech, 2021-2045	91
Abbildung 35:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie, CARESupreme, 2021-2045.....	96
Abbildung 36:	Endenergiebedarf Industrie in CARESupreme, 2021-2045	98
Abbildung 37:	Direkter Elektrifizierungsgrad der Prozesswärme nach Subsektor, CARESupreme, 2021-2045.....	99
Abbildung 38:	Aktivitätsniveau energieintensiver Subsektoren, CARESupreme, 2021-2045.....	100
Abbildung 39:	Prozesswärmeverbrauch Industrie (Dampf), CARESupreme, 2019-2045	101

Abbildung 40:	Prozesswärmeverbrauch Industrie (Öfen), CARESupreme, 2019-2045	102
Abbildung 41:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie, CARESupreme und CARETech, 2021-2045	103
Abbildung 42:	Endenergieverbrauch Industrie, CARESupreme im Vergleich zu CARETech, 2021-2045	106
Abbildung 43:	Direkter Elektrofizierungsgrad der Prozesswärme nach Subsektor, CARESupreme, 2021-2045.....	107
Abbildung 44:	Direkter Elektrofizierungsgrad der Prozesswärme nach Subsektor, CARETech, 2021-2045	108
Abbildung 45:	Aktivitätsniveau energieintensiver Subsektoren, CARESupreme im Vergleich zu CARETech, 2021-2045	109
Abbildung 46:	Prozesswärmeverbrauch Industrie, Dampf, CARESupreme im Vergleich zu CARETech, 2021-2045	110
Abbildung 47:	Prozesswärmeverbrauch Industrie, Industrieöfen, CARESupreme im Vergleich zu CARETech, 2021-2045	111
Abbildung 48:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude, CARESupreme, 2021-2045.....	116
Abbildung 49:	Entwicklung der installierten primären Wärmeerzeuger in Mio. in Wohn- und Nichtwohngebäuden, CARESupreme, 2022-2045	117
Abbildung 50:	Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser je Energieträger, CARESupreme, 2022-2045.....	118
Abbildung 51:	Flächengewichtete energetische Sanierungsrate, CARESupreme, 2010-2050.....	119
Abbildung 52:	Entwicklung der Effizienzklassenverteilung von Wohngebäuden nach Energieausweis Endenergieverbrauch, CARESupreme, 2020-2045.....	120
Abbildung 53:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse in den Sektoren Haushalte und GHD im Szenario CARESupreme nach Energieträgern, 2021-2045	121
Abbildung 54:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude, CARESupreme und CARETech, 2021-2045	123
Abbildung 55:	Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser je Energieträger in den Szenarien CARESupreme (Sup.) und CARETech, 2022-2045	124
Abbildung 56:	Flächengewichtete energetische Sanierungsrate für Wohn- und Nichtwohngebäude in den Szenarien CARESupreme und CARETech, 2010-2050	125
Abbildung 57:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse in den Sektoren Haushalte und GHD in den Szenarien CARESupreme und CARETech nach Energieträgern, 2021-2045	126

Abbildung 58:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr, CARESupreme 2021-2045.....	131
Abbildung 59:	Pkw-Bestand nach Antriebstypen, CARESupreme, 2021-2045	132
Abbildung 60:	Antriebsverteilung der Neuzulassungen bei Pkw, CARESupreme, 2021-2045.....	133
Abbildung 61:	Antriebsverteilung der Neuzulassungen bei Lkw > 12 Tonnen zGG, CARESupreme, 2021-2045	134
Abbildung 62:	Personenverkehrsleistung, CARESupreme, 2021-2045.....	135
Abbildung 63:	Güterverkehrsleistung (nationale Verkehre), CARESupreme, 2021-2045.....	136
Abbildung 64:	Endenergiebedarf im Sektor Verkehr, CARESupreme, 2021- 2045	137
Abbildung 65:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr, CARESupreme und CARETech, 2021-2045	139
Abbildung 66:	Pkw-Bestand nach Antriebstypen, CARESupreme und CARETech, 2021-2045	140
Abbildung 67:	Antriebsverteilung der Neuzulassungen bei Pkw, CARESupreme und CARETech, 2021-2035	141
Abbildung 68:	Antriebsverteilung der Neuzulassungen bei Lkw > 12 Tonnen zGG, CARESupreme und CARETech, 2021-2045.....	142
Abbildung 69:	Personenverkehrsleistung, CARESupreme und CARETech, 2021- 2045	143
Abbildung 70:	Güterverkehrsleistung (nationale Verkehre), CARESupreme und CARETech, 2021-2045	144
Abbildung 71:	Endenergiebedarf im Sektor Verkehr, CARESupreme und CARETech, 2021-2045	145
Abbildung 72:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft, CARESupreme, 2021-2045.....	150
Abbildung 73:	Entwicklung der Tierbestände gegenüber dem Jahr 2005, 1990- 2045	152
Abbildung 74:	Entwicklung der Stickstoffausbringung, CARESupreme, 2021- 2045	154
Abbildung 75:	Entwicklung des landwirtschaftlichen Energieverbrauchs in CARESupreme, 2021-2045.....	155
Abbildung 76:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft, CARESupreme und CARETech, 2021-2045 ...	158
Abbildung 77:	Entwicklung der Tierbestände Landwirtschaft, CARESupreme und CARETech, 2021-2045	160
Abbildung 78:	Entwicklung der Stickstoffeinsätze, CARESupreme und CARETech, 2021-2045	162
Abbildung 79:	Entwicklung des Energieverbrauchs in der Landwirtschaft, CARESupreme und CARETech, 2021-2045	163

Abbildung 80:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, CARESupreme, 2021-2045 ...	165
Abbildung 81:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, CARESupreme und CARETech, 2021-2045.....	167
Abbildung 82:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Aufnahme durch Senken im Sektor LULUCF, CARESupreme, 2021-2045	172
Abbildung 83:	Entwicklung der Flächenkulisse im LULUCF-Sektor, CARESupreme, 2021 bis 2045	173
Abbildung 84:	Sensitivitätsanalyse zur Treibhausgasbilanz der Waldfläche für geringe, mittlere und starke natürliche Störungen, CARESupreme, 1990 bis 2045	176
Abbildung 85:	Zusätzlicher Zufluss und mittlerer Zufluss der Jahre 2012-2021 an langlebigen Holzprodukten in den Holzproduktspeicher, CARESupreme, 2025 bis 2045	177
Abbildung 86:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Aufnahme durch Senken im Sektor LULUCF, CARESupreme und CARETech, 2021-2045.....	180
Abbildung 87:	Installierte Leistung der Kohlekraftwerke	192
Abbildung 88:	Anteil der wiedervernässten landwirtschaftlichen Fläche auf organischen Böden im Zeitverlauf, CARESupreme, 2020-2050	232
Abbildung 89:	Veränderung der Treibhausgasbilanz im LULUCF-Sektor zwischen den Berichtsjahren 2024 und 2025.....	237
Abbildung 90:	Analyse von CARESupreme zu den Treibhausgas-Projektionen 2025 für das Jahr 2030	240
Abbildung 91:	Analyse von CARESupreme zu den Treibhausgas-Projektionen 2025 für das Jahr 2045	241
Abbildung 92:	Veranschaulichung der Verursacherbilanz für das Jahr 2030 in CARESupreme	246
Abbildung 93:	Emissionen der Energiewirtschaft nach bereitgestelltem Energieträger in CARESupreme, 2021-2045	247
Abbildung 94:	Verursacherbilanz je Sektor im Szenario CARESupreme, 2021- 2045	248
Abbildung 95:	Emissionen der Energiewirtschaft nach bereitgestelltem Energieträger in CARESupreme und CARETech, 2021-2045 ..	250
Abbildung 96:	Verursacherbilanz je Sektor in CARESupreme und CARETech, 2021-2045.....	251

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Treibhausgasemissionen und abgeschiedenes CO ₂ im Szenario CARESupreme nach Sektoren in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045.....	42
Tabelle 2:	Verbrauch an Biomassebrennstoffen und Holz für stoffliche Holzprodukte in CARESupreme in TWh, 2030 und 2045.....	46
Tabelle 3:	Aufkommen an Biomassebrennstoffen in CARESupreme in TWh, 2030 und 2045	48
Tabelle 4:	Endenergieverbrauch nach Endverbrauchsektoren in CARESupreme, 2021-2045.....	49
Tabelle 5:	Bruttostromverbrauch in CARESupreme in TWh, 2008-2045 ..	50
Tabelle 6:	Treibhausgasemissionen im Szenario CARETech nach Sektoren in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	54
Tabelle 7:	Vergleich der Treibhausgasemissionen entsprechend unterschiedlichen Bilanzierungen von E-fuels in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	56
Tabelle 8:	Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff in den Szenarien CARESupreme und CARETech in ausgewählten Jahren zwischen 2030 und 2045	60
Tabelle 9:	Kumulierte Netto-Emissionen bzw. Entnahmen 2021-2030 sowie 2021-2045, CARESupreme und CARETech	61
Tabelle 10:	Verbrauch an Biomassebrennstoffen in CARETech in TWh, 2030 und 2045.....	65
Tabelle 11:	Aufkommen an Biomassebrennstoffen in CARETech in TWh, 2030 und 2045	67
Tabelle 12:	Endenergieverbrauch nach Sektoren in CARETech, 2021-2045	68
Tabelle 13:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	72
Tabelle 14:	Entwicklung der installierten Leistung im Szenario CARESupreme in GW, 2025-2045.....	74
Tabelle 15:	Entwicklung der Nettostromerzeugung im Szenario CARESupreme, 2025-2045.....	77
Tabelle 16:	Flexibilitäten: Installierte Leistung der Elektrolyseure, Vollaststunden, Wasserstoffproduktion (für Endverbrauchersektoren und Rückverstromung), Kapazität der Wasserstoffspeicher, sowie Kapazität, Stromerzeugung und Vollaststunden von Wasserstoffkraftwerken nebst Kapazitäten und Stromerzeugung aus Speichern und DSM, Szenario CARESupreme, 2025-2045.....	78
Tabelle 17:	Residualer Flexibilitätsbedarf	79

Tabelle 18:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft, CARETech, 2021-2045	83
Tabelle 19:	CO ₂ -Abscheidung aus Direct Air Capture sowie zusätzlicher Strombedarf, CARETech, 2035-2045	88
Tabelle 20:	Flexibilitäten: Installierte Leistung der Elektrolyseure, Volllaststunden, Wasserstoffproduktion (für Endverbrauchersektoren und Rückverstromung), Kapazität der Wasserstoffspeicher, sowie Kapazität, Stromerzeugung und Volllaststunden von Wasserstoffkraftwerken nebst Kapazitäten und Stromerzeugung aus Speichern und DSM, CARESupreme und CARETech, 2025-2045	88
Tabelle 21:	Residualer Flexibilitätsbedarf im Szenario CARETech, 2025-2045	89
Tabelle 22:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	96
Tabelle 23:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	104
Tabelle 24:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	116
Tabelle 25:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	123
Tabelle 26:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	131
Tabelle 27:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	139
Tabelle 28:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	150
Tabelle 29:	Entwicklung der Flächennutzung in CARESupreme, 2020-2045	151
Tabelle 30:	Entwicklung der Tierproduktion in Deutschland in CARESupreme, 2020-2045.....	153
Tabelle 31:	Entwicklung der Selbstversorgungsgrade in Deutschland für verschiedene Ernährungsweisen in CARESupreme, 2020-2045	153

Tabelle 32:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	159
Tabelle 33:	Entwicklung der Flächennutzung im CARETech, 2020-2045 ..	159
Tabelle 34:	Entwicklung der Produktion tierischer Produkte in Deutschland in CARETech, 2020-2045.....	161
Tabelle 35:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	166
Tabelle 36:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045	168
Tabelle 37:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Aufnahme durch Senken im Sektor LULUCF in ausgewählten Jahren, CARESupreme, 2021 bis 2045	172
Tabelle 38:	Entwicklung der Flächenkulisse im LULUCF-Sektor in ausgewählten Jahren, CARESupreme, 2021 bis 2045	173
Tabelle 39:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Aufnahme durch Senken im Sektor LULUCF in ausgewählten Jahren, CARETech, 2021 bis 2045	180
Tabelle 40:	Entwicklung der Flächenkulisse im LULUCF-Sektor in ausgewählten Jahren, CARETech, 2021 bis 2045	181
Tabelle 41:	CO ₂ -Bepreisung (EU-ETS sowie BEHG).....	189
Tabelle 42:	Installierte Leistungen (Jahresmitte und Jahresende) der erneuerbaren Energien im CARESupreme-Szenario	194
Tabelle 43:	Leistung von EE-Fernwärme im Szenario CARESupreme	196
Tabelle 44:	Weitere Kategorien im Sektor Industrieprozesse und Produktverwendung	207
Tabelle 45:	Anforderungsdynamik bei den MEPS.....	209
Tabelle 46:	Kfz-Steuer im 1.Jahr in € je g CO ₂ /km (WLTP)	216
Tabelle 47:	Zielwerte für Umwandlung von Ackerland zu Grünland und zur Bodenvernässung, CARESupreme, 2030-2050.....	232
Tabelle 48:	Zusätzlicher Zufluss an Holzprodukten (Mio. m ³), CARESupreme, 2030-2045.....	236
Tabelle 49:	Analyse von CARESupreme zu den Treibhausgas-Projektionen 2025 für die Jahre 2025, 2030, 2035, 2040 und 2045.....	241
Tabelle 50:	Treibhausgasemissionen nach Verursacherbilanz im Szenario CARESupreme, in Mio. t CO ₂ -Äq., 2021-2045.....	248
Tabelle 51:	Treibhausgasemissionen nach Verursacherbilanz im Szenario CARETech, in Mio. t CO ₂ -Äq., 2021-2045	251

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ANK	Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz
BAU	Business as usual (Szenario)
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BEG	Bundesförderung effiziente Gebäude
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BEV	Battery electric vehicle
BEW	Bundesförderung effiziente Wärmenetze
BIM	Building-Information-Modelling
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
Building STar	Building Stock Transformation Model
BWI	Bundeswaldinventur
CAPEX	Investitionsausgaben (capital expenditure)
CARE	Climate protection
CBAM	Carbon border adjustment mechanism
CC	Carbon Capture
CCS	Carbon Capture and Storage
CH₄	Methan
CI	Kohlenstoffinventur
CNG	Compressed natural gas
COP	Coefficient of Performance
CRF	Common Reporting Format
DACC	Direct Air Capture
DACCS	Direct air Capture and Storage
DDOCm	Abbaubarer organischer Kohlenstoff, massebezogen
DRI	Direktreduktion (direct reduced iron)
DSM	Demand side management
DüV	Düngeverordnung
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz

Abkürzung	Erläuterung
EEOS	Energy Efficiency Obligation System
EEV	Endenergieverbrauch
EFRE	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
EH	Effizienzhaus
el	Elektrisch
ELER	Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EnSimMaV	Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über mittelfristig wirksame Maßnahmen
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ENUSEM	Energie-Umwandlungs-Sektor-Modell
EPBD	European Performance of Buildings Directive (Europäische Gebäude-Richtlinie)
EU ETS	European Union Emissions Trading System
FCEV	Fuel cell electric vehicle
FEP	Flächenentwicklungsplan
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
FM	Frischmasse
FORECAST	FORecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool
Fraunhofer ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
GAK	Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GDP	Gross domestic product
GEG	Gebäudeenergiegesetz
ggü.	Gegenüber
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
gS	Geringe Schäden
GV(E)	Großvieheinheit
GW	Gigawatt
GWP	Global Warming Potential
h	Stunden
H₂	Wasserstoff
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HFKW	Teihalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik

Abkürzung	Erläuterung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPCEI	Important Project of Common European Interest
iSFP	Gebäudeindividueller Sanierungsfahrplan
JE	Jahresende
JM	Jahresmitte
KIS-2030	Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KSPr	Klimaschutzprogramm
kt	Kilotonne
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LaWiEnMod	Landwirtschaftliches Energie Modell
LF	Landfläche
LiSE	Livestock and Soil Emissions
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LPG	Liquefied petroleum gas
LuftVSt	Luftverkehrsteuer
LULUCF	Land use, land-use change and forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlung
MEPS	Minimum Energy Performance Standards
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
mS	Mittlere Schäden
Mt	Megatonne
MtO	Methanol-to-Olefines-Route
MW	Mittelwert
MWMS	Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario
N	Stickstoff
NE	Nichteisen
NEP	Netzentwicklungsplan
NF₃	Stickstofftrifluorid
NKI	Nationale Klimaschutzinitiative
NMVOC	Non-methane volatile organic compounds

Abkürzung	Erläuterung
N₂O	Lachgas
NWG	Nicht-Wohngebäude
O-Lkw	Oberleitungs-Lastkraftwagen
OMS	Ohne-Maßnahmen-Szenario
OPEX	Betriebskosten (operational expenditure)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PEV	Primärenergieverbrauch
PHD	Planetary Health Diet
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
PJ	Petajoule
Pkm	Personenkilometer
ProFI	Projektionsmodell für F-Gas-Emissions-Inventare
PSW	Pumpspeicherkraftwerk
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PV	Photovoltaik
R	Ressourcenverbrauch
RE	Renewable energy
S	Suffizienz, CARESupreme
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SF₆	Schwefelhexafluorid
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SPr	Sofortprogramm
sS	Starke Schäden
Sup	CARESupreme
T	CARETech
TASI	Technische Anleitung Siedlungsabfall
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtkosten des Betriebs)
Tech	CARETech
TEMPS	Transport Emissions and Policy Scenarios
THG	Treibhausgase

Abkürzung	Erläuterung
tkm	Tonnenkilometer
TWh	Terawattstunde
TYNDP	Ten Year Network Development Plan
UBA	Umweltbundesamt
WACCS	Waste Carbon Capture and Storage
WindSeeG	Windenergie-auf-See-Gesetz
WP	Wärmepumpe
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Zusammenfassung

In dieser Studie werden die Ergebnisse zweier CARE¹-Szenarien dargestellt und miteinander verglichen:

- ▶ CARESupreme
- ▶ CARETech.

Die Szenarien sind instrumentenbasiert und decken alle Sektoren einschließlich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) ab. Für die Modellierung wurde noch die Submission 2024 verwendet.²

Der Grundgedanke (Narrativ) von CARESupreme entspricht dem Szenario GreenSupreme der 2019 fertiggestellten RESCUE-Studie (Purr et al. 2019). Dabei wird angenommen, dass Klima- und Ressourcenschutz in der Wirtschaft und Bevölkerung verinnerlicht sind. Effizienz und Suffizienz sind Teil des alltäglichen Handelns. Die konkreten Annahmen für die Ausgestaltung des Szenarios wurden auf Basis von Erkenntnissen und Entwicklungen aktualisiert, die zum Zeitpunkt der Abstimmung der Szenarioparametrisierung vorlagen. In CARESupreme spielt Suffizienz eine wichtige Rolle, es handelt sich jedoch nicht um ein reines Suffizienz-Szenario. Als wesentliche Annahme wird ein gesamtwirtschaftliches Nullwachstum ab dem Jahr 2035³ unterstellt.

Das zweite Szenario, CARETech, weist das gleiche Ambitionsniveau wie CARESupreme auf. Die Instrumentierung von CARETech basiert auf CARESupreme, wobei Instrumente in Bezug auf Effizienz und Suffizienz auf das Niveau des Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenarios (MWMS) der Treibhausgas-Projektionen 2024 abgesenkt bzw. z.T. gestrichen wurden. Die aufgrund geringerer Effizienz und Suffizienz entstehenden Zielerreichungslücken in CARETech wurden überwiegend durch Technologiewechsel und zusätzlichen Energiebedarf (z. B. EE, Strom, H₂) gedeckt.

CARETech beantwortet damit die Frage nach einem möglichen (bezüglich der Treibhausgasemissionen) äquivalenten Pfad, falls Suffizienz und Kreislaufwirtschaft nicht die in CARESupreme angenommenen Beiträge erbringen können.

Im Szenario CARESupreme wird ausschließlich mit der natürlichen Kohlenstoffsenke (LULUCF) Netto-Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 erreicht. Die erzeugten Treibhausgase werden auf 48 Mio. t CO₂-Äq. gesenkt und entsprechen beinahe genau den Brutto-Emissionen. Aufgrund der Beschlusslage durch §3b im Bundes-Klimaschutzgesetz aus dem Jahr 2024 und sich abzeichnender Unsicherheiten bei der Realisierung der Waldsenke (Hennenberg et al. 2024b) wurde in CARESupreme die Nutzung von WACCS und BECCS zugelassen, um eine sichere und robuste Zielerreichung im Transformationspfad aufzuzeigen. **Mit zusätzlichen Negativemissionen (BECCS) und dem verringerten Ausstoß in die Atmosphäre (WACCS) ergeben sich in CARESupreme Netto-Negativemissionen im Jahr 2045 von rund -15 Mio. t CO₂-Äq.** Für die Modellierung wurde noch die Submission 2024

¹ Climate protection.

² Die Submission im LULUCF-Sektor umfasst die jährliche Meldung von Treibhausgasemissionen und -senken aus Landnutzung und Forstwirtschaft an internationale Stellen wie die UNFCCC und unterliegt ständigen Anpassungen durch methodische Weiterentwicklungen und verbesserte Datengrundlagen. Die Submission 2024 beinhaltet noch nicht die Änderungen bei den Emissionen aus Humusverlusten in mineralischen Ackerböden (seit Submission 2025) in Höhe von ca. 7 Mio. t CO₂-Äq.

³ In Purr et al. (2019) war dies noch 2030. Vor dem Hintergrund des Zeitfortschritts und der maximal denkbaren Transformationsgeschwindigkeit wurde dies angepasst.

verwendet. Unter Nutzung der neusten Submission (2025) ist dieser Puffer teilweise bereits durch methodische Anpassungen in den Treibhausgas-Inventaren aufgebraucht.

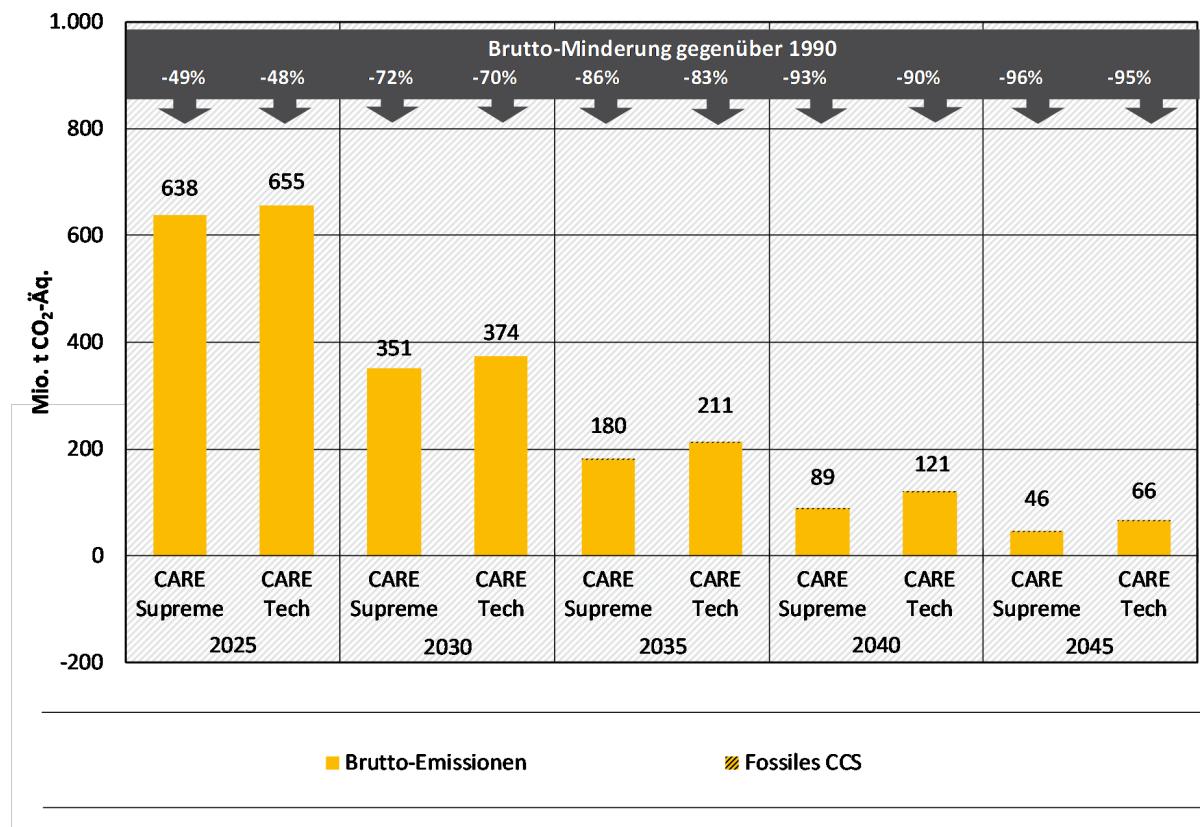
Aufgrund mangelnder Effizienz und Suffizienz ist eine Zielerreichung im Jahr 2045 in CARETech ohne Abscheidung und unterirdische Speicherung von Kohlenstoff (CCS) nicht erreichbar. Aus diesem Grund kommen CCS, BECCS (CCS mit Bioenergie), WACCS (CCS an Müllverbrennungsanlagen) und DACCS (CO₂-Abscheidung aus der Luft mit unterirdischer Speicherung) zum Einsatz. Unter Berücksichtigung von fossilem CCS in der Industrie und Energiewirtschaft werden Brutto-Emissionen von rund 66 Mio. t CO₂-Äq. in CARETech im Jahr 2045 noch ausgestoßen. Nach Ausgleich durch die natürlichen Kohlenstoffsenken verbleiben rund 41 Mio. t CO₂-Äq., die durch technische Maßnahmen zusätzlich ausgeglichen werden müssen, um mindestens Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. In beiden Szenarien wird im Sinne der Robustheit und der Unsicherheiten ein Sicherheitspuffer in der Größenordnung von rund -15 Mio. t CO₂-Äq. über Netto-Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 angestrebt. Unter Nutzung der neusten Submission (2025) ist dieser Puffer teilweise bereits durch methodische Anpassungen in den Treibhausgas-Inventaren aufgebraucht. **In Kombination mit der geringeren Veränderungsambition erfordert dies in CARETech einen um Faktor 10 höheren Bedarf an technischen Senken im Vergleich zu CARESupreme, um ähnlich robuste und sichere Treibhausgasneutralität zu ermöglichen.**

Grundlegende Rahmendaten (Bevölkerung, Brennstoff- und CO₂-Preise) wurden in CARETech und CARESupreme gleich unterstellt, um Vergleichbarkeit sicherzustellen. Diese entsprechen denen der Projektionen 2024 (Harthan et al. 2024) mit geringfügigen Anpassungen⁴.

Abbildung 1 und Abbildung 2 stellen die Entwicklung der Treibhausgasemissionen von 2025 bis 2045 der Szenarien CARESupreme und CARETech dar. Beide erreichen Netto-Treibhausgasneutralität im Jahr 2045. Im Vergleich zum Szenario CARESupreme werden in CARETech größere Mengen an CO₂ geologisch eingespeichert. Diese stammen aus biogenbefeuerten Kraftwerken und Heizwerken (BECCS), CCS im Industriesektor und der Atmosphäre entnommenem CO₂ (DACCS).

⁴ Beispielsweise beim ETS-Preis.

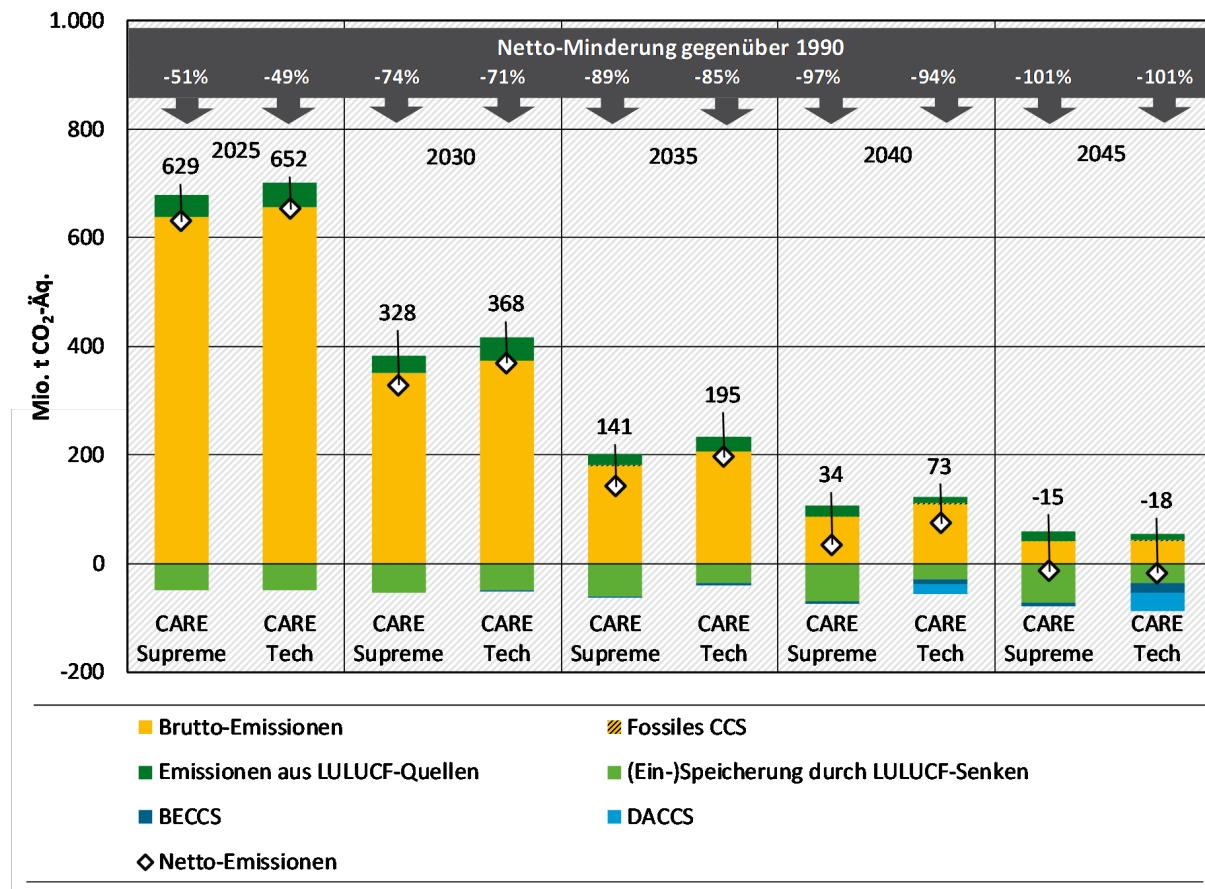
Abbildung 1: Brutto-Emissionsminderung in CARESupreme und CARETech, 2025-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Unter Verwendung der Submission 2024. Die Brutto-Emissionen ergeben sich aus den erzeugten Treibhausgasen abzüglich der abgeschiedenen und gespeicherten Treibhausgase aus fossilem CCS, die als Nullemissionen gelten (der Wert der erzeugten Treibhausgase beinhaltet alle Emissionen (exklusive des LULUCF-Sektors) ohne Kohlenstoffabscheidung). Die Brutto-Emissionen entsprechen der Kategorie, die zwar fossile Kohlenstoffabscheidung (Nullemissionen), aber noch keine technischen oder natürlichen Senken (Negativemissionen) anrechnet. Sie entsprechen den jährlichen, prozentualen Minderungszielen aus §3 Abs. 1 und Anlage 3 des KSG.

Abbildung 2: Netto-Emissionsminderung in CARESupreme und CARETech, 2025-2045 (inkl. LULUCF und technischer Senkenmaßnahmen)



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Unter Verwendung der Submission 2024. Die Netto-Emissionen beinhalten die Brutto-Emissionen und zusätzlich alle Negativemissionen, die sich aus technischen Entnahmen und dem LULUCF-Sektor ergeben. Sie sind maßgeblich für die Netto-Ziele in §3 Abs. 2 (Netto-Treibhausgasneutralität, negative Treibhausgasemissionen). Die prozentuale Netto-Minderung berechnet sich gegenüber den Brutto-Emissionen im Jahr 1990.

Summary

This study presents and compares the results of two CARE⁵ scenarios:

- ▶ CARESupreme
- ▶ CARETech.

The scenarios are instrument-based and cover all sectors including land use, land use change and forestry (LULUCF). The modelling was based on the submission from 2024.⁶

The basic idea of the CARESupreme scenario corresponds to the GreenSupreme scenario of the RESCUE study completed in 2019 (Purr et al. 2019). It assumes that climate and resource protection are internalised in the economy and population. Efficiency and sufficiency are part of everyday behaviour. The specific assumptions for the design of the scenario were updated based on findings and developments that were available at the time that the scenario parameters were determined. Sufficiency plays an important role in CARESupreme, but it is not a pure sufficiency scenario. One key assumption is zero economic growth overall from 2035⁷.

The second scenario, CARETech, has the same level of ambition as CARESupreme. The instruments used in CARETech are based on CARESupreme; however, instruments relating to efficiency and sufficiency were lowered to the level of the ‘with additional measures’ scenario (MWMS) of the 2024 Projection Report or, in some cases, eliminated. The gaps to achieving the targets in CARETech that result from lower efficiency and sufficiency were mainly covered by technological changes and additional energy requirements (e.g. RE, electricity, H₂).

CARETech thus answers the question of a possible equivalent pathway (in terms of greenhouse gas emissions) if sufficiency and the circular economy cannot make the contributions to emission abatement assumed in CARESupreme.

In the CARESupreme scenario, net greenhouse gas neutrality is achieved in 2045 using only the natural carbon sink (LULUCF). The greenhouse gases produced are reduced to 48 million t CO₂-eq and correspond almost exactly to the gross emissions. Due to Section 3b of the German Federal Climate Change Act of 2024 and emerging uncertainties about realising the forest sink (Hennenberg et al. 2024b), the use of WACCS and BECCS was permitted in CARESupreme in order to ensure that the targets are securely and robustly met. **With additional negative emissions (BECCS) and the reduced emissions into the atmosphere (WACCS), CARESupreme results in net negative emissions in 2045 of around -15 million t CO₂-eq.** The 2024 Submission was used for the modelling. Using the latest submission (2025), this safety buffer has already been partially used up due to methodological adjustments in the greenhouse gas inventories.

Due to a lack of efficiency and sufficiency, it is not possible to achieve the 2045 target in CARETech without carbon capture and storage (CCS). For this reason, CCS, bioenergy with carbon capture and storage (BECCS), waste CCS (WACCS) and direct air carbon capture and storage (DACCs) are used. Taking into account fossil CCS in industry and the energy sector, gross

⁵ Climate protection.

⁶ The submission in the LULUCF sector comprises the annual reporting of greenhouse gas emissions and sinks from land use and forestry to international bodies such as the UNFCCC and is subject to constant adjustments due to methodological developments and improved data bases. The 2024 Submission does not yet include the changes in emissions from humus losses in mineral arable land (since the 2025 Submission), which amount to approx. 7 million t CO₂-eq.

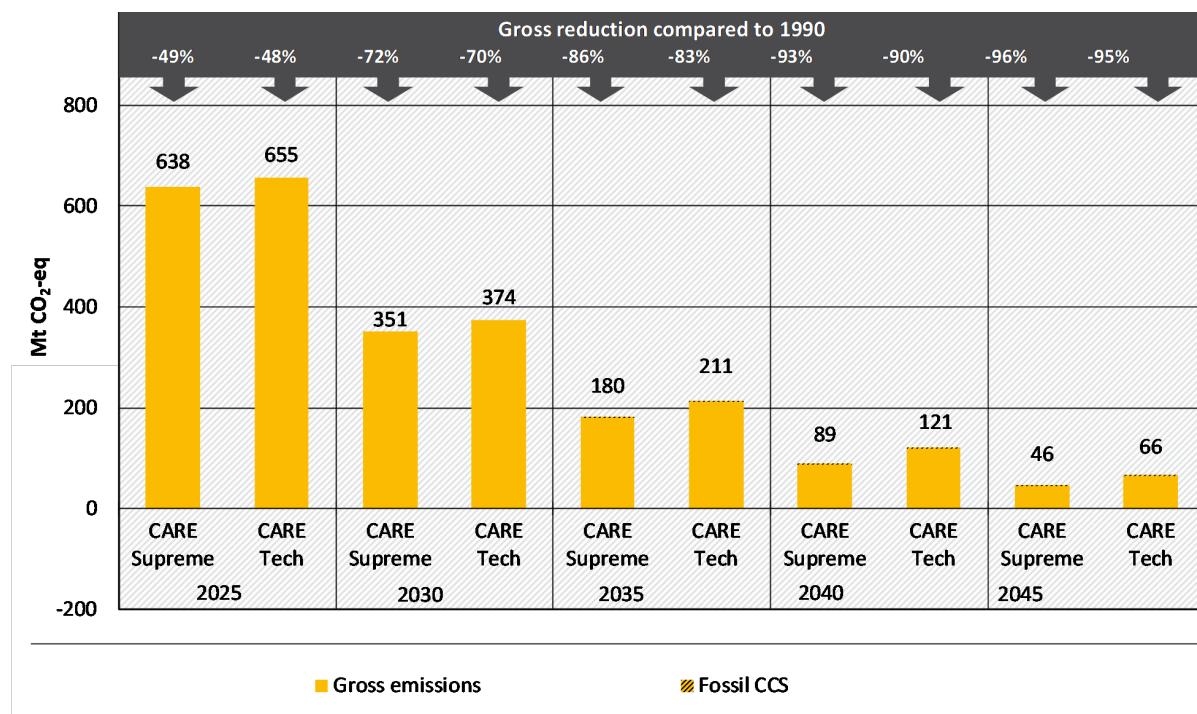
⁷ In Purr et al. (2019), it was still assumed that zero economic growth overall occurs from 2030. This has been adjusted in light of the passage of time and the maximum conceivable speed of transformation.

emissions of around 66 million tons of CO₂-eq are still emitted in CARETech in 2045. After subtracting the natural carbon sinks, around 41 million t CO₂-eq remain, which must be additionally balanced by technical measures in order to achieve at least net greenhouse gas neutrality. With a view to robustness and uncertainty, a safety buffer of around -15 million t CO₂-eq above net greenhouse gas neutrality in 2045 is targeted in both scenarios. Using the latest Submission (2025), this buffer has already been partially used up by methodological adjustments in the greenhouse gas inventories. **In combination with the lower ambition for change, this requires a higher demand for technical sinks in CARETech by a factor of 10 compared to CARESupreme to enable achievement of greenhouse gas neutrality with similar robustness and security.**

The same basic framework data (population, fuel and carbon prices) was used in CARETech and CARESupreme to ensure comparability. This data corresponds to that of the 2024 Projection Report (Harthan et al. 2024) with minor adjustments⁸.

Figure 3 and Figure 4 show the development of greenhouse gas emissions from 2025 to 2045 in the CARESupreme and CARETech scenarios. Both achieve net greenhouse gas neutrality in 2045. Larger quantities of CO₂ are stored geologically in CARETech than in CARESupreme. These quantities come from biomass-fired power and heating plants (BECCS), CCS in the industrial sector and direct air capture (DACCs).

Figure 3: Gross emission reduction in CARESupreme and CARETech, 2025-2045



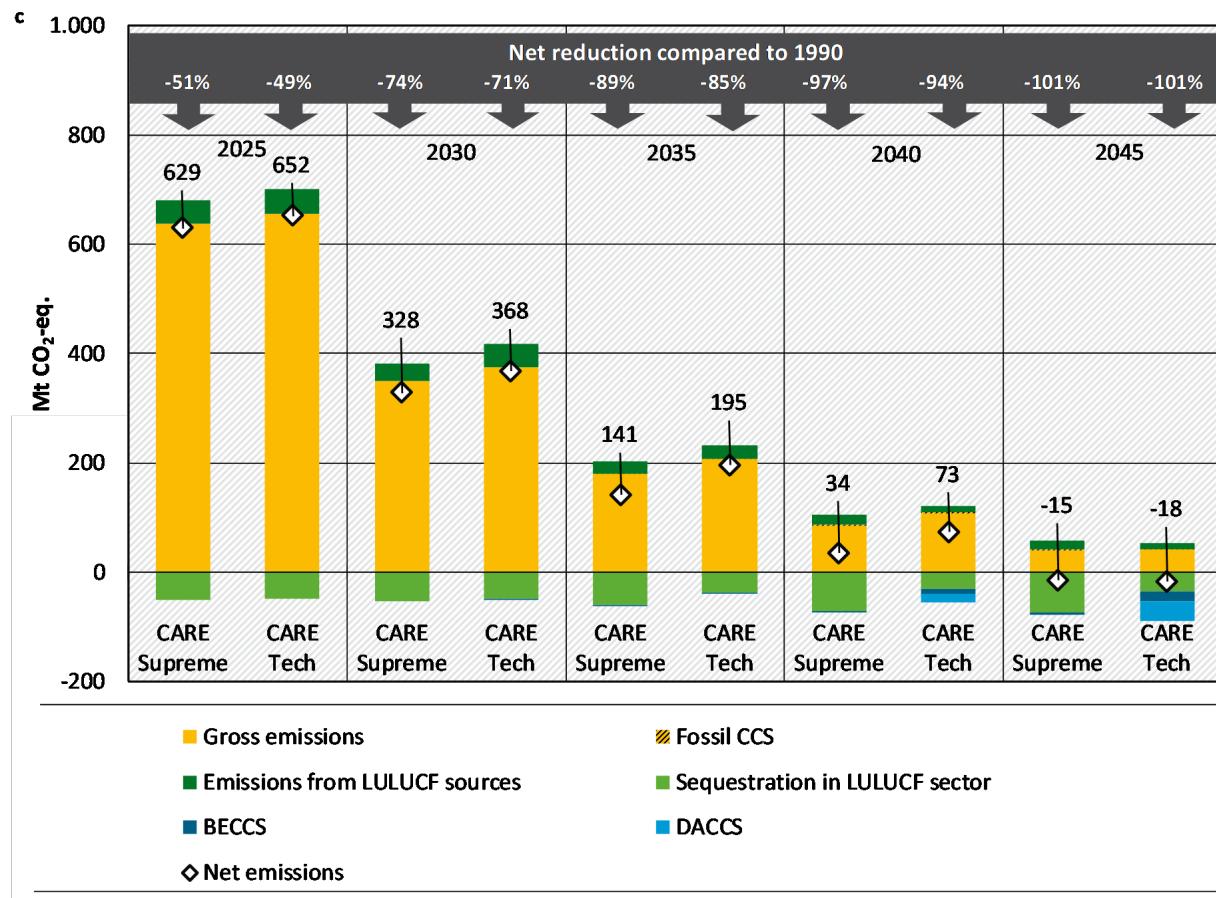
Source: UBA (2023), model calculations by Oeko-Institut and Fraunhofer ISI

The 2024 Submission was used. The gross emissions result from the generated greenhouse gases minus the captured and stored greenhouse gases from fossil CCS, which are considered zero emissions (the value of the generated greenhouse gases includes all emissions (excluding the LULUCF sector) without carbon capture). The gross emissions correspond to the category that includes fossil carbon capture (zero emissions) but not any technical or natural sinks (negative emissions).

⁸ For example, the ETS price.

These emissions correspond to the annual reduction targets expressed as percentages in Section 3 (1) and Annex 3 of the Federal Climate Change Act.

Figure 4: Net emission reduction in CARESupreme and CARETech, 2025-2045 (incl. LULUCF and technical sink measures)



Source: UBA (2023), model calculations by Oeko-Institut and Fraunhofer ISI

The 2024 Submission was used. The net emissions include the gross emissions and all negative emissions resulting from technical removals and the LULUCF sector. They are decisive for the net targets in Section 3 (2) (net greenhouse gas neutrality, negative greenhouse gas emissions). The net reduction in percentage terms is calculated against the gross emissions in 1990.

1 Einleitung

In Szenarien zur Treibhausgasneutralität steht meist die technologische Transformation von Produktionsrouten und Prozessen im Zentrum der Betrachtung. Dies beinhaltet oder ermöglicht die Nutzung treibhausgasneutraler Energieträger. Diese Vermeidungsstrategie wird in der Fachsprache als „Konsistenz“ bezeichnet⁹. Die Aktivität als physisches Maß der produzierten Güter und die Wertschöpfung (als monetäres Maß) werden dabei als mindestens konstant oder wachsend angenommen – da durch den Einsatz konsistenter Technologien und treibhausgasneutraler Energieträger nachhaltiges Wachstum möglich scheint. Material- und Energieeffizienz werden oft berücksichtigt, wirken aber vor allem dämpfend (nicht transformativ) auf den Ressourcenbedarf. Die Transformationspfade ergeben sich maßgeblich aus den Vorgaben terminierter (Treibhausgas-) Minderungsziele (z. B. -65 % Reduktion im Jahr 2030), der Verfügbarkeit klimaschonender oder treibhausgasneutraler Technologien und der erwarteten Geschwindigkeit, mit der sich Erzeugungsanlagen, Infrastrukturen und Endanwendungen umrüsten oder ersetzen lassen. Dabei besteht eine hohe Unsicherheit, inwieweit die ambitionierten Transformationspfade durch die gesellschaftliche Leistungsfähigkeit (z. B. verfügbare Fachkräfte für Produktion und Installation dieser Technologien) gedeckt sind.

Dieses Grundprinzip besteht auch hier, wird allerdings um ambitionierte Instrumente zur Senkung der Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen, somit auch der industriellen Aktivität¹⁰ – auch unter Absenkung bzw. geringerer Steigerung des Niveaus der Bedürfnisbefriedigung, allgemein aber unter Änderung von Nutzenaspekten und -bewertungen – ergänzt. Diese Nachhaltigkeitsstrategie wird Suffizienz genannt. Das Verständnis von Suffizienz orientiert sich dabei an dieser Definition (Neutz 2023):

„Suffizienz bezeichnet Änderungen in Konsument:innenmustern, welche darauf abzielen, persönliche Bedarfe und Wünsche unter Berücksichtigung der ökologischen Tragfähigkeit der Erde zu befriedigen, wobei sich Nutzenaspekte des Konsums ändern können.“

Die Berücksichtigung von Suffizienz führt dazu, dass in frühen Phasen der Transformation vor allem zusätzlich fossile Energieträger eingespart (und Treibhausgasemissionen schneller sinken), und dass in späten Phasen weniger besonders hochwertige CO₂-arme und CO₂-neutrale Energieträger benötigt und mit deren Herstellung verbundene Ressourcen geschont werden. Dies ermöglicht es, bei mit anderen Untersuchungen vergleichbaren Technologiepfaden stärkere Treibhausgasminderungen (-70 % 2030, -90 % 2040) in das Szenario aufzunehmen. Damit werden die drei Nachhaltigkeitsstrategien Konsistenz, Effizienz und Suffizienz in ihrer Komplementarität berücksichtigt.

Allerdings sind auch die auf den Ressourcenverbrauch (R) und Suffizienz (S) ziellenden Instrumente mit hoher Unsicherheit belegt, da wichtige Barrieren zu ihrer Umsetzung (Akzeptanz, Nutzer*innenverhalten, Interaktion gesellschaftlicher Sektoren) nicht oder nur grob modelliert werden können¹¹. Um diese Unsicherheit abzubilden, wird das Suffizienzinstrumente einschließende Szenario CARESupreme durch eines mit stärkerer Betonung von Konsistenz

⁹ Damit ist also der Einsatz von Technologien gemeint, die Umwelt und Ressourcen wenig oder nicht belasten – also mit einer nachhaltigen Gesellschaft konsistent sind.

¹⁰ Darin vor allem jene der energieintensiven Grundstoffe Stahl, Zement, Olefine, Ammoniak, Glas, nicht-Eisen-Metalle.

¹¹ Es besteht also grundsätzlich die Gefahr, im Modell "leicht" abbildbare Effekte zu integrieren, die in der Realität schwer oder nicht umgesetzt werden können. Damit würden die Szenarien die erreichbaren Treibhausgasminderungen überschätzen und andere Instrumente (technologische Transformation) als weniger ambitioniert berücksichtigen als womöglich notwendig. Dies betrifft zwar alle Typen von Instrumenten und jegliche Modellierung, erscheint bei Suffizienz aber stärker ausgeprägt. Es besteht weiterer Forschungsbedarf zum Abbau dieser Unsicherheiten.

ergänzt (CARETech). Dementsprechend werden in dieser Studie die Ergebnisse zweier CARE¹²-Szenarien dargestellt und miteinander verglichen:

- ▶ CARESupreme
- ▶ CARETech.

Wesentliche Grundlage der Definition von CARESupreme ist eine umfassende Dekarbonisierung. Dabei sollen bis 2030 eine Treibhausgasminderung von -70 % ggü. 1990 (ohne LULUCF) und bis 2040 mindestens -90 % (idealerweise -92 %) (ohne LULUCF) erreicht werden. 2045 soll Deutschland treibhausgasneutral (einschließlich LULUCF) sein. Das Bundes-Klimaschutzgesetz wird herangezogen als Orientierung zu Erreichung sektoraler Ziele. Für die Modellierung wurde noch die Submission 2024 verwendet.¹³ Die Submission im LULUCF-Sektor umfasst die jährliche Meldung von Treibhausgasemissionen und -senken aus Landnutzung und Forstwirtschaft an internationale Stellen wie die UNFCCC und unterliegt ständigen Anpassungen durch methodische Weiterentwicklungen und verbesserte Datengrundlagen.

Der Grundgedanke (Narrativ) von CARESupreme entspricht dem Szenario GreenSupreme aus der 2019 fertiggestellten RESCUE-Studie (Purr et al. 2019). Dabei wird angenommen, dass Klima- und Ressourcenschutz in der Wirtschaft und Bevölkerung verinnerlicht sind. Effizienz und Suffizienz sind Teil des alltäglichen Handelns. Die konkreten Annahmen für die Ausgestaltung des Szenarios wurden auf Basis von Erkenntnissen und Entwicklungen aktualisiert, die zum Zeitpunkt der Abstimmung der Szenarioparametrisierung vorlagen. In CARESupreme spielt Suffizienz eine wichtige Rolle, es handelt sich jedoch nicht um ein reines Suffizienz-Szenario. Als wesentliche Annahme wird ein gesamtwirtschaftliches Nullwachstum ab dem Jahr 2035¹⁴ unterstellt.

Die Modellierung der beiden Szenarien basiert in großen Teilen auf dem Vorgehen des Projektionsberichts 2024 (Harthan et al. 2024)¹⁵. Die Modellierung der Szenarien CARESupreme und CARETech bis 2045 erfolgt auf Basis von mit dem Umweltbundesamt abgestimmten Annahmen zu

- ▶ Bevölkerungsentwicklung,
- ▶ Wirtschaftsentwicklung,
- ▶ Energie- und CO₂-Preisentwicklungen sowie
- ▶ technischen und sektorspezifischen Faktoren (wie z. B. Wirkungsgraden).

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den hier vorgestellten Szenarien und Purr et al. (2019) ist, dass die Szenarien vor allem instrumenten- und damit nicht rein maßnahmengetrieben sind. Dies bedeutet, dass nicht nur klimapolitische Maßnahmen (wie Elektrofahrzeuge oder Erneuerbare Energien) angenommen werden, sondern über konkrete Instrumente (wie Kaufprämie oder Erneuerbare-Energien-Gesetz) modelliert wird, wie Klimaziele erreicht werden können. In einzelnen Fällen werden den Szenarien jedoch auch Maßnahmen hinterlegt.

¹² Climate protection.

¹³ Die Submission 2024 beinhaltet noch nicht die Änderungen bei den Emissionen aus Humusverlusten in mineralischen Ackerböden (seit Submission 2025) in Höhe von ca. 7 Mio. t CO₂-Äq..

¹⁴ In Purr et al. (2019) war dies noch 2030. Vor dem Hintergrund des Zeitfortschritts und der maximal denkbaren Transformationsgeschwindigkeit wurde dies angepasst.

¹⁵ Die folgende Erläuterung des methodischen Vorgehens basiert auf Harthan et al. (2024) und wurde für die Modellierung der CARE-Szenarien angepasst.

In zahlreichen Sektorworkshops zwischen Umweltbundesamt und den Forschungsnehmenden wurden für jeden Sektor die konkreten Instrumente festgelegt, mit denen die Treibhausgasminderungsziele erreicht werden sollen. Dabei wurden klimapolitische Instrumente konkret parametrisiert, beispielsweise Gesetze, Regulierungen, ökonomische Instrumente (z. B. CO₂-Bepreisung) oder vorgesehene Haushaltsmittel. Die klimapolitischen Instrumente zielen auf ein breites Spektrum an Klimaschutzmaßnahmen und damit verbundenen Treibhausgasminderungen. Der Ermittlung der aus den Klimaschutzinstrumenten resultierenden Effekte wie z. B. die Entwicklung des Absatzes von Elektrofahrzeugen, von Wärmepumpen oder die Stromerzeugung nach Brennstoffen erfolgt modellendogen.

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

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

Für die energiebedingten Treibhausgasemissionen aus Verbrennungsprozessen basieren die Analysen auf einem komplexen System verschiedener Modelle:

- a) Die Stromerzeugung auf Basis fossiler Energieträger sowie die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird mit dem PowerFlex-Modell des Öko-Instituts analysiert. Die Wärmeerzeugung von KWK-Anlagen wird in diesem Modell ebenfalls modelliert.
- b) 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.
- c) Für den Verkehrsbereich erfolgt die Modellierung mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts.
- d) Für den Gebäudesektor (im Bereich der Wohn- und Nichtwohngebäude) wird das Modell Building STar des Öko-Instituts eingesetzt.
- e) Analysen für den verbleibenden Brennstoff- und Strombedarf im Sektor Gebäude werden unter der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI durchgeführt.
- f) Die Analysen für den Strom- und Brennstoffbedarf der Sektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistung erfolgen unter Zuhilfenahme der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI, die auf einzelnen Sektormodellen beruht.
- 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.

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

Für die Emissionen aus Industrieprozessen werden die folgenden Ansätze verfolgt:

- 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 Mengengerütes für die Energienachfrage und -bereitstellung im Emissionsmodell ENUSEM des Öko-Instituts mit den für das Nationale Treibhausgasinventar verwendeten Methoden ermittelt.
- 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.
- d) Für die HFKW-, FKW-, SF₆- und NF₃-Emissionen werden vorliegende Projektionen aktualisiert und im Modell ProFI angepasst.

Die Projektionen der Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft in Bezug auf landwirtschaftliche Böden, Nutztierhaltung und Sonstiges werden mit dem Modell LiSE des Öko-Instituts berechnet. Die Energieverbräuche der Landwirtschaft werden vom Öko-Institut mit dem Modell LaWiEnMod (Landwirtschaftliches Energie Modell) ermittelt.

Die Emissionen des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) werden mit dem Modell FABio des Öko-Instituts berechnet.

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

Das Szenario CARESupreme entspricht im Grundgedanken dem Szenario GreenSupreme der 2019 fertiggestellten RESCUE-Studie (UBA 2019a). Dabei wird angenommen, dass Klima- und Ressourcenschutz in der Wirtschaft und Bevölkerung verinnerlicht sind. Effizienz und Suffizienz sind Teil des alltäglichen Handelns. Zur Umsetzung wurden Erkenntnisse aus Purr et al. (2019) zur Ressourcenschonung sowie zum Zeitpunkt der Parametrisierung aktuelle Erkenntnisse, wie das Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) (Repennig et al. 2023), Ergebnisse des Koalitionsvertrags zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP (SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP 2021) und andere aktuelle Entwicklungen berücksichtigt. CARESupreme stellt somit ein Idealszenario dar, das jedoch nicht ausschließt, dass durch weitere Maßnahmen oder Dynamiken, die im Szenario nicht betrachtet wurden, noch größere Erfolge möglich wären.

Das zweite Szenario, CARETech, weist das gleiche Ambitionsniveau wie CARESupreme auf, wobei ebenfalls Treibhausgasneutralität (mit LULUCF) bis 2045 erreicht werden soll. Gleichermaßen sollten die (sektoralen) Zwischenziele erreicht werden. Im Gegensatz zu CARESupreme wurde in CARETech jedoch von keinem Nullwachstum ab 2035 ausgegangen. Es wurde das Wirtschaftswachstum des Projektionsberichts 2024 (Harthan et al. 2024) angesetzt.

Die Ausgestaltung der klimapolitischen Instrumente des Szenarios CARETech basiert auf CARESupreme, wobei Instrumente in Bezug auf Effizienz und Suffizienz auf das Niveau des Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenarios (MWMS) des Projektionsberichts 2024 abgesenkt bzw. z.T. gestrichen wurden. Die aufgrund geringerer Effizienz und Suffizienz entstehenden Zielerreichungslücken in CARETech wurden überwiegend durch Technologiewechsel und zusätzlichen Energiebedarf (z. B. Erneuerbare Energien, Strom, Wasserstoff) gedeckt.

Infrastruktur und Angebotsstrukturen in CARETech, die Effizienz und Suffizienz adressieren (z. B. Radwege, ÖPNV) bleiben wie im MWMS. Infrastrukturen zur Sicherstellung der Instrumentierung von CARETech (z. B. H₂-Infrastruktur) sind hiervon ausgenommen.

Im Angebotssektor (v.a. Energiewirtschaft) ist damit sichtbar, was der zusätzliche Energiebedarf in CARETech bedeutet (Höhe des Energiebedarfs, Energieträger, Importe, Energieabhängigkeit).

CARETech beantwortet damit die Frage nach einem möglichen (bezüglich der Treibhausgasemissionen) äquivalenten Pfad, falls Suffizienz und Kreislaufwirtschaft nicht die in CARESupreme angenommenen Beiträge erbringen können.

Aufgrund mangelnder Effizienz und Suffizienz ist eine Zielerreichung im Jahr 2045 in CARETech ohne Abscheidung und unterirdische Speicherung von Kohlenstoff (CCS) nicht erreichbar. Aus diesem Grund kommen CCS, BECCS (CCS mit Bioenergie), WACCS (CCS an Müllverbrennungsanlagen) und DACCS (CO₂-Abscheidung aus der Luft mit unterirdischer Speicherung) zum Einsatz. In CARESupreme sollte in der ursprünglichen Ausformung der Szenarios auf die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung verzichtet werden. Aufgrund der Beschlusslage durch §3b im Bundes-Klimaschutzgesetz aus dem Jahr 2024 und sich abzeichnender Unsicherheiten bei der Realisierung der Waldsenke (Hennenberg et al. 2024b), wurde in CARESupreme ebenfalls die Nutzung von WACCS und BECCS zugelassen, um einen entsprechenden Treibhausgaspuffer vorzuhalten und robusten Transformationspfad abzubilden. Der angestrebte Sicherheitspuffer beträgt in CARESupreme und CARETech unter Verwendung der Submission 2024 rund -15 Mio. t CO₂-Äq.. Unter Nutzung der neusten Submission (Submission 2025) ist dieser Puffer teilweise bereits durch methodische Anpassungen in den Treibhausgas-Inventaren aufgebraucht.

Grundlegende Rahmendaten (Bevölkerung, Brennstoff- und CO₂-Preise) wurden in CARETech und CARESupreme gleich angesetzt, um Vergleichbarkeit sicherzustellen. Diese entsprechen denen der Treibhausgas-Projektionen 2024 (Harthan et al. 2024) mit geringfügigen Anpassungen¹⁶. Die Modellierung erfolgt in Jahresschritten bis 2045 und startet im Jahr 2024. Das Basisjahr ist das Jahr 2021.

Kapitel 2 beschreibt die Gesamtergebnisse der Szenarien CARESupreme und CARETech. Kapitel 3 bis 9 zeigen die Ergebnisse der einzelnen Sektoren.

¹⁶ Beispielsweise beim ETS-Preis.

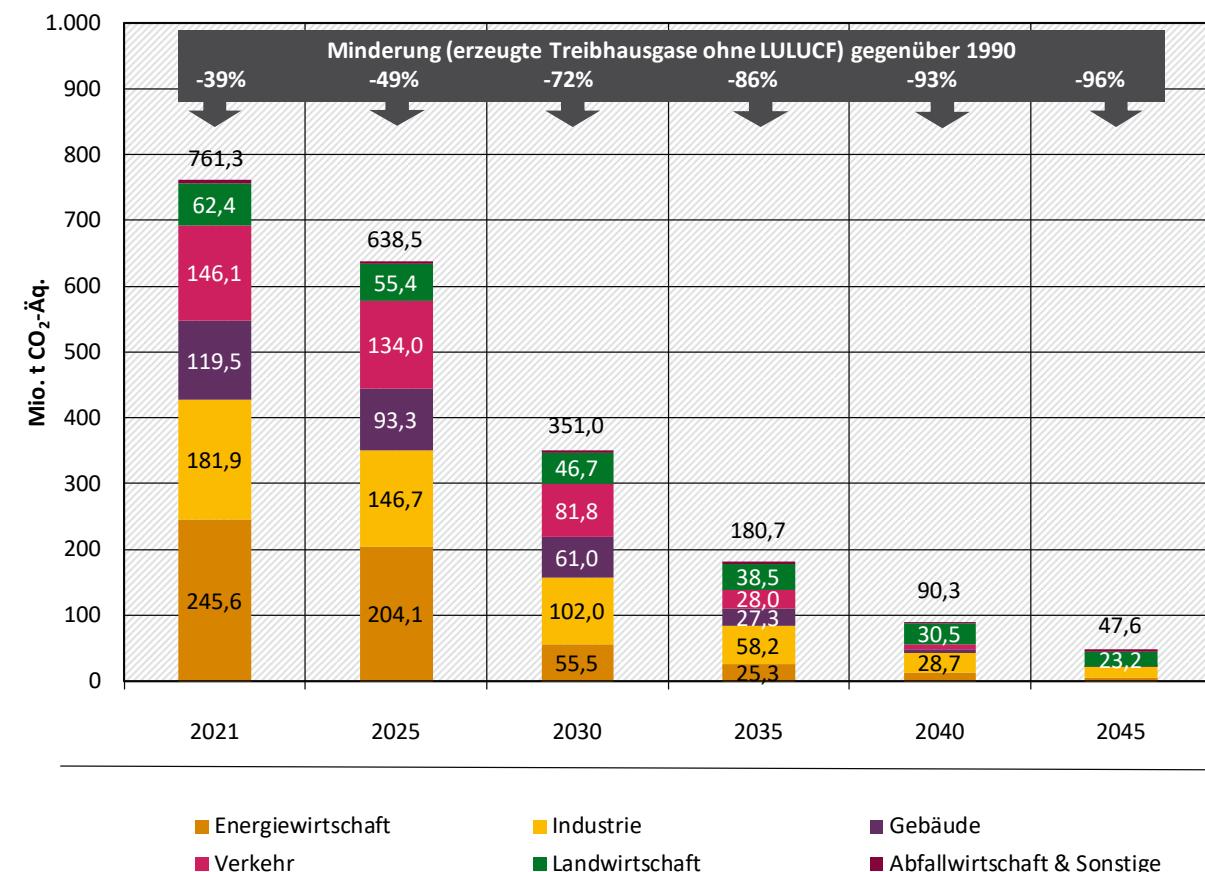
2 Gesamtergebnisse

2.1 CARESupreme

2.1.1 Treibhausgasemissionen

Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der erzeugten Treibhausgase im Szenario CARESupreme. Entsprechend der Annahmen zu einer schnellen und tiefen Transformation aller Lebensbereiche im Szenario CARESupreme, wird bereits im Jahr 2030 eine Treibhausgasminderung von 900 Mio. t CO₂-Äq. bzw. 72,0 % ggü. 1990 erreicht. **Im Jahr 2045 werden in CARESupreme knapp 48 Mio. t CO₂-Äq. an Treibhausgasen erzeugt.**

Abbildung 5: Erzeugte Treibhausgase in den KSG-Sektoren im Szenario CARESupreme, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Anmerkung: Der Wert der erzeugten Treibhausgase beinhaltet alle Emissionen (exklusive des LULUCF-Sektors) ohne Kohlenstoffabscheidung. Das bedeutet, dass in diesem Wert auch alle fossilen Emissionen enthalten sind, die beispielsweise als Prozessemisionen in der Industrie oder an Müllverbrennungsanlagen entstehen und abgeschieden werden, um anschließend dauerhaft gespeichert zu werden („fossiles CCS“). Unter Verwendung der Submission 2024.

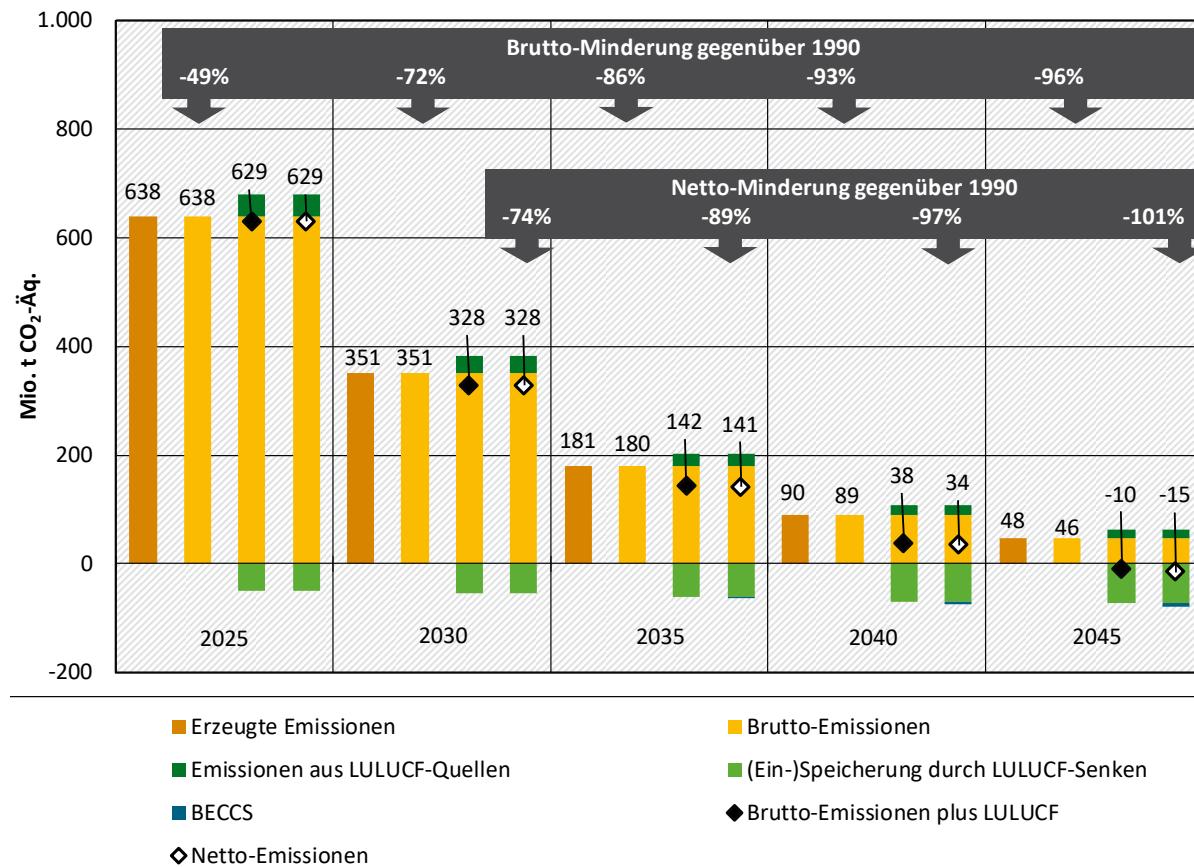
Hinzu kommen die Emissionen bzw. die Einspeicherung von CO₂ im LULUCF-Sektor (Tabelle 1), welche im Jahr 2030 vor dem Hintergrund des Waldzustandes nur eine Senke von rund 23 Mio. t CO₂-Äq. darstellen. Im Jahr 2040 beträgt die reine Minderung der erzeugten Treibhausgase in den Sektoren (außer LULUCF) bereits 900 Mio. t CO₂-Äq., also 92,8 % ggü.

1990. Die natürliche Kohlenstoffsenke (LULUCF) kann bis 2045 auf rund -56 Mio. t CO₂-Äq.¹⁷ gesteigert werden. **Im Szenario CARESupreme wird ausschließlich mit der natürlichen Kohlenstoffsenke (LULUCF) Netto-Treibhausgasneutralität und darüber hinaus netto-negative Treibhausgasemissionen von rund -8 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045 erreicht** (siehe Tabelle 1). Unter Nutzung der neusten Submission ist dieser Puffer durch methodische Anpassungen in den Treibhausgasbilanzierung aufgebraucht und die Netto-Null wird nur noch gewahrt. Es sei darauf hingewiesen, dass in der vorliegenden Modellierung bereits vorab die nun mit der Bundeswaldinventur gezeigte Waldentwicklung modelliert wurde und so verlässlich die historische Emissionsbilanz für den Wald abgebildet wird. In den Ergebnissen der natürlichen Kohlenstoffsenke (LULUCF-Sektor) sind die Auswirkungen der extremen Jahre 2018 bis 2020 bereits berücksichtigt. Die Ergebnisse von CARESupreme und CARETech können daher als richtungssicher angesehen werden.

Entsprechend dem Bundes-Klimaschutzgesetz und mit Blick auf robuste Zielerreichung wurden ein Sicherheitspuffer und ergänzend technische Maßnahmen (WACCS, BECCS) berücksichtigt. **Durch diese ergänzenden technischen Maßnahmen (WACCS) werden von den erzeugten knapp 48 Mio. t CO₂-Äq. Emissionen nur 46 Mio. t CO₂-Äq. in die Atmosphäre ausgestoßen (Brutto-Emissionen)**, siehe Abbildung 6. **Mit den natürlichen Kohlenstoffsenken und der zusätzlichen technischen Negativemissionstechnik BECCS ergeben sich in CARESupreme Netto-Negativemissionen im Jahr 2045 von rund -15 Mio. t CO₂-Äq..** Unter Nutzung der neusten Submission ist dieser Puffer teilweise bereits durch methodische Anpassungen in den Treibhausgas-Inventaren aufgebraucht. Die Restemissionen, insbesondere in den Sektoren Industrie und Landwirtschaft, werden durch die Senke des LULUCF-Sektors und durch zusätzliches WACCS und BECCS in der Energiewirtschaft – auch unter Berücksichtigung der aktuellen Submission – robust kompensiert. Der Einsatz von CCS an fossilen Industrieanlagen ist dafür nicht erforderlich. Damit werden im Transformationsprozess keine Lock-in-Effekte oder Pfadabhängigkeiten verursacht und eine Reduktion auf die unvermeidbaren Treibhausgasemissionen ermöglicht. Auch der Einsatz zusätzlicher technischer Maßnahmen, wie die direkte Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (DACCs), ist nicht erforderlich.

¹⁷ Im Folgenden werden biogene Kohlenstoffentnahmen konsequent mit einem Minus versehen, um ihre Wirkung als Negativemission zu verdeutlichen, auch wenn die Formulierungen, z. B. Entnahme oder Senke, dies bereits impliziert. Die Abscheidung und Einspeicherung von Kohlendioxid fossilen Ursprungs wird mit einem (-) gekennzeichnet, da es eine Nullemission und keine Negativemission ist, jedoch eine negative Wirkung auf die erzeugten Emissionen hat.

Abbildung 6: Brutto- und Netto-Emissionsminderung im Szenario CARESupreme 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Anmerkungen:

Der Wert der erzeugten Treibhausgase beinhaltet alle Emissionen (exklusive des LULUCF-Sektors) ohne Kohlenstoffabscheidung. Das bedeutet, das in diesem Wert auch alle fossilen Emissionen enthalten sind, die beispielsweise als Prozessemisionen in der Industrie oder an Müllverbrennungsanlagen entstehen und abgeschieden werden, um anschließend dauerhaft gespeichert werden („fossiles CCS“).

Brutto-Emissionen ergeben sich aus den erzeugten Treibhausgasen abzüglich der abgeschiedenen und gespeicherten Treibhausgase aus fossilem CCS, die als Nullemissionen gelten. Brutto-Emissionen entsprechen also der Kategorie, die zwar fossile Kohlenstoffabscheidung (Nullemissionen), aber noch keine technischen oder natürlichen Senken (Negativemissionen) anrechnet. Sie entsprechen den jährlichen, prozentualen Minderungszielen aus §3 Abs. 1 und Anlage 3.

Die Netto-Emissionen beinhalten die Brutto-Emissionen und zusätzlich alle Negativemissionen, die sich aus technischen Entnahmen und dem LULUCF-Sektor ergeben. Sie sind maßgeblich für die Netto-Ziele in §3 Abs. 2 (Netto-Treibhausgasneutralität, negative Treibhausgasemissionen). Die prozentuale Netto-Minderung berechnet sich ggü. den Brutto-Emissionen im Jahr 1990.

Unter Verwendung der Submission 2024.

Die Netto-Treibhausgasemissionen pro Sektor sind in Tabelle 1 dargestellt. Jährliche Zeitreihen sind in der Datentabelle zu den Szenarien CARESupreme und CARETech (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2025) verfügbar, die separat veröffentlicht wird.

Tabelle 1: Treibhausgasemissionen und abgeschiedenes CO₂ im Szenario CARESupreme nach Sektoren in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045¹⁸

Sektor	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Erzeugte Treibhausgase (exkl. CCS, BECCS, WACCS, DACCS):						
Energiewirtschaft	245,6	204,1	55,5	25,3	13,1	4,9
Industrie	181,9	146,7	102,0	58,2	28,7	16,3
Gebäude	119,5	93,3	61,0	27,3	6,5	0,3
Verkehr	146,1	134,0	81,8	28,0	8,4	0,1
Landwirtschaft	62,4	55,4	46,7	38,5	30,5	23,2
Abfallwirtschaft und Sonstiges	5,8	5,0	4,0	3,5	3,1	2,9
Gesamt (=erzeugte Treibhausgase)	761,3	638,5	351,0	180,7	90,3	47,6
<i>Minderung in Prozent gegenüber 1990</i>	<i>-39,2 %</i>	<i>-49,0 %</i>	<i>-72,0 %</i>	<i>-85,6 %</i>	<i>-92,8 %</i>	<i>-96,2 %</i>
Fossiles WACCS	0,0	0,0	0,0	(-)0,5	(-)1,7	(-)1,3
Fossiles CCS in der Energiewirtschaft	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fossiles CCS aus Industrieprozessen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt inkl. fossiles CCS (=Brutto-Emissionen)	761,3	638,5	351,0	180,2	88,6	46,3
LULUCF	2,6	-9,0	-23,3	-38,6	-51,2	-55,9
LULUCF-Senke innerhalb des LULUCF-Sektors ¹⁹	-45,6	-50,2	-54,0	-60,6	-70,5	-73,0
Gesamt (inkl. LULUCF)	764,0	629,4	327,7	141,6	37,4	-9,6
Negativemissionen im Sektor Energiewirtschaft:						
BECCS aus fester Biomasse ²⁰	0,0	0,0	0,0	-0,6	-3,3	-5,9
BECCS aus Biogas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
WACCS von Kunststoffen auf Basis von atmosphärischem CO ₂ ²¹	0,0	0,0	0,0	0,0	(-)0,3	(-)1,3

¹⁸ Unter Verwendung der Submission 2024.

¹⁹ Summe der Netto-Aufnahme durch Senken in jenen LULUCF-Kategorien, die eine Senke darstellen. Diese ändern sich im Lauf der Zeit. Im Jahr 2021 stellen Wälder und Holzprodukte eine Senke dar; im Jahr 2045 stellen Wälder, Ackerland, Grünland und Holzprodukte eine Senke dar.

²⁰ In CARESupreme wird CCS nur in der Abfallverbrennung angewendet (WACCS). Deshalb handelt es sich bei der Biomasse, für die BECCS durchgeführt wird, ausschließlich um biogenen Abfall. Die fossilen und biogenen Anteile des Abfalls, sowie der Anteil von Kunststoffen, die auf Basis von atmosphärischem CO₂ hergestellt wurde, ändern sich im Lauf der Zeit: der fossile Anteil nimmt ab, während die anderen beiden Anteile zunehmen.

²¹ In CARESupreme und CARETech werden die Ausgangsstoffe für Kunststoffe auf Basis von atmosphärischem Kohlenstoff importiert. Die Senke entsteht im Ausland und die Einspeicherung im Inland wird nicht bilanziert. Eine Ausnahme stellt die Zeile „Gesamtes gespeichertes CO₂ (CCS, BECCS, DACCS, WACCS) dar, die keine Bilanz, sondern eine Mengenangabe ist. Da bei inländischer Abscheidung und über die gesamte Prozesskette eine Negativemission entsteht, ist der Posten hier aufgeführt, wenn auch nicht bilanziert.

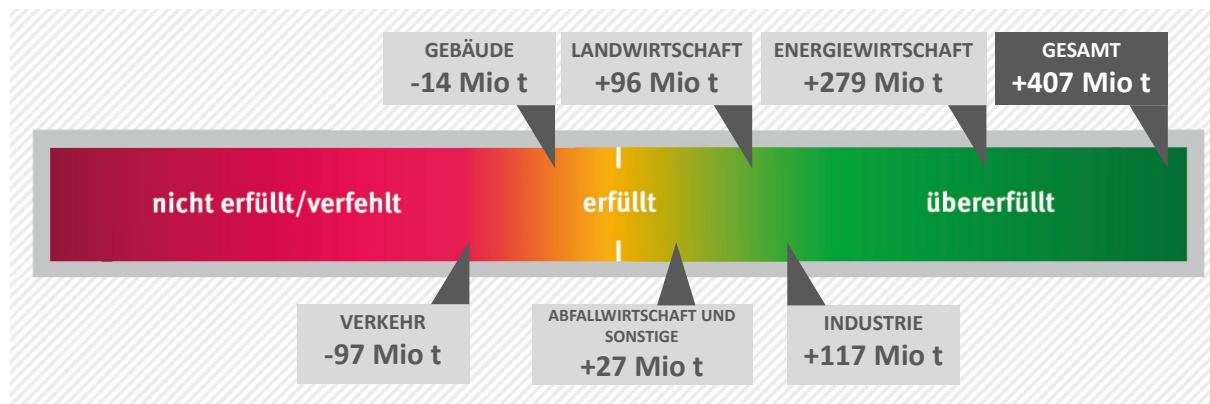
Sektor	2021	2025	2030	2035	2040	2045
DACCS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt gespeichertes CO₂ (CCS, BECCS, DACCS, WACCS)	0,0	0,0	0,0	(-)1,0	(-)5,5	(-)8,5
Gesamt technische Negativemissionen aus BECCS, DACCS	0,0	0,0	0,0	-0,6	-3,3	-5,9
Gesamt inkl. LULUCF und BECCS, DACCS (=Netto-Emissionen)	764,0	629,4	327,7	141,1	34,2	-15,5
<i>Minderung in Prozent gegenüber 1990</i>	<i>-40,5 %</i>	<i>-51,0 %</i>	<i>-74,5 %</i>	<i>-89,0 %</i>	<i>-97,3 %</i>	<i>-101,2 %</i>
Internationaler Luft- und Seeverkehr	22,1	35,9	36,3	30,9	21,0	0,3
Weitere Emissionen (nicht in den Zeilen „Gesamt“ enthalten) ²² :						
CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels im nationalen Verkehr	0,0	0,0	1,1	2,7	3,1	3,8
CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels im internationalen Luft- und Seeverkehr	0,0	0,0	0,7	3,6	10,9	31,9
CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von Kunststoffen auf Basis von atmosphärischem CO ₂	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	1,1

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

In Abbildung 7 ist die Differenz zwischen den kumulierten KSG-Jahresemissionsmengen 2021-2030 und den kumulierten Emissionen im Szenario CARESupreme dargestellt. Eine detaillierte Übersicht der kumulierten Emissionen in den Szenarien CARESupreme und CARETech ist in Tabelle 9 zu finden. Die kumulierten Emissionen in den Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft und Sonstige erzielen eine kumulierte Übererfüllung, während die Sektoren Verkehr und Gebäude die kumulierten sektoralen Jahresemissionsgesamtmengen verfehlten.

²² Siehe Box in Abschnitt 2.2.1.

Abbildung 7: Kumulierte sektorale Jahresemissionsgesamtmengen und kumulierte Zielerreichung/Zielverfehlung der KSG-Sektoren und gesamt in CARESupreme, 2021-2030



Quelle: Eigene Darstellung, Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Um aufzuzeigen, welche neuen Bedarfe in den anderen KSG-Sektoren die Emissionen der Energiewirtschaft verursachen, wurde in Anhang B eine Verursacherbilanz für die Energiewirtschaft berechnet.

2.1.2 Kohlenstoffbilanz

Bis ins Jahr 2045 nimmt in CARESupreme die Nachfrage nach kohlenstoffbasierten Brennstoffen aufgrund der Elektrifizierung ab. Bei den verbleibenden Brennstoffen überwiegen Biomasse und synthetische Energieträger. In der Kohlenstoffbilanz in Abbildung 8 sind die folgenden Flüsse dargestellt:

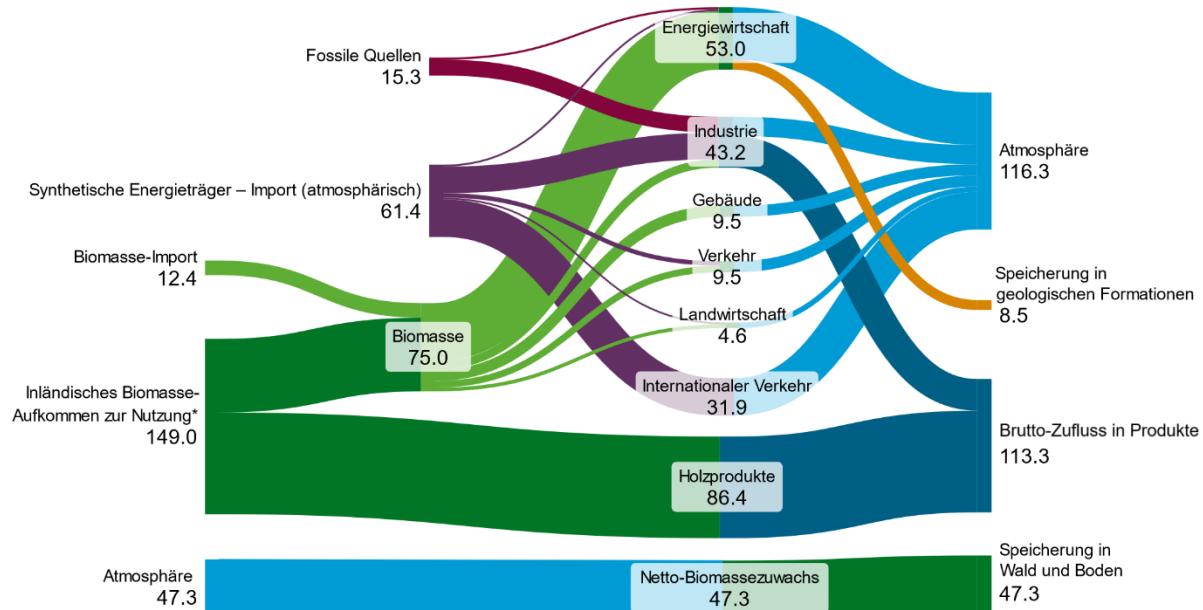
- ▶ Die Flüsse von Kohlenstoff aus fossilen Quellen, synthetischen Energieträgern und Biomasse in die einzelnen Sektoren,
- ▶ die Emissionen von CO₂ aus den Sektoren in die Atmosphäre,
- ▶ die Flüsse von CO₂ in technische Senken und
- ▶ die Flüsse von Kohlenstoff in Produkte und in natürliche Senken.

Alle Flüsse und Emissionen werden in Mio. t. CO₂ dargestellt. Eine Tonne Kohlenstoff entspricht 3,67 t CO₂. Emissionen von Kohlenstoff in Form von Methan oder anderen kohlenstoffhaltigen Treibhausgasen werden in Abbildung 8 nicht dargestellt.

Der Großteil der Biomasse wird in der Energiewirtschaft eingesetzt. Ein Teil davon wird in Kohlenstoffsenken gespeichert. Synthetische Energieträger werden hauptsächlich in der Industrie und im internationalen Verkehr eingesetzt. Kohlenstoff aus den Sektoren Energie und LULUCF wird in Produkten gespeichert, und der LULUCF-Sektor stellt eine bedeutende Senke dar.

Im Jahr 2045 machen Grundstoffe für Industrieprozesse den überwiegenden Teil der fossilen Kohlenstoffquellen aus (81 %). Diese umfassen u.a. Kalkstein für die Zementherstellung und fossile Energieträger für die chemische Industrie. Synthetische Energieträger umfassen flüssige Energieträger für den Verkehr (68 %) und die Industrie (32 %). Biomasse wird von fester Biomasse dominiert, gefolgt von Biogas und flüssiger Biomasse. Ca. ein Drittel des gesamten Kohlenstoffs wird importiert.

Abbildung 8: Kohlenstoffbilanz CARESupreme im Jahr 2045 in Mio. t CO₂



Quelle: Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Anmerkungen:

*inklusive Biomasserrückflüsse aus alten Holzprodukten.

In CARE wird angenommen, dass sämtliche kohlenstoffhaltigen synthetischen Energieträger importiert werden. Diese umfassen E-fuels für den Verkehr und die Industrie sowie Kunststoffe, die auf Basis von atmosphärischem CO₂ hergestellt wurden.

Der LULUCF-Sektor stellt im Jahr 2045 eine Netto-Senke dar. Kohlenstoff wird im Sektor selbst und in Produkten gespeichert. Es werden nur die Flüsse zu Produkten und zu natürlichen Senken im LULUCF-Sektor dargestellt. Flüsse zwischen dem LULUCF-Sektor und der Atmosphäre sind nicht dargestellt.

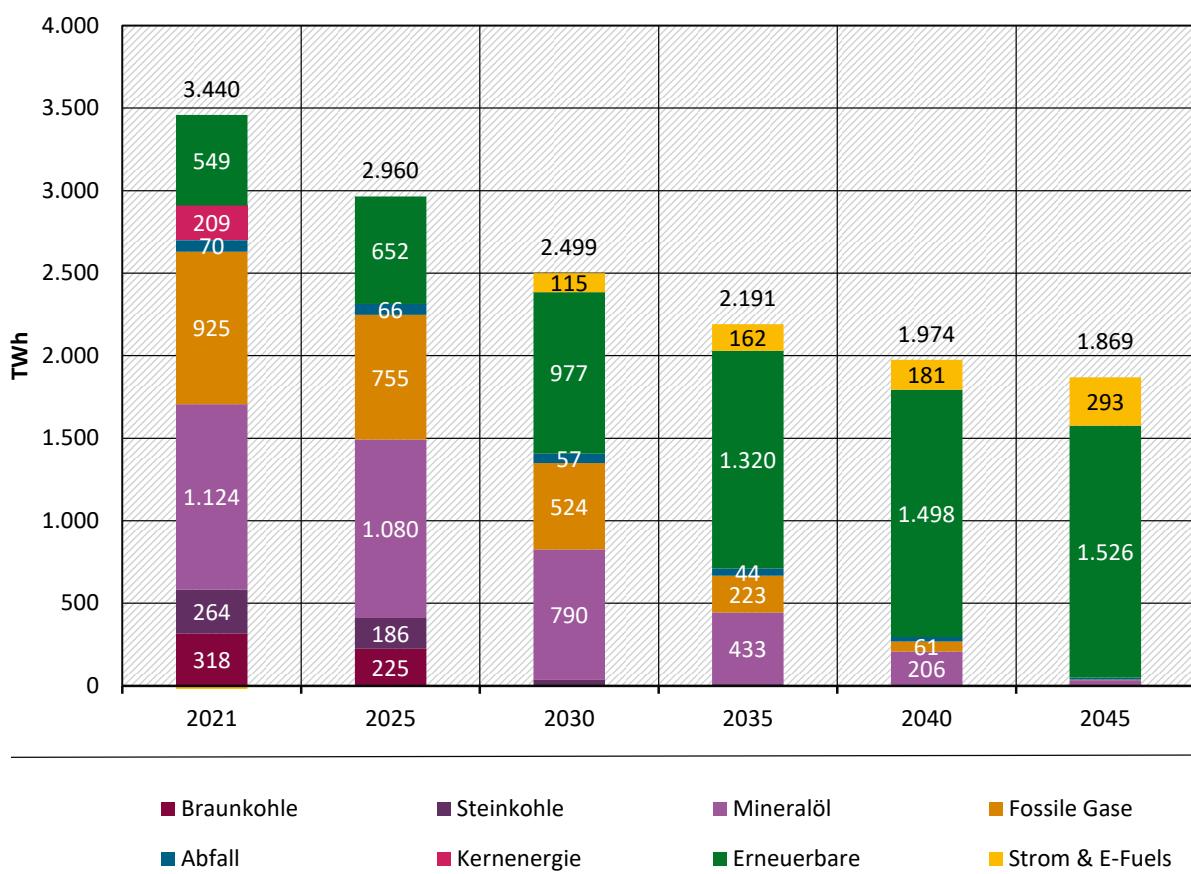
2.1.3 Primärenergieverbrauch

2.1.3.1 Primärenergieverbrauch nach Energieträgern

Abbildung 9 zeigt die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in ausgewählten Jahren von 2021 bis 2045 in CARESupreme. Der Einsatz von Kernenergie endet 2023, jener von Braunkohle ist ab 2030 sehr gering (rund 5 TWh). Mineralöle, fossile Gase und Erneuerbare (Biomasse, Windenergie, Solarenergie, Wasserkraft sowie Geothermie und Umweltwärme) sind im Jahr 2030 die größten Quellen von Primärenergie.

Der projizierte Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch erhöht sich bis 2045 auf rund 81 %. Da Strom und strombasierte Brennstoffe (E-fuels) wie Wasserstoff oder PtL-Kraftstoffe Sekundärenergieträger sind, geht für diese nur der Netto-Import in den Primärenergieverbrauch ein. Die Summe aus dem Stromhandelssaldo und dem Verbrauch an E-fuels liegt in den Jahren 2021 und 2025 nahe null. Ab 2030 werden größere Mengen an E-fuels importiert; dies ist in Abbildung 9 als Beitrag zum Primärenergieverbrauch ersichtlich. Der Anteil an E-fuels am Primärenergieverbrauch steigt auf rund 18 % im Jahr 2045.

Abbildung 9: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in CARESupreme, 2021-2045



Quelle: Brennstoffe: UBA (2023); übrige Energieträger: AGEB (2023a), AGEB (2023b), Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

2.1.3.2 Verbrauch von Biomassebrennstoffen und Abgleich mit Biomasse-Aufkommen

Im Szenario CARESupreme werden in den energieverbrauchenden Sektoren im Jahr 2030 in Summe 284 TWh an Biomassebrennstoffen verbraucht (Tabelle 2). Bis zum Jahr 2045 sinkt der Verbrauch an Biomassebrennstoffen auf in Summe 266 TWh. Gut 60 % des Verbrauchs entfällt auf feste Biomassebrennstoffe. Der Verbrauch an festen und gasförmigen Biomassebrennstoffen nimmt im Zeitverlauf in allen Sektoren ab. Eine Ausnahme ist eine mehr als Verdoppelung in der Energiewirtschaft, die aber die Abnahme der anderen Sektoren nicht aufwiegt. Der Verbrauch an flüssigen Biomassebrennstoffen nimmt von 2030 bis 2045 zu (Tabelle 2).

Tabelle 2: Verbrauch an Biomassebrennstoffen und Holz für stoffliche Holzprodukte in CARESupreme in TWh, 2030 und 2045

Kategorie Biomassebrennstoff	Sektor	2030	2045
Feste Biomassebrennstoffe	Energiewirtschaft (inkl. Industriekraftwerke)	91,3	140,0
	Industrie	23,8	18,1
	Gebäude	75,3	19,4
	Landwirtschaft	1,8	1,8

Kategorie Biomassebrennstoff	Sektor	2030	2045
	Summe	192,2	179,3
Gasförmige Biomassebrennstoffe	Energiewirtschaft (inkl. Industriekraftwerke)	41,5	26,4
	Gebäude	11,2	5,0
	Verkehr national	0,4	0,0
	Landwirtschaft	3,7	3,2
	Summe	56,7	34,7
Flüssige Biomassebrennstoffe	Industrie	0,5	6,1
	Gebäude	1,2	5,2
	Verkehr national	26,9	22,2
	Landwirtschaft	1,6	5,6
	Verkehr international	5,2	12,9
	Summe	35,4	51,9
Summe	Total (energetisch)	284,3	265,8
Stoffliche Holznutzung	Zufluss in den Holzproduktspeicher*	154,6	186,1
Zwischensumme	Feste Biomassebrennstoffe und Zufluss in den Holzproduktspeicher	346,8	365,3
Summe	Total (energetisch und Zufluss in den Holzproduktspeicher)	438,9	451,9

Anmerkung: Der Verbrauch an Biomasse gesamt entspricht dem Primärenergieverbrauch. Gemäß der AGEB-Definition ist der Einsatz im internationalen Schiffsverkehr hier nicht enthalten. Der Einsatz biogener Brennstoffe (Biodiesel) im internationalen Schiffsverkehr beträgt 0,2 TWh im Jahr 2030 und 0,4 TWh im Jahr 2045. *Für die Umrechnung von Mengenflüssen in den Holzproduktspeicher (siehe Abschnitt 9.1.3) wird ein Faktor von 8.100 MJ/m³ angenommen.

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Dem Verbrauch an Biomassebrennstoffen steht das inländische Aufkommen an Biomassebrennstoffen gegenüber. Für feste und gasförmige Biomassebrennstoffe deckt im Szenario CARESupreme das inländische Aufkommen den Verbrauch zu 100 % ab, sodass keine Importe bzw. Exporte ausgewiesen sind (Tabelle 3). Bei den festen Biomassebrennstoffen nehmen Rest- und Abfallstoffe den größten Anteil ein, gefolgt von Waldholz und Sägeneverbrennungsprodukten. Feste Biomassebrennstoffe gehen im Szenario CARESupreme zurück, da zum Senkenaufbau weniger Laubholz geerntet und Wald- sowie Rest- und Abfallholz vermehrt stofflich genutzt werden. Bei gasförmigen Biomassebrennstoffen nimmt von 2030 bis 2045 Biogas aus Anbaubiomasse um 65 % ab. Die Anbaubiomasse für flüssige Biomassebrennstoffe geht von 17 TWh im Jahr 2030 auf null im Jahr 2045 zurück. Im Gegenzug steigen die Mengen an flüssigen Biomassebrennstoffen aus Rest- und Abfallstoffen und insbesondere die Importe von 2030 bis 2045 an (Tabelle 3)²³.

²³ Es wird auf die Produktion von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse verzichtet. Importiert werden Biokraftstoffe aus Rest- und Abfallstoffen, da in Deutschland das Aufkommen an ungenutzten Rest- und Abfallstoffen niedriger ist. Alternativ könnten PtL-Kraftstoffe importiert werden.

Tabelle 3: Aufkommen an Biomassebrennstoffen in CARESupreme in TWh, 2030 und 2045

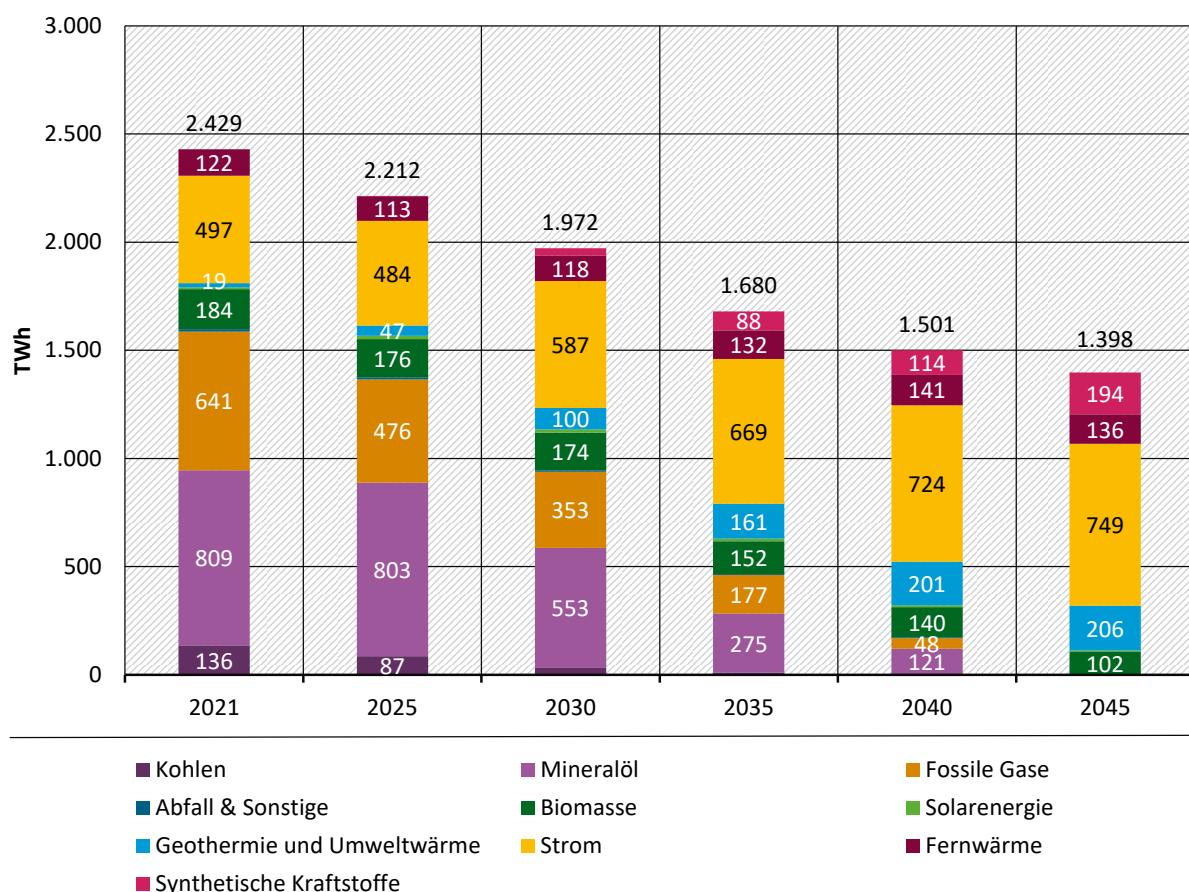
Kategorie Biomassebrennstoff	Biomassebrennstoff	2030	2045
Feste Biomassebrennstoffe	Waldholz inkl. Restholz und Rinde	51,7	39,4
	Sägenebenprodukte	18,4	13,3
	Rest- und Abfallstoffe	120,5	109,2
	Agroforst	0,2	3,2
	Paludikultur	1,4	14,1
	Netto-Import	0,0	0,0
	Summe	192,2	179,2
Gasförmige Biomassebrennstoffe	Anbaubiomasse	35,6	12,5
	Wirtschaftsdünger	4,9	4,5
	Rest- und Abfallstoffe	16,2	17,7
	Netto-Import	0,0	0,0
	Summe	56,7	34,7
Flüssige Biomassebrennstoffe	Anbaubiomasse	17,2	0,0
	Rest- und Abfallstoffe	1,0	6,1
	Netto-Import	17,2	45,8
	Summe	35,4	51,9
Summe	Inländisch	267,1	220,0
	Netto-Importe	17,2	45,8
	Total	284,3	265,8

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

2.1.4 Endenergieverbrauch

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs (EEV) in CARESupreme ist in Abbildung 10 dargestellt. Von 2021 bis 2030 nimmt der EEV um 19 % ab; zwischen 2021 und 2045 reduziert er sich um 42 %. Im Jahr 2045 macht Strom 54 % des Endenergieverbrauch aus, gefolgt von Geothermie und Umweltwärme (15 %), synthetischen Kraftstoffen (14 %), Fernwärme (10 %) und Biomasse (7 %).

Abbildung 10: Endenergieverbrauch nach Energieträgern in CARESupreme, 2021-2045



Quelle: Brennstoffe: UBA (2023); übrige Energieträger: AGEB (2023a), AGEB (2023b); Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 4 zeigt die Entwicklung des EEV in den einzelnen Endverbrauchssektoren zwischen 2021 und 2045. Von 2021 bis 2030 nimmt der EEV insgesamt um 19 % ab. Der EEV der Haushalte nimmt in diesem Zeitraum um 28 % ab. Von 2021 bis 2045 wird der EEV der Haushalte mehr als halbiert, während der EEV der Industrie nur um 27 % reduziert wird. Dies kann dadurch erklärt werden, dass das Potenzial für die Steigerung der Energieeffizienz in diesem Sektor geringer als in den anderen Sektoren ist.

Tabelle 4: Endenergieverbrauch nach Endverbrauchssektoren in CARESupreme, 2021-2045

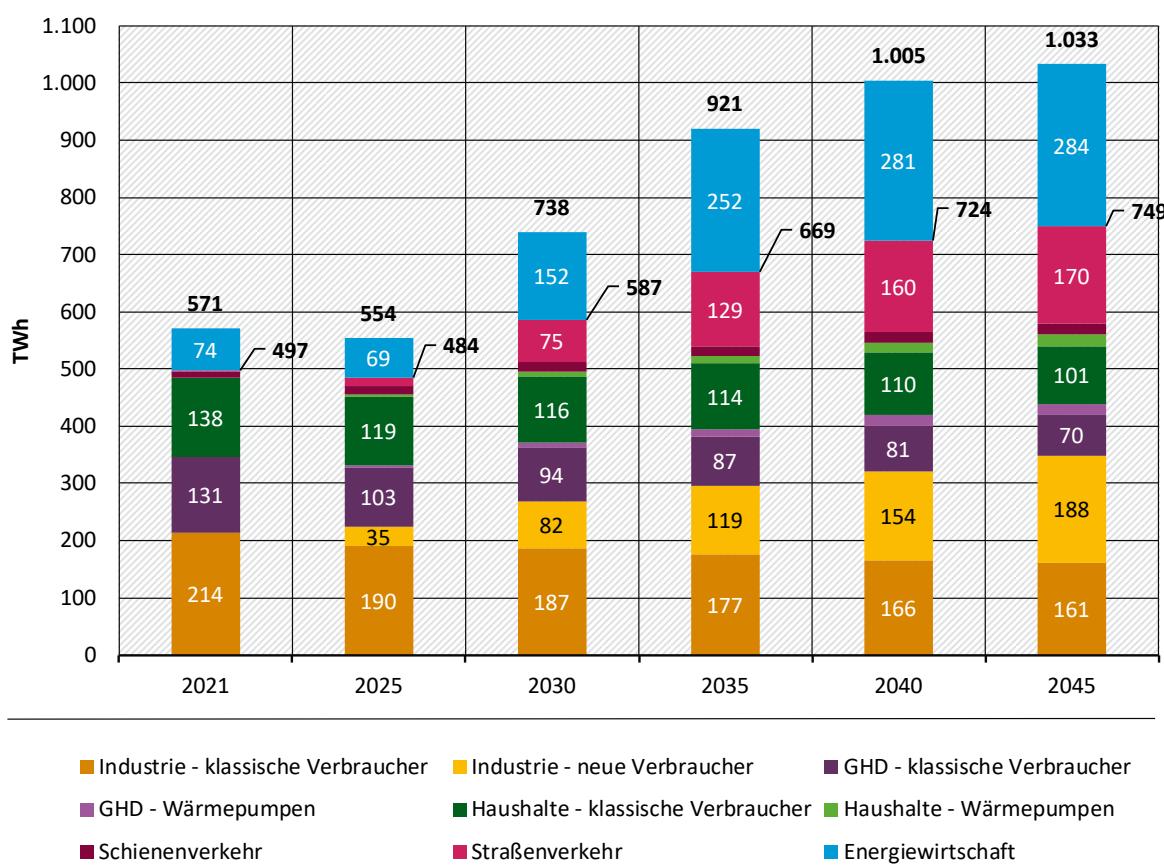
Sektor	2021	2025	2030	2035	2040	2045
TWh						
Industrie	711	624	621	568	525	518
GHD	349	306	276	258	232	206
Haushalte	716	606	512	411	352	309
Verkehr	652	676	563	443	393	365
Gesamt	2.429	2.212	1.972	1.680	1.501	1.398

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

2.1.5 Bruttostromverbrauch

Der Bruttostromverbrauch nimmt von 571 TWh im Basisjahr 2021 auf 1033 TWh im Jahr 2045 zu (Abbildung 11). Die größten Zunahmen ergeben sich durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs, durch die Elektrifizierung von Prozessen in der Industrie und durch den zusätzlichen Stromverbrauch in der Energiewirtschaft für die Herstellung von inländischem grünem Wasserstoff. Zwischenzeitlich hat auch die Fernwärmeverzeugung durch Großwärmepumpen und Elektrokessel einen erheblichen Anteil am Stromverbrauch, sinkt in späteren Jahren aber wieder aufgrund rückläufiger Fernwärmennachfragen. Die detaillierte Entwicklung in den Sektoren ist in Tabelle 5 dargestellt.

Abbildung 11: Bruttostromverbrauch in CARESupreme nach Sektoren, 2021-2045



Quelle: AGEB (2023a), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Anmerkung: Der Endenergieverbrauch ist die Summe aller Verbräuche ohne Energiewirtschaft.

Tabelle 5: Bruttostromverbrauch in CARESupreme in TWh, 2008-2045

Sektor	2008	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Industrie	232,6	214,4	224,8	268,9	295,6	320,5	349,3
<i>davon neue Verbraucher (Elektrifizierung der Prozesswärme u.a.)</i>	n.v.	n.v.	34,8	82,0	118,8	154,4	188,2
GHD	136,0	131,2	107,3	102,0	99,6	98,3	90,3
<i>davon Wärmepumpen</i>	n.v.	n.v.	4,3	8,0	12,8	17,0	20,5

Sektor	2008	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Haushalte	139,5	138,5	123,5	124,4	127,0	126,8	121,6
<i>davon Wärmepumpen</i>	n.v.	n.v.	10,6	21,2	35,8	44,5	42,2
Schienenverkehr	16,5	11,5	15,0	16,4	17,6	18,4	17,5
Straßenverkehr	0,0	1,4	13,8	74,8	129,3	159,5	170,2
Stromverbrauch Endenergie	524,6	496,9	484,5	586,5	669,0	723,6	748,8
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-5,3 %</i>	<i>-7,6 %</i>	<i>11,8 %</i>	<i>27,5 %</i>	<i>37,9 %</i>	<i>42,7 %</i>
Summe Endenergie klassische Verbraucher	524,6	492,3	421,1	400,6	372,3	348,1	327,7
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-6,2 %</i>	<i>-19,7 %</i>	<i>-23,6 %</i>	<i>-29,0 %</i>	<i>-33,6 %</i>	<i>-37,5 %</i>
Summe Endenergie neue Verbraucher	n.v.	n.v.	63,4	185,9	296,7	375,4	421,1
<i>Anteil neuer Verbraucher am Stromverbrauch Endenergie</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>13,1 %</i>	<i>31,7 %</i>	<i>44,4 %</i>	<i>51,9 %</i>	<i>56,2 %</i>
Raffinerien	6,4	5,8	5,8	4,1	2,2	1,2	0,4
PtL-Herstellung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H ₂ -Herstellung	0,0	0,0	0,4	38,1	98,5	120,7	140,2
Übrige Energiewirtschaft	7,7	4,6	2,9	0,7	0,6	0,6	0,5
Leitungsverluste	30,1	26,6	26,1	33,3	39,9	42,2	43,8
Pump- & Batteriespeicher	7,9	7,2	6,4	29,5	48,0	53,4	53,0
Kraftwerkseigenverbrauch	38,3	29,9	22,4	15,4	17,9	19,8	20,4
Elektrodenkessel und Großwärmepumpen	0,0	0,0	5,3	30,9	44,8	43,0	25,7
Stromverbrauch Energiewirtschaft	90,5	74,0	69,4	151,9	251,8	281,0	284,0
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-18,2 %</i>	<i>-23,3 %</i>	<i>67,9 %</i>	<i>178,3 %</i>	<i>210,5 %</i>	<i>213,8 %</i>
Bruttostromverbrauch	615,1	570,9	553,9	738,5	920,9	1.004,5	1.032,8
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-7,2 %</i>	<i>-10,0 %</i>	<i>20,1 %</i>	<i>49,7 %</i>	<i>63,3 %</i>	<i>67,9 %</i>

Quelle: AGEB (2023a), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

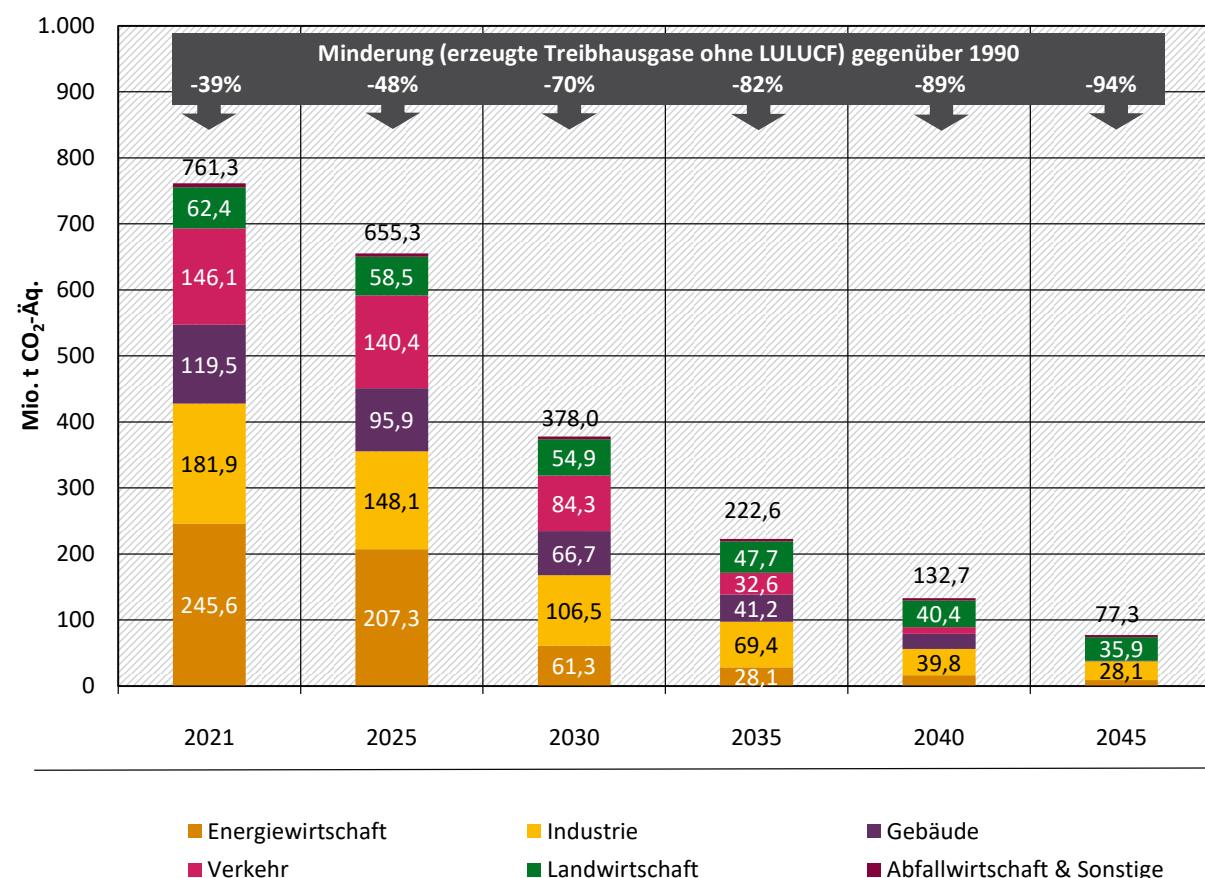
Anmerkung: Als „n.v.“ gekennzeichnete historische Werte sind nicht verfügbar.

2.2 CARETech

2.2.1 Treibhausgasemissionen

Abbildung 12 zeigt die Entwicklung der erzeugten Treibhausgase im Szenario CARETech. Die Minderung ist geringer als in CARESupreme (Abbildung 5). Insbesondere im Sektor Landwirtschaft werden aufgrund ausbleibender Verhaltensänderungen in CARETech mehr Treibhausgase erzeugt als in CARESupreme. Konkret werden in CARETech mit 77,3 Mio. t CO₂-Äq. rund 30 Mio. t CO₂-Äq. mehr Treibhausgase im Jahr 2045 erzeugt als in CARESupreme.

Abbildung 12: Erzeugte Treibhausgase in den KSG-Sektoren im Szenario CARETech 2021-2045



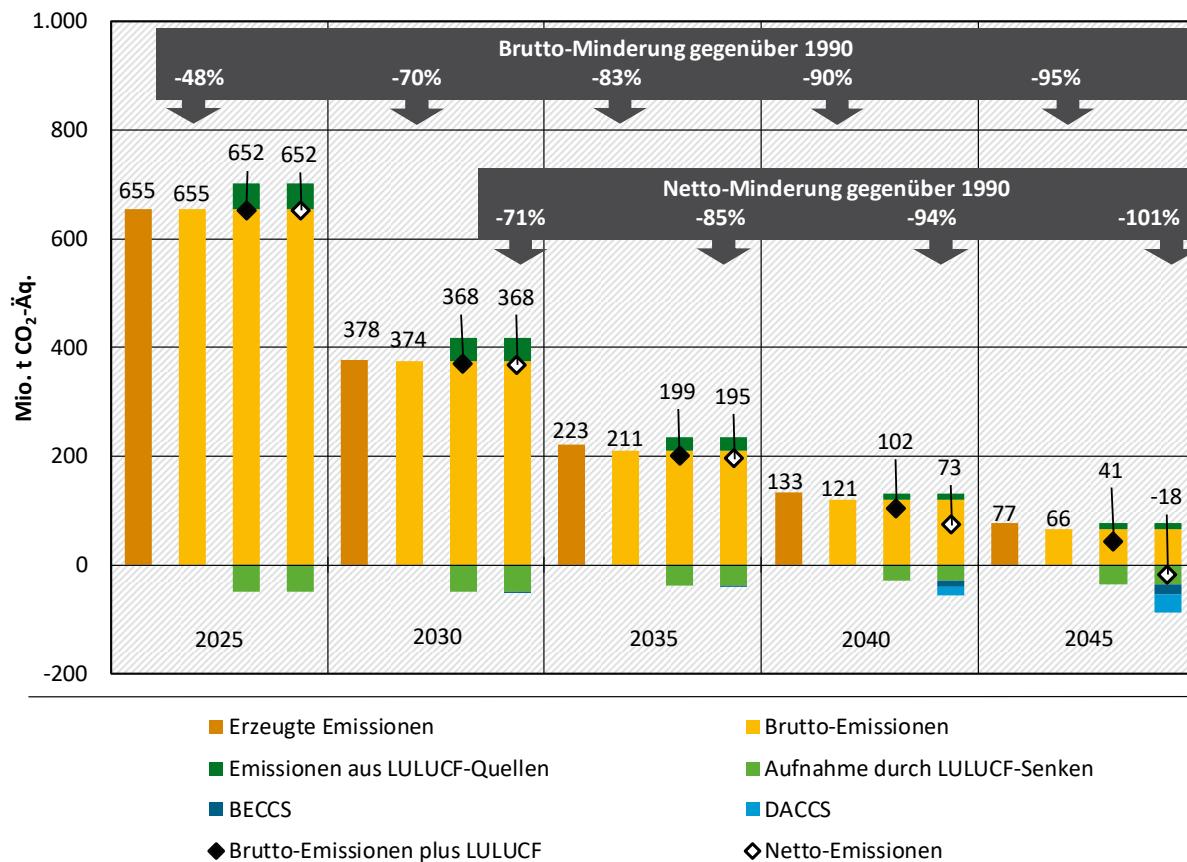
Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Anmerkung: Der Wert der erzeugten Treibhausgase beinhaltet alle Emissionen (exklusive des LULUCF-Sektors) ohne Kohlenstoffabscheidung. Das bedeutet, dass in diesem Wert auch alle fossilen Emissionen enthalten sind, die beispielsweise als Prozessemissionen in der Industrie oder an Müllverbrennungsanlagen entstehen und abgeschieden werden, um anschließend dauerhaft gespeichert werden („fossiles CCS“). Unter Verwendung der Submission 2024.

Im Vergleich zum Szenario CARESupreme werden in CARETech jedoch größere Mengen an CO₂ aus Kraftwerken und Heizwerken abgeschieden und gespeichert. Außerdem wird CCS im Industriesektor durchgeführt, und CO₂ wird aus der Atmosphäre entnommen und gespeichert (Direct Air Capture and Storage – DACCS, siehe Abbildung 13). **Mit fossilem CCS werden von den erzeugten Treibhausgasen rund 11 Mio. t CO₂-Äq. nicht ausgestoßen, so dass die Brutto-Emissionen, in CARETech rund 66 Mio. t CO₂-Äq. betragen.** Dies sind immer noch rund 20 Mio. t CO₂-Äq. mehr als in CARESupreme. **Nach Ausgleich durch die natürlichen Kohlenstoffsenken verbleiben rund 41 Mio. t CO₂-Äq., die durch technische Maßnahmen zusätzlich ausgeglichen werden müssen, um mindestens Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. Unterstellt man einen ähnlichen Sicherheitspuffer²⁴ für robuste Zielerreichung wie in CARESupreme, bedarf es rund 56 Mio. t CO₂-Äq. technischer Negativemissionen.** Siehe dazu Abbildung 13 und Tabelle 6.

²⁴ Auch in CARETech ist bei Berücksichtigung der aktuellen Submission im Vergleich zur im Projekt genutzten Submission 2024 der Puffer in identischer Höhe wie in CARESupreme, konkret rund 7 Mio. t CO₂-Äq., reduziert. Die Aussagen bleiben gleichwohl richtungssicher.

Abbildung 13: Brutto- und Netto-Emissionsminderung im Szenario CARETech 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Anmerkungen:

Der Wert der erzeugten Treibhausgase beinhaltet alle Emissionen (exklusive des LULUCF-Sektors) ohne Kohlenstoffabscheidung. Das bedeutet, das in diesem Wert auch alle fossilen Emissionen enthalten sind, die beispielsweise als Prozessemisionen in der Industrie oder an Müllverbrennungsanlagen entstehen und abgeschieden werden, um anschließend dauerhaft gespeichert werden („fossiles CCS“).

Brutto-Emissionen ergeben sich aus den erzeugten Treibhausgasen abzüglich der abgeschiedenen und gespeicherten Treibhausgase aus fossilem CCS, die als Nullemissionen gelten. Brutto-Emissionen entsprechen also der Kategorie, die zwar fossile Kohlenstoffabscheidung (Nullemissionen), aber noch keine technischen oder natürlichen Senken (Negativemissionen) anrechnet. Sie entsprechen den jährlichen, prozentualen Minderungszielen aus §3 Abs. 1 und Anlage 3.

Die Netto-Emissionen beinhalten die Brutto-Emissionen und zusätzlich alle Negativemissionen, die sich aus technischen Entnahmen und dem LULUCF-Sektor ergeben. Sie sind maßgeblich für die Netto-Ziele in §3 Abs. 2 (Netto-Treibhausgasneutralität, negative Treibhausgasemissionen). Die prozentuale Netto-Minderung berechnet sich ggü. den Brutto-Emissionen im Jahr 1990.

Unter Verwendung der Submission 2024.

Tabelle 6: Treibhausgasemissionen im Szenario CARETech nach Sektoren in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045²⁵

Sektor	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Erzeugte Treibhausgase (exkl. CCS, BECCS, WACCS, DACCS):						
Energiewirtschaft	245,6	207,3	61,3	28,1	16,2	9,1
Industrie	181,9	148,1	106,5	69,4	39,8	28,1
Gebäude	119,5	95,9	66,7	41,2	23,2	0,9
Verkehr	146,1	140,4	84,3	32,6	9,9	0,1
Landwirtschaft	62,4	58,5	54,9	47,7	40,4	35,9
Abfallwirtschaft und Sonstiges	5,8	5,1	4,2	3,7	3,3	3,2
Gesamt (=erzeugte Treibhausgase)	761,3	655,3	378,0	222,6	132,7	77,3
<i>Minderung in Prozent gegenüber 1990</i>	<i>-39,2 %</i>	<i>-47,6 %</i>	<i>-69,6 %</i>	<i>-81,7 %</i>	<i>-89,1 %</i>	<i>-93,8 %</i>
Fossiles WACCS	0,0	0,0	0	(-)0,5	(-)1,9	(-)1,6
Fossiles CCS aus Brennstoffen in der Industrie	0,0	0,0	(-)2,7	(-)6,7	(-)3,5	(-)0,6
Fossiles CCS aus Industrieprozessen	0,0	0,0	(-)0,9	(-)4,2	(-)6,7	(-)9,2
Gesamt inkl. fossiles CCS (=Brutto-Emissionen)	761,3	655,3	374,4	211,1	120,7	66,0
LULUCF	2,6	-3,2	-6,2	-11,8	-18,3	-24,5
LULUCF-Senke innerhalb des LULUCF-Sektors ²⁶	-45,6	-49,1	-49,1	-36,9	-29,7	-35,7
Gesamt (inkl. LULUCF)	764,0	652,1	368,2	199,3	102,4	41,5
Technische Negativemissionen:						
BECCS aus fester Biomasse (in der Energiewirtschaft)	0,0	0,0	-0,3	-2,9	-9,2	-18,5
BECCS aus fester Biomasse (in der Industrie)	0,0	0,0	-0,2	-0,9	-1,9	-3,7
BECCS aus Biogas (Energiewirtschaft)				-0,6	-1,3	-2,8
WACCS von Kunststoffen auf Basis von atmosphärischem CO ₂ ²⁷	0,0	0,0	0,0	0,0	(-)0,3	(-)1,6
DACCS	0,0	0,0	0,0	0,0	-17,1	-34,2

²⁵ Unter Verwendung der Submission 2024.

²⁶ Summe der Netto-Aufnahme durch Senken in jenen LULUCF-Kategorien, die eine Senke darstellen. In allen Jahren stellen die Kategorien Wälder und Holzprodukte eine Senke dar.

²⁷ In CARESupreme und CARETech werden die Ausgangsstoffe für Kunststoffe auf Basis von atmosphärischem Kohlenstoff importiert. Die Senke entsteht im Ausland und die Einspeicherung im Inland wird nicht bilanziert. Eine Ausnahme stellt die Zeile „Gesamtes gespeichertes CO₂ (CCS, BECCS, DACCS, WACCS) dar, die keine Bilanz, sondern eine Mengenangabe ist. Da bei inländischer Abscheidung und über die gesamte Prozesskette eine Negativemission entsteht, ist der Posten hier aufgeführt, wenn auch nicht bilanziert.

Sektor	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Gesamt gespeicherte CO₂ (CCS, BECCS, DACCS, WACCS)²⁸	0,0	0,0	(-)4,0	(-)15,9	(-)42	(-)72,1
Gesamt technische Negativemissionen aus BECCS, DACCS	0,0	0,0	-0,4	-4,5	-29,4	-59,2
Gesamt inkl. LULUCF und BECCS, DACCS (=Netto-Emissionen)	764,0	652,1	367,8	194,8	72,8	-17,8
<i>Minderung in Prozent gegenüber 1990</i>	-40,5 %	-49,2 %	-71,4 %	-84,8 %	-94,3 %	-101,4 %
Internationaler Luft- und Seeverkehr	22,1	36,0	40,2	35,2	18,1	0,3

Weitere Emissionen (nicht in der Zeile „Gesamt“ enthalten)²⁹:

CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels im nationalen Verkehr	0,0	0,0	6,0	7,7	8,2	7,6
CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels im internationalen Luft- und Seeverkehr	0,0	0,0	0,8	4,1	21,1	39,2
CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von Kunststoffen auf Basis von atmosphärischem CO ₂	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	1,3

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Wie in Tabelle 6 angegeben, sind CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels nicht in den Zeilen „Gesamt“ enthalten. Abbildung 14 zeigt die Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels im nationalen Verkehr im Kontext der Gesamtemissionen. Unter Berücksichtigung der Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels erhöhen sich die Brutto- und Netto-Emissionen im Jahr 2045 um rund 4 Mio. t CO₂-Äq. im Szenario CARESupreme und um rund 8 Mio. t CO₂-Äq. im Szenario CARETech. Detaillierte Zahlen sind in Tabelle 7 dargestellt.

Unterschiede in der Bilanzierung von E-fuels und Kunststoffen auf Basis von atmosphärischem CO₂

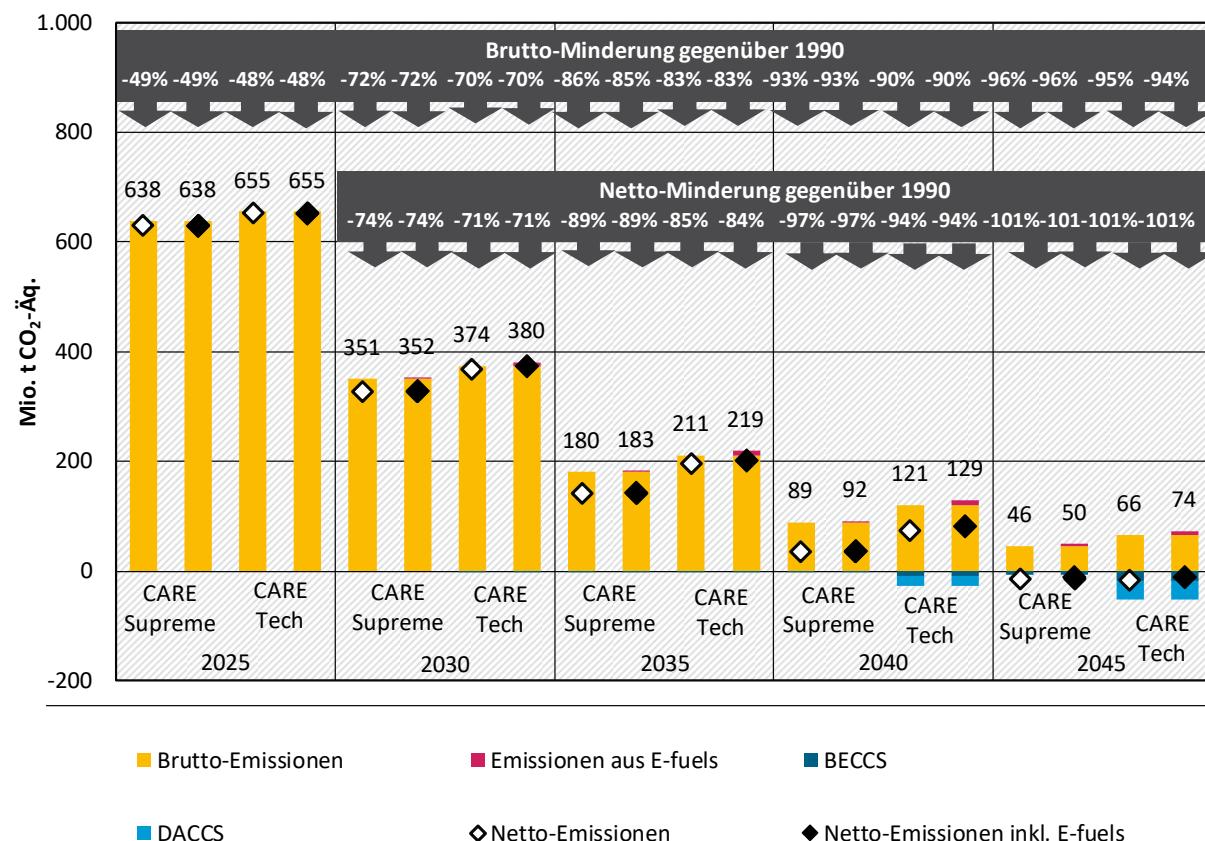
Für alle Brennstoffe werden die verbrennungsbedingten Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) berechnet. Die Bilanzierung der Emissionen aus der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen strombasierten Brennstoffen (wie z. B. PtL-Kraftstoffe) weicht von den Regeln der Treibhausgasinventare ab. Die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von importierten PtL-Kraftstoffen werden separat angegeben und sind nicht in der Gesamtbilanz der Emissionen enthalten.

Auch die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Kunststoffen, die auf Basis von atmosphärischem CO₂ hergestellt wurden, werden separat angegeben und sind nicht in der Gesamtbilanz der Emissionen enthalten. Gespeichertes CO₂ aus der Verbrennung dieser Kunststoffe wird ebenfalls separat angegeben und ist nicht in der Gesamtbilanz enthalten.

²⁸ Durch Rundungen kommt es zu geringfügigen Abweichungen bei der Summenbildung.

²⁹ Siehe untenstehende Box „Unterschiede in der Bilanzierung von E-fuels und Kunststoffen auf Basis von atmosphärischem CO₂“.

Abbildung 14: Emissionsminderung in den Szenarien CARESupreme und CARETech mit und ohne Berücksichtigung der Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels im nationalen Verkehr 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Anmerkung: Pro Jahr und Szenario ist ein Balken ohne und ein Balken mit Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels dargestellt. Die Zahlenwerte über den Balken stellen Brutto-Emissionen in Mio. t CO₂-Äq. dar. Unter Verwendung der Submission 2024.

Tabelle 7: Vergleich der Treibhausgasemissionen entsprechend unterschiedlichen Bilanzierungen von E-fuels in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045³⁰

Sektor	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Brutto-Treibhausgasemissionen:						
Exkl. E-fuels (CARESupreme)	761,3	638,5	351,0	180,2	88,6	46,3
Minderung in % gegenüber 1990 exklusive der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels (CARESupreme)	-39,2 %	-49,0 %	-72,0 %	-85,6 %	-92,9 %	-96,3 %
Exkl. E-fuels (CARETech)	761,3	655,3	374,4	211,1	120,7	66,0

³⁰ Unter Verwendung der Submission 2024.

Sektor	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Minderung in % gegenüber 1990 <i>exklusive</i> der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels (CARETech)	-39,2 %	-47,6 %	-70,1 %	-83,1 %	-90,4 %	-94,7 %
Inkl. E-fuels (CARESupreme)	761,3	638,5	352,1	182,9	91,7	50,1
Minderung in % gegenüber 1990 <i>inklusive</i> der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels (CARESupreme)	-39,2 %	-49,0 %	-71,9 %	-85,4 %	-92,7 %	-96,0 %
Inkl. E-fuels (CARETech)	761,3	655,3	380,3	218,8	128,9	73,6
Minderung in % gegenüber 1990 <i>inklusive</i> der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels (CARETech)	-39,2 %	-47,6 %	-69,9 %	-82,5 %	-89,7 %	-94,1 %
Netto-Treibhausgasemissionen (inkl. LULUCF, BECCS; DACCS):						
Exkl. E-fuels (CARESupreme)	764,0	626,4	327,7	141,1	34,2	-15,5
Exkl. E-fuels (CARETech)	764,0	652,1	367,8	194,8	72,8	-17,8
Inkl. E-fuels (CARESupreme)	764,0	629,4	328,8	143,8	37,2	-11,7
Minderung in % gegenüber 1990 <i>inklusive</i> der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels (CARESupreme)	-40,5 %	-51,0 %	-74,4 %	-88,8 %	-97,1 %	-100,9 %
Inkl. E-fuels (CARETech)	764,0	652,1	373,7	202,5	81,0	-10,3
Minderung in % gegenüber 1990 <i>inklusive</i> der CO ₂ -Emissionen der Verbrennung von E-fuels (CARETech)	-40,5 %	-49,2 %	-70,9 %	-84,2 %	-93,7 %	-100,8 %
CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels:						
... im nationalen Verkehr (CARESupreme)	0,0	0,0	1,1	2,7	3,1	3,8
Minderung in % gegenüber 1990 im Sektor Verkehr <i>inklusive</i> der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels	-10,5 %	-17,8 %	-49,2 %	-81,2 %	-93,0 %	-97,6 %
Minderung in % gegenüber 1990 im Sektor Verkehr <i>exklusive</i> der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels	-10,5 %	-17,8 %	-49,9 %	-82,8 %	-94,9 %	-99,9 %
... im nationalen Verkehr (CARETech)	0,0	0,0	6,0	7,7	8,2	7,6
Minderung in % gegenüber 1990 im Sektor Verkehr <i>inklusive</i> der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels	-10,5 %	-13,9 %	-48,3 %	-80,0 %	-93,9 %	-99,9 %
Minderung in % gegenüber 1990 im Sektor Verkehr <i>exklusive</i> der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung von E-fuels	-10,5 %	-13,9 %	-44,6 %	-75,3 %	-88,9 %	-95,3 %

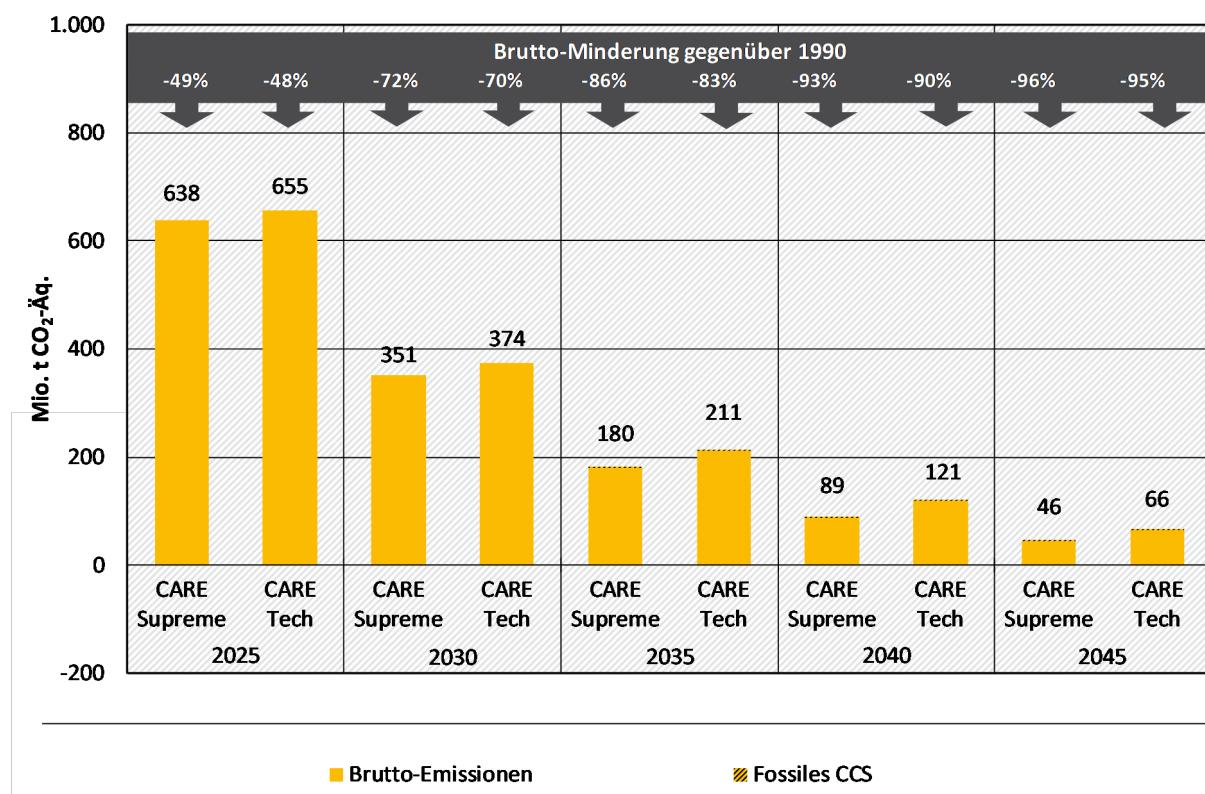
Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

In Abbildung 15 sind die Brutto-Emissionen in den Szenarien CARESupreme und CARETech einander gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass CARESupreme rund 20 Mio. t CO₂-Äq. weniger Treibhausgasemissionen ausstößt als CARETech. Zusätzlich sind die Emissionen und die Einspeicherung aus dem LULUCF-Sektor sowie die technischen Senken dargestellt. In Summe ergeben sich negative Nettoemissionen in beiden Szenarien.

In CARETech werden Nettoemissionen im Jahr 2045 von -17,8 Mio. t CO₂-Äq. erreicht. So wie in CARESupreme besteht ein Puffer zur Netto-Null. Ein genauer Zielwert von z. B. -15 Mio. t CO₂-Äq. konnte jedoch nicht erreicht werden, da die Modellierung mit einer Iteration durchgeführt wurde und während der Sektor-Modellierung die finalen Emissionen noch nicht bekannt sind. Dies gilt sowohl für CARESupreme als auch für CARETech. Für beide Szenarien gilt, dass bei Berücksichtigung der aktuellen Submission im Vergleich zur im Projekt genutzten Submission 2024 der Puffer in identischer Höhe, konkret um rund 7 Mio. t CO₂-Äq., reduziert ist. Die Aussagen bleiben gleichwohl richtungssicher. Unterschiede zu den finalen Resultaten ergeben sich u.a. aufgrund einer unterschiedlichen Einteilung der Energieträger und daraus resultierenden unterschiedlichen Emissionsfaktoren.

CARETech unterscheidet sich von CARESupreme außerdem dadurch, dass CCS zusätzlich zur Energiewirtschaft auch in der Industrie zum Einsatz kommt, womit im Ergebnis im Jahr 2045 um Faktor 10 mehr fossile Treibhausgase geologisch eingespeichert werden müssen. Darüber hinaus bedarf es in CARETech groÙe Mengen CO₂, die aus der Atmosphäre entnommen und auch gespeichert werden müssen als technische SenkenmaÙnahme. **In CARESupreme bedarf es für eine ähnlich robuste und sichere Treibhausgasneutralität wie in CARETech um Faktor 10 (inkl. Sicherheitspuffer) weniger technische SenkenmaÙnahmen.**

Abbildung 15: Brutto-Emissionsminderung in CARESupreme und CARETech 2025-2045

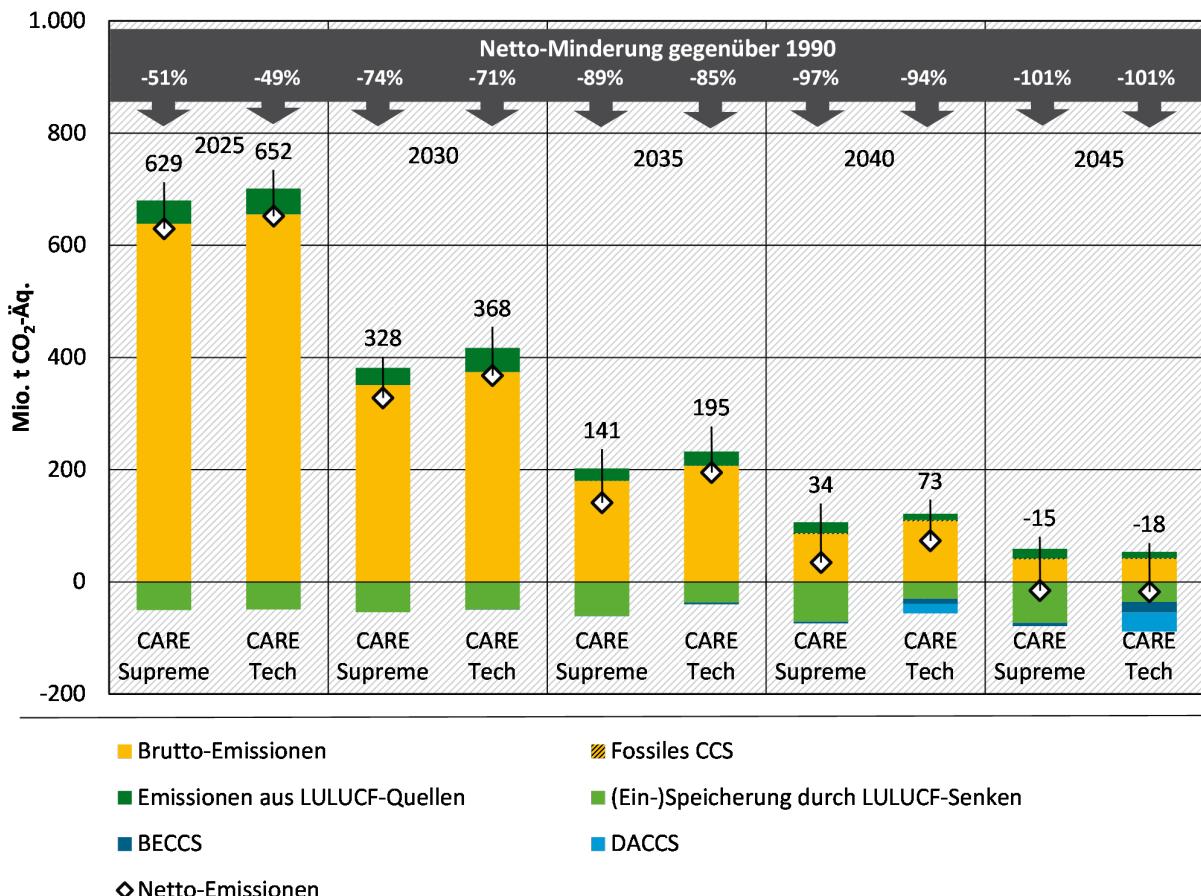


Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Anmerkungen: Brutto-Emissionen ergeben sich aus den erzeugten Treibhausgasen abzüglich der abgeschiedenen und gespeicherten Treibhausgase aus fossilem CCS, die als Nullemissionen gelten. Brutto-Emissionen entsprechen also der

Kategorie, die zwar fossile Kohlenstoffabscheidung (Nullemissionen), aber noch keine technischen oder natürlichen Senken (Negativemissionen) anrechnet. Sie entsprechen den jährlichen, prozentualen Minderungszielen aus §3 Abs. 1 und Anlage 3. Unter Verwendung der Submission 2024.

Abbildung 16: Netto-Emissionsminderung in CARESupreme und CARETech 2025-2045 (inkl. LULUCF und technischer Senken)



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Anmerkungen:

Die Netto-Emissionen beinhalten die Brutto-Emissionen und zusätzlich alle Negativemissionen, die sich aus technischen Entnahmen und dem LULUCF-Sektor ergeben. Sie sind maßgeblich für die Netto-Ziele in §3 Abs. 2 (Netto-Treibhausgasneutralität, negative Treibhausgasemissionen). Die prozentuale Netto-Minderung berechnet sich ggü. den Brutto-Emissionen im Jahr 1990.

Unter Verwendung der Submission 2024.

Tabelle 8 zeigt einen detaillierten Vergleich von CCS in den beiden Szenarien. Innerhalb der Energiewirtschaft wird in CARETech im Vergleich zu CARESupreme deutlich mehr biogenes CO₂ abgeschieden und gespeichert.

Tabelle 8: Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff in den Szenarien CARESupreme und CARETech in ausgewählten Jahren zwischen 2030 und 2045

Sektor/Kategorie	CARESupreme				CARETech			
	2030	2035	2040	2045	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.								
Energiewirtschaft (inkl. Industriekraftwerke)								
Fossiles WACCS	0,0	(-)0,5	(-)1,7	(-)1,3	0	(-)0,5	(-)1,9	(-)1,6
WACCS von Kunststoffen auf Basis von atmosphärischem CO ₂	0,0	0,0	(-)0,3	(-)1,3	0,0	0,0	(-)0,3	(-)1,6
BECCS	0,0	-0,6	-3,3	-5,9	-0,3	-3,5	-10,5	-21,3
Industrie:								
Fossiles CCS aus Industrieprozessen	---	---	---	---	(-)0,9	(-)4,2	(-)6,7	(-)9,2
Fossiles CCS aus Brennstoffen	---	---	---	---	(-)2,7	(-)6,7	(-)3,5	(-)0,6
BECCS aus Industrieprozessen	---	---	---	---	-0,2	-0,9	-1,9	-3,7
WACCS (fossil, atmosphärisch) gesamt	0,0	(-)0,5	(-)1,9	(-)2,6	0	(-)0,5	(-)2,3	(-)3,1
BECCS gesamt	0,0	-0,6	-3,2	-5,9	-0,4	-4,5	-12,4	-25,0
DACCS	---	---	---	---	0,0	0,0	-17,1	-34,2
Summe technische Negativemissionen (BECCS und DACCS)	0,0	-0,6	-3,3	-5,9	-0,4	-4,5	-29,5	-59,2
Gesamt gespeichertes CO₂(CCS, WACCS, BECCS, DACCS)	0,0	(-)1,0	(-)5,5	(-)8,5	(-)4,0	(-)15,9	(-)42,0	(-)72,1

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Hinweis: Werte sind jeweils gerundet. Nicht die gerundeten Werte der einzelnen Zeilen sind addiert.

Tabelle 9 zeigt die kumulierten Netto-Treibhausgasemissionen in CARESupreme und CARETech für zwei Zeiträume: 2021-2030 sowie 2021-2045. Obwohl in beiden Szenarien negative Netto-Emissionen um Jahr 2045 erreicht werden, sind die kumulierten Netto-Emissionen in CARETech über den Zeitraum 2021-2045 um über 400 Mio. t CO₂-Äq. höher als in CARESupreme. Höhere kumulierte Emissionen ergeben sich in CARETech insbesondere in den Sektoren Landwirtschaft, Gebäude und Verkehr. Außerdem ist die kumulierte Senke des LULUCF-Sektors geringer. So wie im Szenario CARESupreme wird auch in CARETech die kumulierten KSG-Jahresemissionsmenge von rund 6.200 Mio. t CO₂-Äq. über den Zeitraum 2021-2030 eingehalten.

**Tabelle 9: Kumulierte Netto-Emissionen bzw. Entnahmen 2021-2030 sowie 2021-2045,
CARESupreme und CARETech³¹**

Sektor	2021-2030		2021-2045	
	CARESupreme	CARETech	CARESupreme	CARETech
Mio. t CO ₂ -Äq.				
Energiewirtschaft	1.632	1.659	1.895	1.883
Industrie	1.426	1.435	2.110	2.099
Gebäude	902	929	1.173	1.366
Verkehr	1.258	1.290	1.578	1.644
Landwirtschaft	547	583	1.060	1.246
Abfallwirtschaft und Sonstiges	49	50	98	103
Gesamt	5.813	5.945	7.915	8.340
LULUCF	-91	-19	-785	-256
Internationaler Luft- und Seeverkehr	349	356	680	703
Technische Negativemissionen (BECCS und DACCS)	0	-0,9	-37	-347
Gesamt gespeichertes CO ₂	0	(-)3	(-)58	(-)440

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

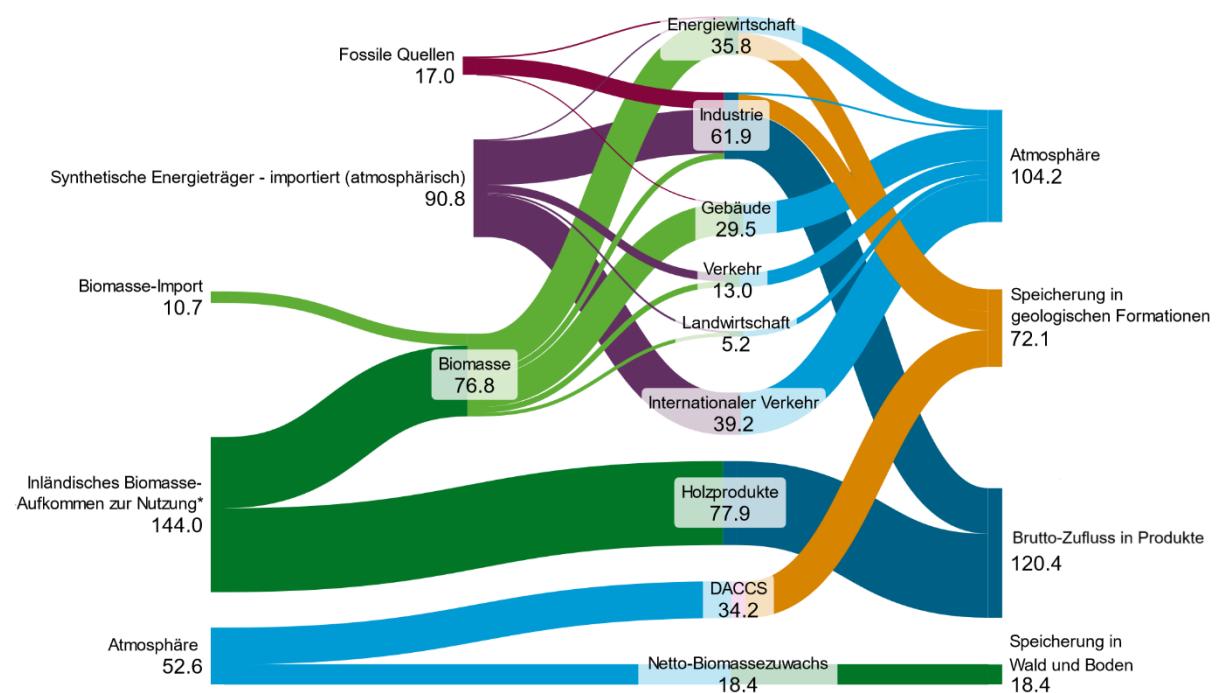
Um aufzuzeigen, welche anderen KSG-Sektoren die Emissionen der Energiewirtschaft verursachen, wurde in Anhang B eine Verursacherbilanz für die Energiewirtschaft berechnet.

2.2.2 Kohlenstoffbilanz

Im Gegensatz zu CARESupreme werden in CARETech bis 2045 noch große Mengen fossiler Energieträger eingesetzt (Abbildung 17). Um trotzdem Treibhausgasneutralität zu erreichen, werden große Mengen an CO₂ mittels technischer Senken gespeichert – durch Direktentnahme aus der Atmosphäre und aus der Energiewirtschaft. Hinzu kommt, dass mittels CCS der Ausstoß fossiler Emissionen aus Produktionsprozessen der Zement- und Kalkindustrie verringert wird. Auch Biomasse wird in der mineralischen Industrie als Brennstoff eingesetzt und zusammen mit prozessbedingtem CO₂ gespeichert. Der LULUCF-Sektor ist eine geringere Senke als in CARESupreme.

³¹ Unter Verwendung der Submission 2024.

Abbildung 17: Kohlenstoffbilanz CARETech 2045 in Mio. t CO₂



Quelle: Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

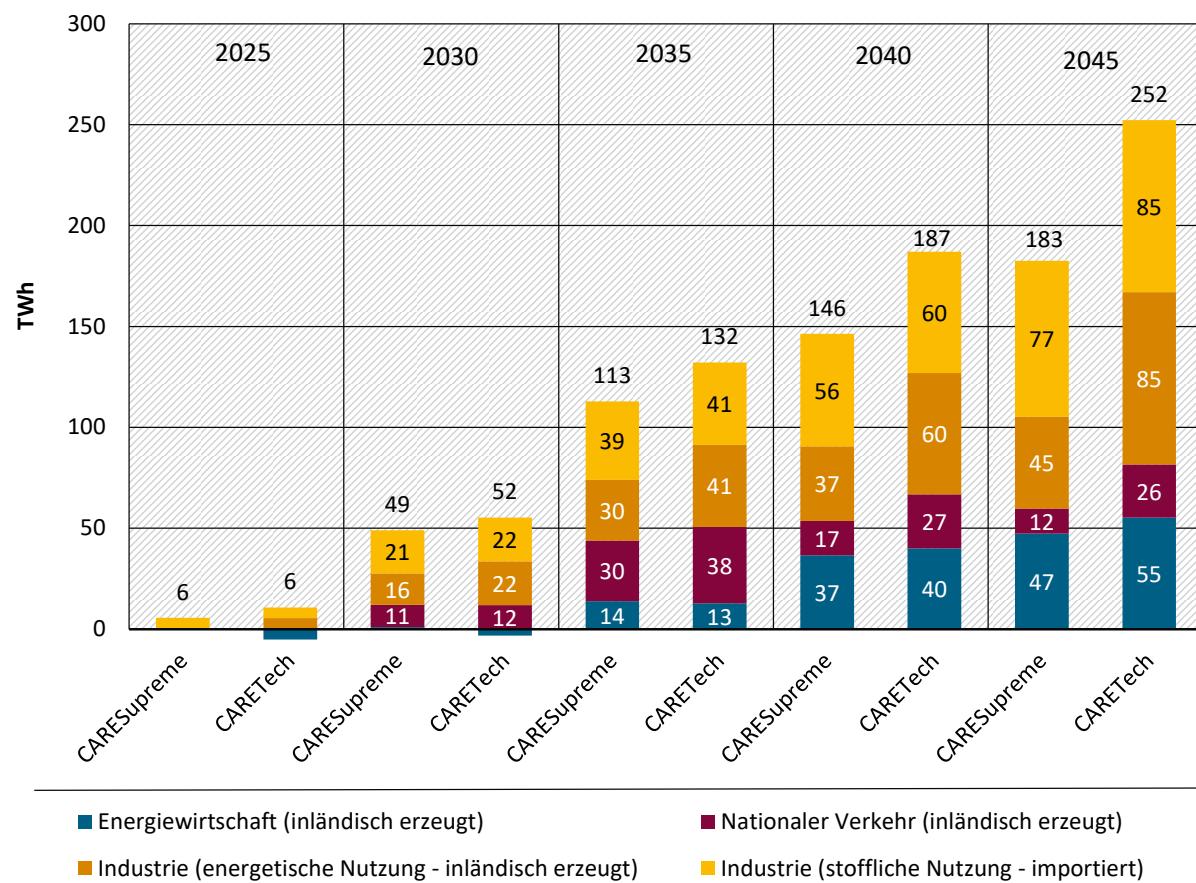
Anmerkung:

*inklusive Biomasserrückflüsse aus alten Holzprodukten.

2.2.3 Nachfrage nach synthetischen Energieträgern

In CARESupreme und CARETech werden Wasserstoff sowie synthetische Flüssiggaskraftstoffe als Ersatz für fossile Energieträger eingesetzt. Abbildung 18 gibt einen Überblick über die eingesetzten Mengen an Wasserstoff. In CARETech ist die Nachfrage in allen Sektoren höher als in CARESupreme. Insbesondere für die energetische Nutzung in der Industrie wird in CARETech mit 85 TWh deutlich mehr Wasserstoff eingesetzt als in CARESupreme mit 45 TWh. Außerdem wird im Verkehr mit 26 TWh in CARETech mehr als doppelt so viel Wasserstoff nachgefragt als in CARESupreme. Mit Ausnahme des Wasserstoffs für die stoffliche Nutzung wird dieser inländisch erzeugt. Dies führt zu einem entsprechend höheren Bruttostromverbrauch in CARETech im Vergleich zu CARESupreme (vgl. Abschnitt 2.2.6).

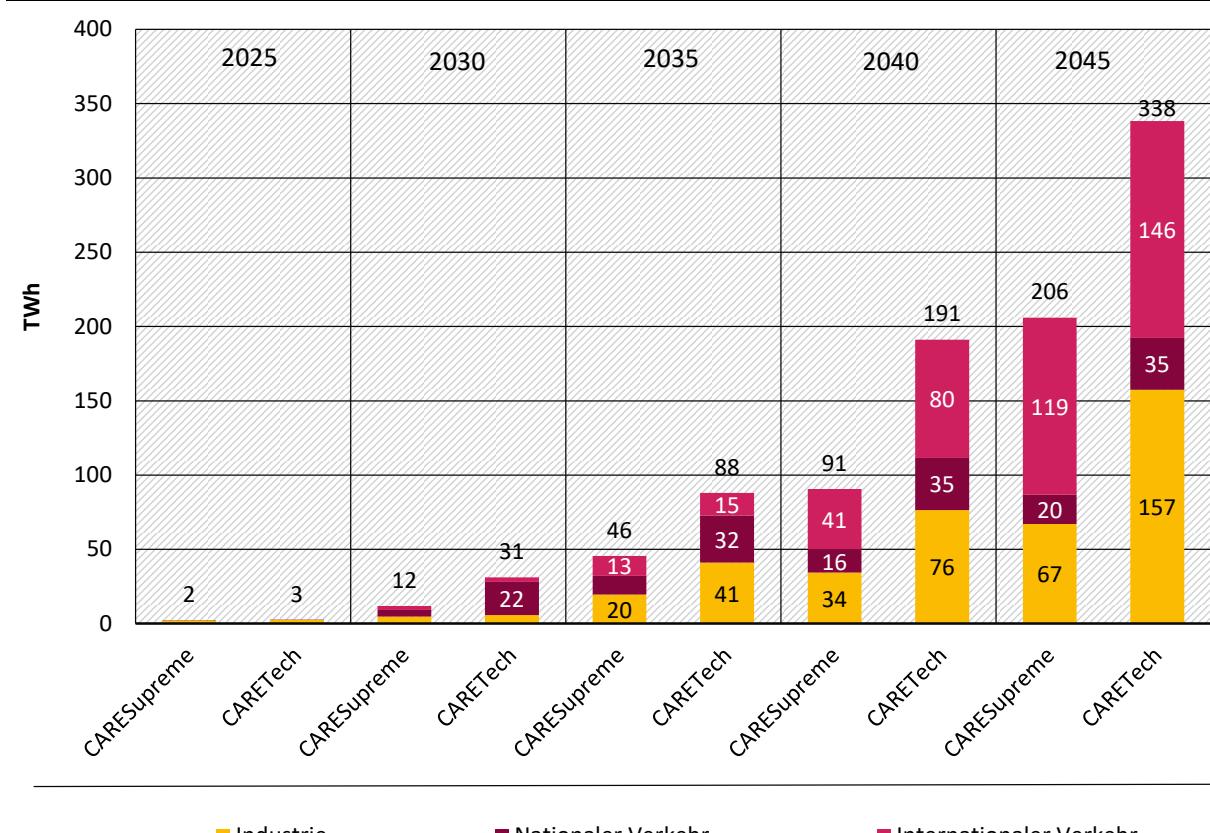
Abbildung 18: Einsatz von Wasserstoff CARESupreme und CARETech, 2025-2045



Anmerkung: In beiden Szenarien wird Wasserstoff für die Energiewirtschaft, für den Verkehr und für die energetische Nutzung in der Industrie in Deutschland hergestellt. Wasserstoff für die stoffliche Nutzung in der Industrie wird importiert.
Quelle: Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Abbildung 19 zeigt den Einsatz von synthetischen Flüssigkraftstoffen im Verlauf der Zeit. Die Industrie fragt in CARETech mit 157 TWh mehr als die doppelte Menge an synthetischen Flüssigkraftstoffen nach als in CARESupreme. Im nationalen Verkehr wird mit 24 TWh in CARETech rund die vierfache Menge im Vergleich zu CARESupreme nachgefragt. Auch die Nachfrage des internationalen Verkehrs ist in CARETech mit 181 TWh höher als in CARESupreme mit 133 TWh. Der erhöhte Einsatz von Flüssigkraftstoffen in diesen Sektoren resultiert aus dem geringeren Fokus auf Suffizienz und Effizienz im Szenario CARETech.

Abbildung 19: Einsatz von synthetischen Flüssigkraftstoffen in CARESupreme und CARETech, 2025-2045



■ Industrie

■ Nationaler Verkehr

■ Internationaler Verkehr

Anmerkung: „PtL für nationalen Verkehr“ enthält auch PtL, das im landwirtschaftlichen Verkehr eingesetzt wird. Sämtliche synthetische Flüssigkraftstoffe werden importiert.

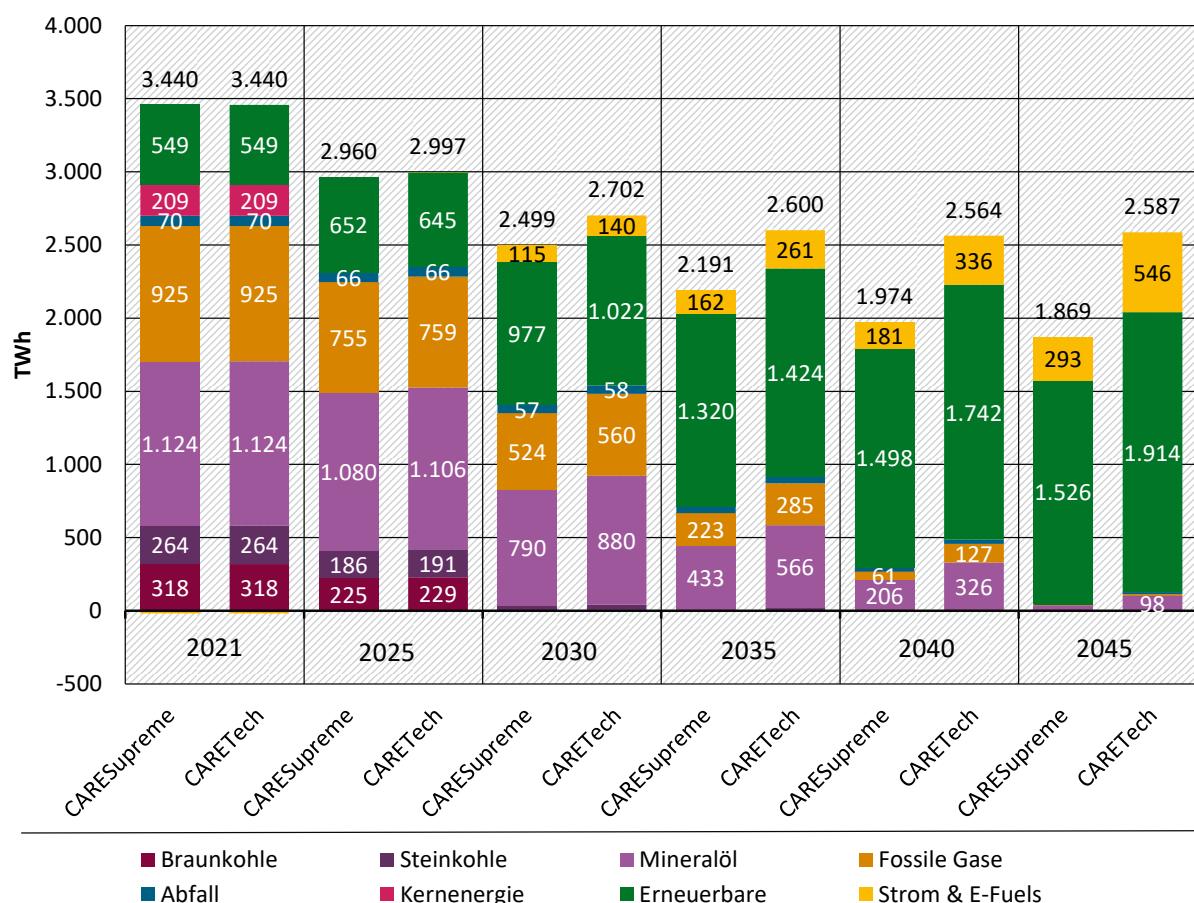
Quelle: Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

2.2.4 Primärenergieverbrauch

2.2.4.1 Primärenergieverbrauch nach Energieträgern

Im Szenario CARETech nimmt der Primärenergieverbrauch im Lauf der Zeit ab, jedoch ist die Reduktion bis 2045 geringer als in CARESupreme (Abbildung 20). Konkret nimmt der Primärenergieverbrauch zwischen 2021 und 2045 in CARETech nur um 24 % ab. Ab 2035 bleibt der Primärenergieverbrauch annähernd konstant. Anders als in CARESupreme werden in CARETech bis 2045 noch relevante Mengen an Mineralöl und fossilen Gasen verbraucht, und E-fuels spielen in CARETech eine größere Rolle.

Abbildung 20: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in CARESupreme und CARETech, 2021-2045



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

Quelle: Brennstoffe: UBA (2023); übrige Energieträger: AGEB (2023a), AGEB (2023b), Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

2.2.4.2 Verbrauch von Biomassebrennstoffen und Abgleich mit Biomasse-Aufkommen

Im Szenario CARETech nutzen die energieverbrauchenden Sektoren im Jahr 2030 in Summe 300 TWh an Biomassebrennstoffen (Tabelle 10). Der Verbrauch an Biomassebrennstoffen sinkt bis zum Jahr 2045 in Summe geringfügig auf 292 TWh ab. Etwa 60 % des Verbrauchs stammt aus festen Biomassebrennstoffen, mit einer leicht abnehmenden Tendenz und einer Verlagerung von Gebäuden hin zur Energiewirtschaft und der Industrie. Der Verbrauch an gasförmigen Biomassebrennstoffen bleibt in Summe etwa konstant, es tritt aber wiederum eine Verlagerung von Gebäuden hin zur Energiewirtschaft auf. Der Verbrauch an flüssigen Biomassebrennstoffen nimmt von 2030 bis 2045 zu. Dies liegt an steigenden Verbräuchen in Gebäuden und der Landwirtschaft. Im Verkehr geht der Verbrauch an flüssigen Biobrennstoffen hingegen leicht zurück (Tabelle 10).

Tabelle 10: Verbrauch an Biomassebrennstoffen in CARETech in TWh, 2030 und 2045

Kategorie Biomassebrennstoff	Sektor	2030	2045
Feste Biomassebrennstoffe	Energiewirtschaft (inkl. Industriekraftwerke)	87,8	89,5

Kategorie Biomassebrennstoff	Sektor	2030	2045
Gasförmige Biomassebrennstoffe	Industrie	18,8	26,5
	Gebäude	91,9	73,3
	Landwirtschaft	1,8	1,8
	Summe	200,3	191,1
Flüssige Biomassebrennstoffe	Energiewirtschaft (inkl. Industriekraftwerke)	45,9	53,0
	Gebäude	11,0	5,0
	Verkehr national	0,4	0,1
	Landwirtschaft	3,7	3,2
	Summe	61,1	61,3
Summe	Industrie	0,5	6,1
	Gebäude	1,2	5,2
	Verkehr national	29,3	21,1
	Landwirtschaft	1,6	6,7
	Verkehr international	5,8	0,0
	Summe	38,7	39,1
Summe	Total (energetisch)	300,1	291,5
Stoffliche Holznutzung	Zufluss in den Holzproduktspeicher*	144,5	165,8
Zwischensumme	Feste Biomassebrennstoffe und Zufluss in den Holzproduktspeicher	344,8	356,9
Summe	Total (energetisch und Zufluss in den Holzproduktspeicher)	444,6	457,3

Anmerkung: Der Verbrauch an Biomasse gesamt entspricht dem Primärenergieverbrauch. Gemäß der AGEB-Definition ist der Einsatz im internationalen Schiffsverkehr hier nicht enthalten. Der Einsatz biogener Brennstoffe (Biodiesel) im internationalen Schiffsverkehr beträgt 0,2 TWh im Jahr 2030 und 0,5 TWh im Jahr 2045. *Für die Umrechnung von Mengenflüssen in den Holzproduktspeicher (siehe Abschnitt 9.2.3) wird ein Faktor von 8.100 MJ/m³ angenommen.

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Das inländische Aufkommen an Biomassebrennstoffen im Szenario CARETech ist in Tabelle 11 dargestellt. Für feste und gasförmige Biomassebrennstoffe kann der Großteil der Biobrennstoffnachfrage aus inländischen Quellen gedeckt werden, es treten aber geringe Importe bzw. Exporte auf (Tabelle 11). Beim Aufkommen an festen Biomassebrennstoffen nehmen Rest- und Abfallstoffe den größten Anteil ein, gefolgt von Waldholz und Sägenebenprodukten. Da zum Senkenaufbau weniger Laubholz aus dem Wald geerntet wird und vermehrt Wald- sowie Rest- und Abfallholz stofflich genutzt wird, geht im Szenario CARETech die Menge an festen Biomassebrennstoffen leicht zurück. Das Aufkommen an gasförmigen

Biomassebrennstoffen bleibt konstant, Biogas aus Anbaubiomasse nimmt aber ab und gasförmige Biobrennstoffe aus Wirtschaftsdünger und Rest- und Abfallstoffe nehmen von 2030 bis 2045 zu. Die Anbaubiomasse für flüssige Biomassebrennstoffe geht von 17 TWh im Jahr 2030 auf null im Jahr 2045 zurück, und die Mengen an flüssigen Biomassebrennstoffen aus Rest- und Abfallstoffen und insbesondere die Importe nehmen zu (Tabelle 11).

Tabelle 11: Aufkommen an Biomassebrennstoffen in CARETech in TWh, 2030 und 2045

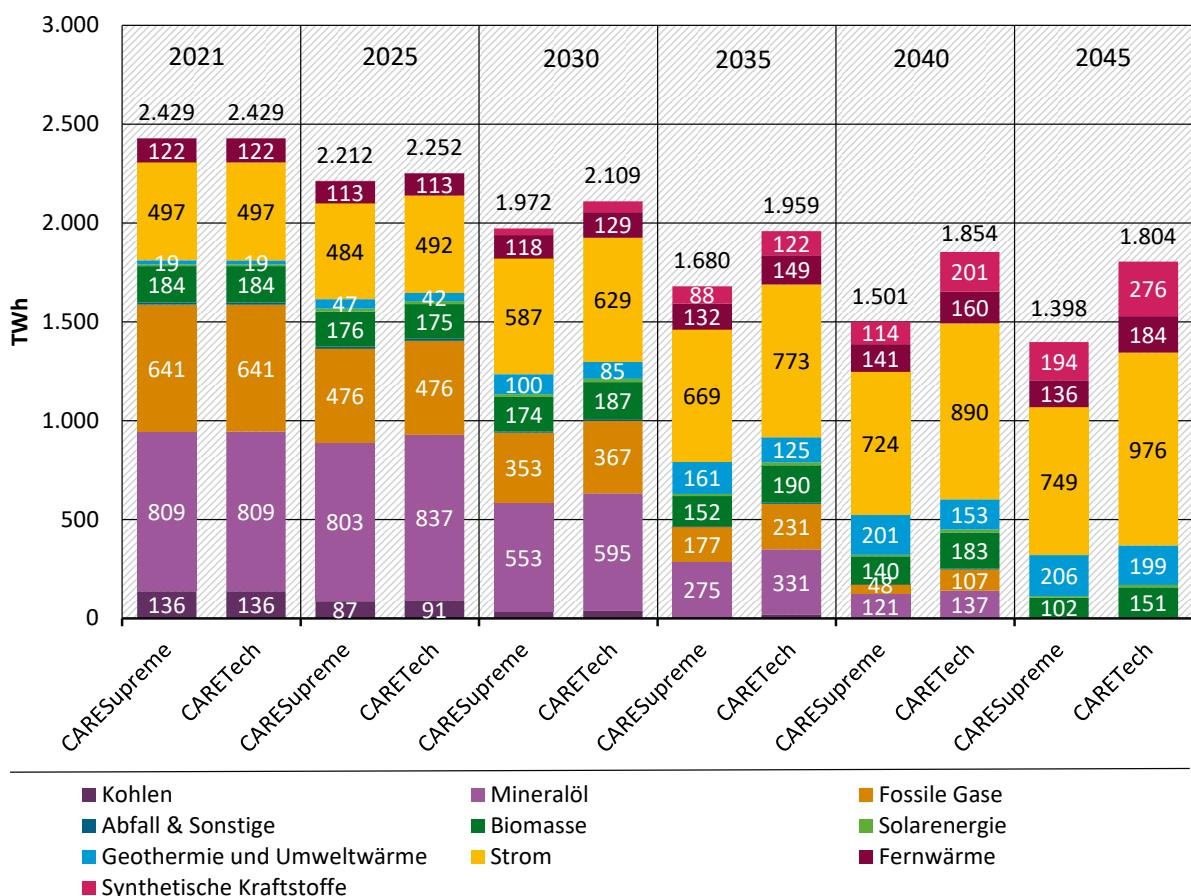
Kategorie Biomassebrennstoff	Biomassebrennstoff	2030	2045
Feste Biomassebrennstoffe	Waldholz inkl. Restholz und Rinde	55,1	46,2
	Sägenebenprodukte	21,4	17,3
	Rest- und Abfallstoffe	117,9	103,9
	Agroforst	1,3	14,5
	Paludikultur	0,8	9,7
	Netto-Import	3,9	-0,5
	Summe	200,3	191,1
Gasförmige Biomassebrennstoffe	Anbaubiomasse	36,1	29,8
	Wirtschaftsdünger	8,6	13,9
	Rest- und Abfallstoffe	16,2	17,7
	Netto-Import	0,1	0,0
	Summe	61,1	61,4
Flüssige Biomassebrennstoffe	Anbaubiomasse	17,2	0,0
	Rest- und Abfallstoffe	1,0	6,1
	Netto-Import	20,5	33,0
	Summe	38,7	39,1
Summe	Inländisch	230,5	219,7
	Netto-Importe	24,3	39,3
	Total	300,1	291,5

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut. *Negative Werte für den Netto-Import stellen einen Netto-Export dar.

2.2.5 Endenergieverbrauch

So wie der Primärenergieverbrauch, nimmt auch der Endenergieverbrauch im Szenario CARETech weniger stark ab als in CARESupreme (Abbildung 21). Insbesondere der Stromverbrauch spielt in CARETech eine größere Rolle – mit 976 TWh im Vergleich zu 749 TWh in CARESupreme im Jahr 2045. Auch der Verbrauch von Biomasse ist mit 155 TWh in CARETech höher als in CARESupreme mit 99 TWh.

Abbildung 21: Endenergieverbrauch nach Energieträgern in CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: Brennstoffe: UBA (2023); übrige Energieträger: AGEB (2023a), AGEB (2023b); Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Der Endenergieverbrauch nach Sektoren in CARETech ist in Tabelle 12 dargestellt. Von 2021 bis 2030 nimmt der EEV insgesamt um 13 % ab; von 2021 bis 2045 um 26 %. Im Vergleich zu CARESupreme weisen insbesondere die Haushalte in CARETech einen höheren Endenergieverbrauch auf. Dieser liegt im Jahr 2045 um 46 % über dem EEV in CARESupreme. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass in CARETech der Fokus auf Effizienzsteigerung geringer ist. Der EEV der Industrie ist im Jahr 2045 in CARETech um 32 % höher als in CARESupreme, unter anderem weil in CARETech mehr energieintensive Grundstoffe hergestellt werden.

Tabelle 12: Endenergieverbrauch nach Sektoren in CARETech, 2021-2045

Sektor	2021	2025	2030	2035	2040	2045	Veränderung im Vergleich zu CARESupreme (2045)
TWh							
Industrie	711	618	646	649	658	684	+32 %
GHD	349	311	285	265	240	216	+5%
Haushalte	716	621	571	523	481	449	+46 %

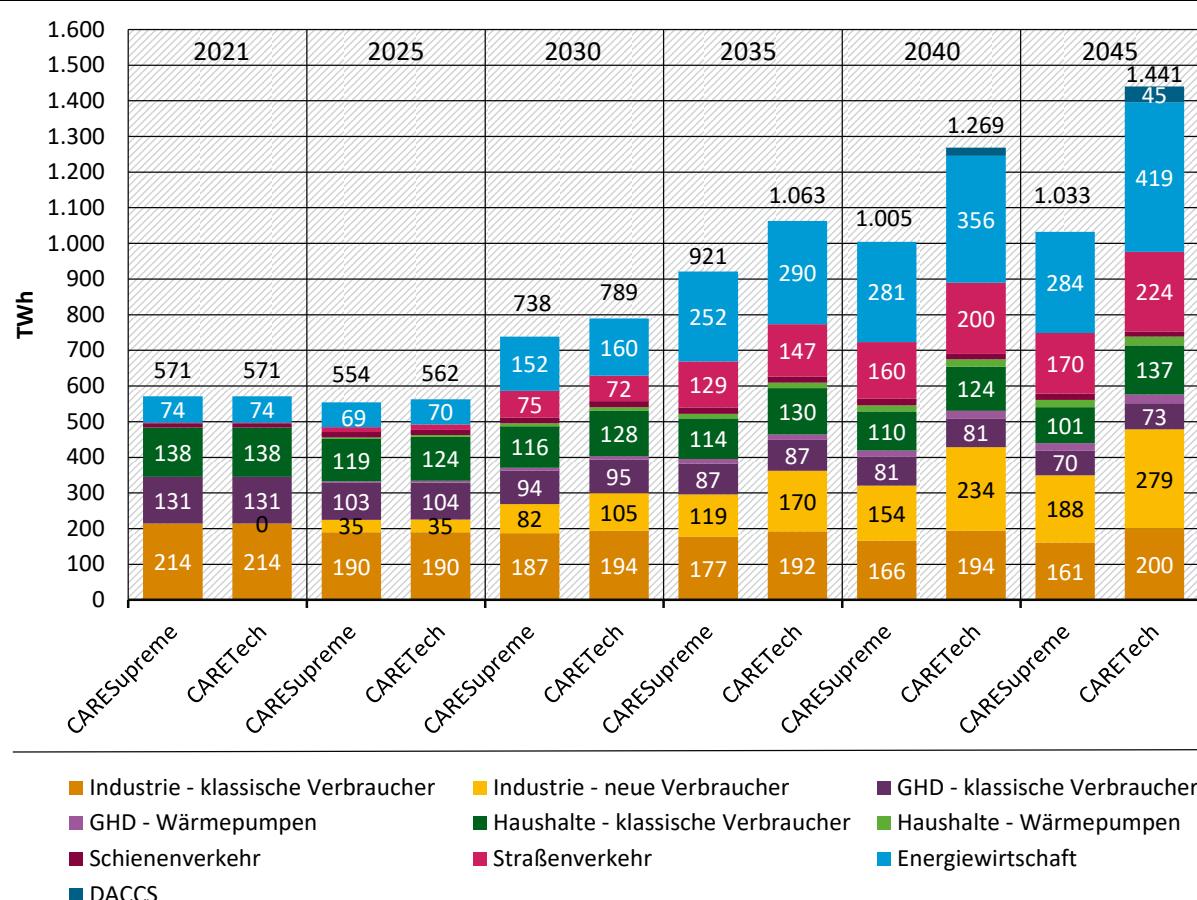
Sektor	2021	2025	2030	2035	2040	2045	Veränderung im Vergleich zu CARESupreme (2045)
Verkehr	652	703	607	522	475	455	+25%
Gesamt	2.429	2.252	2.109	1.959	1.854	1.804	+29 %

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

2.2.6 Bruttostromverbrauch

Der Bruttostromverbrauch nimmt in CARETech stärker zu als in CARESupreme. Im Jahr 2030 ist er mit 789 TWh um 7 % höher als in CARESupreme, und 2045 erreicht der Bruttostromverbrauch in CARETech 1.441 TWh (Abbildung 22). Dies sind über 400 TWh bzw. rund 40 % mehr als in CARESupreme. In CARETech ist insbesondere der Stromverbrauch neuer Verbraucher wie Wärmepumpen in der Industrie höher, und die Energiewirtschaft fragt mehr Strom für die Wasserstoffherstellung nach. Außerdem besteht ein zusätzlicher Stromverbrauch für die Abscheidung und Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre.

Abbildung 22: Bruttostromverbrauch nach Endverbrauchern in CARESupreme und CARETech, 2021–2045



Quelle: AGEB (2023a), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Anmerkung: Der Endenergieverbrauch ist die Summe aller Verbräuche ohne Energiewirtschaft.

3 Energiewirtschaft

3.1 CARESupreme

3.1.1 Narrativ

Der Sektor Energiewirtschaft umfasst die Umwandlung und Speicherung sowie den Transport von Energieträgern. Der bei Weitem größte Anteil der Treibhausgasemissionen hierbei entfiel 2021, sowie auch in den Jahren davor, auf die Strom- und gekoppelte Fernwärmeerzeugung aus fossilen Brennstoffen. Darüber hinaus wird die Umwandlung in Raffinerien und Kokereien sowie Transport und Lagerung von Brennstoffen dem Sektor Energiewirtschaft zugerechnet. Kraftwerke zur Strom- und gekoppelten Wärmeerzeugung, die vor allem zur Versorgung von Produktionsbetrieben des verarbeitenden Gewerbes dienen, sind dem Sektor Industrie zugeordnet.

Im Sektor Energiewirtschaft findet vor allem die Energieerzeugung zur Befriedigung des Energieverbrauchs der anderen Sektoren statt. Daher schlägt sich der Suffizienzgedanke von CARESupreme weniger direkt, sondern indirekt nieder, etwa durch einen verhältnismäßig geringen Anstieg der Strom- und Fernwärmennachfragen.

In CARESupreme wird die Energiewirtschaft besonders zügig dekarbonisiert, auch im Vergleich der Sektoren. Das an das Bundes-Klimaschutzgesetz angelehnte Sektorziel von höchstens 108 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 wird deutlich unterschritten. Im Jahr 2035 schließlich, und danach, erfolgt die Strom- und Fernwärmeerzeugung nahezu treibhausgasneutral. Dies impliziert, dass bis dahin ein Ausstieg aus der Nutzung von Kohle und ein weitgehender Ausstieg aus der Nutzung von Erdgas erfolgt ist und nur geringe Restemissionen, etwa aus der Abfallverbrennung, anfallen.

Auf dem Pfad der Dekarbonisierung stammt der notwendige Strom größtenteils aus inländischer erneuerbarer Erzeugung aus Wind- und Solarenergie. Ebenso wird die Bereitstellung von Fernwärme auf erneuerbare Quellen umgestellt. Die energetische Nutzung der Biomasse geht dabei langfristig auf anfallende Rest- und Abfallstoffe zurück. Die notwendige Flexibilität wird bereitgestellt durch einen Ausbau der Speicherkapazitäten – vor allem der Batteriespeicher –, durch eine zeitliche Flexibilisierung der Nachfrage – auch bei der anstehenden Elektrifizierung der Sektoren Industrie, Verkehr und Gebäude – sowie den zeitnahen Aufbau flexibler Elektrolysekapazitäten in Verbindung mit langfristigen Wasserstoffspeichern und der Umstellung von Gaskraftwerken auf Wasserstoff.

Zur Bereitstellung von Flexibilität dient ebenso der stündliche Stromtausch mit dem europäischen Ausland, welches auch einem ambitionierten Dekarbonisierungspfad in der Stromerzeugung folgt. Es wird angestrebt, Netto-Importe von Strom, in dem Sinne, dass Deutschland über das Jahr hinweg strukturell große Volumina importieren muss, zu vermeiden und auf einen ausgeglichenen oder negativen Importsaldo abzustellen. Importe von Wasserstoff sind nur für die Befriedigung der Nachfrage für die stoffliche Nutzung in der Industrie zulässig. Wasserstoff für die energetische Nutzung wird über Elektrolysekapazitäten und entsprechende Erzeugung in Deutschland gedeckt. Andere strombasierte Kraft- und Brennstoffe (auch bezeichnet als *Power-to-Liquid*, PtL, und *Power-to-Gas*, PtG) werden hingegen größtenteils importiert.

Aufgrund der Beschlusslage durch §3b im Bundes-Klimaschutzgesetz aus dem Jahr 2024 und sich abzeichnender Unsicherheiten bei der Realisierung der Waldsenke (Hennenberg et al.

2024), wurde in CARESupreme ebenfalls die Nutzung von WACCS und BECCS zugelassen, um einen entsprechenden Treibhausgaspuffer vorzuhalten.

3.1.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

- ▶ Ausstieg aus fossilen Brennstoffen in der Strom- und gekoppelten Fernwärmeerzeugung: Kohlekraftwerke bis 2030, Erdgas- und Ölkraftwerke bis 2035.
- ▶ Ausbau von Wasserstoffkraftwerken ab 2025: gemäß den Ausschreibungen im EEG 2023 sowie der Kraftwerksstrategie³² und entsprechender Fortschreibung wird bis 2045 eine installierte Leistung von knapp 20 GW erreicht.
- ▶ Aufbau von Carbon Capture-Anlagen für die Erzeugung von Negativ-Emissionen ab 2035: 60 % der installierten Leistung von Müll-Heizkraftwerken im Jahr 2045 sind mit Carbon Capture-Anlagen zur anschließenden Speicherung ausgestattet.
- ▶ Beschleunigter Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG)): im Jahr 2045 160 GW Windkraft an Land, 70 GW Windkraft auf See sowie 400 GW Photovoltaik.
- ▶ Dekarbonisierung der Fernwärme (kommunale Wärmeplanung, Verpflichtung öffentlicher Eigentümer, Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW)): im Jahr 2045 rund 59 GW, davon 13 GW Solarthermie, rund 17 GW Großwärmepumpen und 22 GW Power-to-Heat.
- ▶ Ausbau der Elektrolyse: im Jahr 2045 35 GW Elektrolyseure³³.
- ▶ Umstellung von einem Erdgasnetz auf ein Wasserstoffnetz

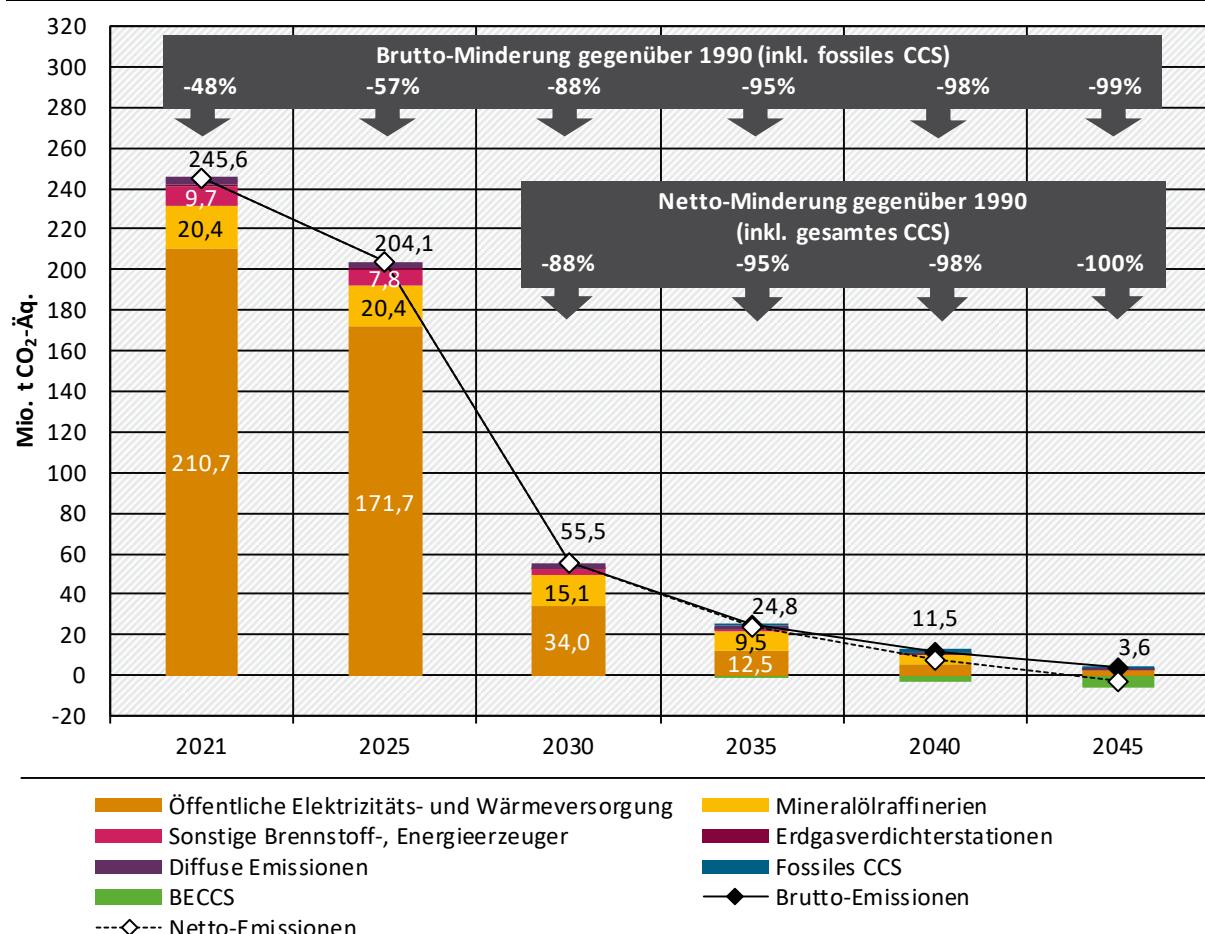
Eine detaillierte Beschreibung sowie deren Parametrisierung aller berücksichtigten Instrumente kann Anhang A entnommen werden.

³² BMWK 05.02.2024.

³³ Die Leistung ergab sich aus der Deckung der stofflichen H₂-Nachfrage.

3.1.3 Zentrale Ergebnisse

Abbildung 23: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft, CARESupreme, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 13: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	210,7	171,7	34,0	13,0	7,5	4,2
Mineralölraffinerien	20,4	20,4	15,1	9,5	4,4	0,0
Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	9,7	7,8	3,1	0,9	0,2	0,1
Erdgasverdichterstationen	0,8	0,7	0,6	0,2	0,0	0,0
Diffuse Emissionen	4,0	3,4	2,6	1,7	1,0	0,6
Erzeugte Emissionen	245,6	204,1	55,5	25,3	13,1	4,9
Fossiles CCS						
Fossiles WACCS	0,0	0,0	0,0	(-0,5)	(-1,7)	(-1,3)

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Brutto-Emissionen (inkl. fossiles CCS)	245,6	204,1	55,5	24,8	11,5	3,6
<i>Brutto-Minderung gegenüber 1990</i>	-48,3 %	-57,0 %	-88,3 %	-94,8 %	-97,6 %	-99,2 %
Technische Negativemissionen						
BECCS aus fester Biomasse ³⁴	0,0	0,0	0,0	-0,6	-3,3	-5,9
WACCS von Kunststoffen auf Basis von atmosphärischem CO ₂ (nicht bilanziert) ³⁵	0,0	0,0	0,0	0,0	(-)0,3	(-)1,3
Netto-Emissionen (inkl. fossiles CCS und BECCS)	245,6	204,1	55,5	24,3	8,2	-2,3
<i>Netto-Minderung gegenüber 1990</i>	-48,3 %	-57,0 %	-88,3 %	-94,9 %	-98,3 %	-100,5 %
Gesamt gespeicherte CO₂ (CCS, BECCS, WACCS)	0,0	0,0	0,0	(-)1,0	(-)5,2	(-)8,5

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Die Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft werden in CARESupreme im Jahr 2045 gegenüber 1990 um 101 % gemindert (Abbildung 23, Tabelle 13). Der größte Teil der Emissionsminderung erfolgt in der öffentlichen Strom- und Wärmeerzeugung und bereits bis 2030. Aufgrund des nicht-fossilen Anteils an der CO₂-Abscheidung und -Einlagerung in Müllheizkraftwerken (WACCS) ergibt sich im Jahr 2045 eine Netto-Senke.

Stromverbrauch und Stromerzeugung

Die installierte Leistung wird auf Basis der vorgesehenen Instrumente sowie zur Erreichung vorgegebener Ziele³⁶ exogen vorgegeben und ist Input der Modellrechnungen, sie ist in Abbildung 24 und Tabelle 14 detailliert dargestellt. Fossile Kraftwerke werden gemäß einem vorgegebenen Pfad stillgelegt: Kohlekraftwerke bis 2030, Erdgas- und Ölkkraftwerke der öffentlichen Versorgung bis 2035. Es verbleiben wenige KWK-Anlagen am Netz, um die Wärmenachfrage der Industrie zu decken. Der Ausbau der erneuerbaren Energien erfüllt die im EEG 2023 festgeschriebenen Ausbauziele.

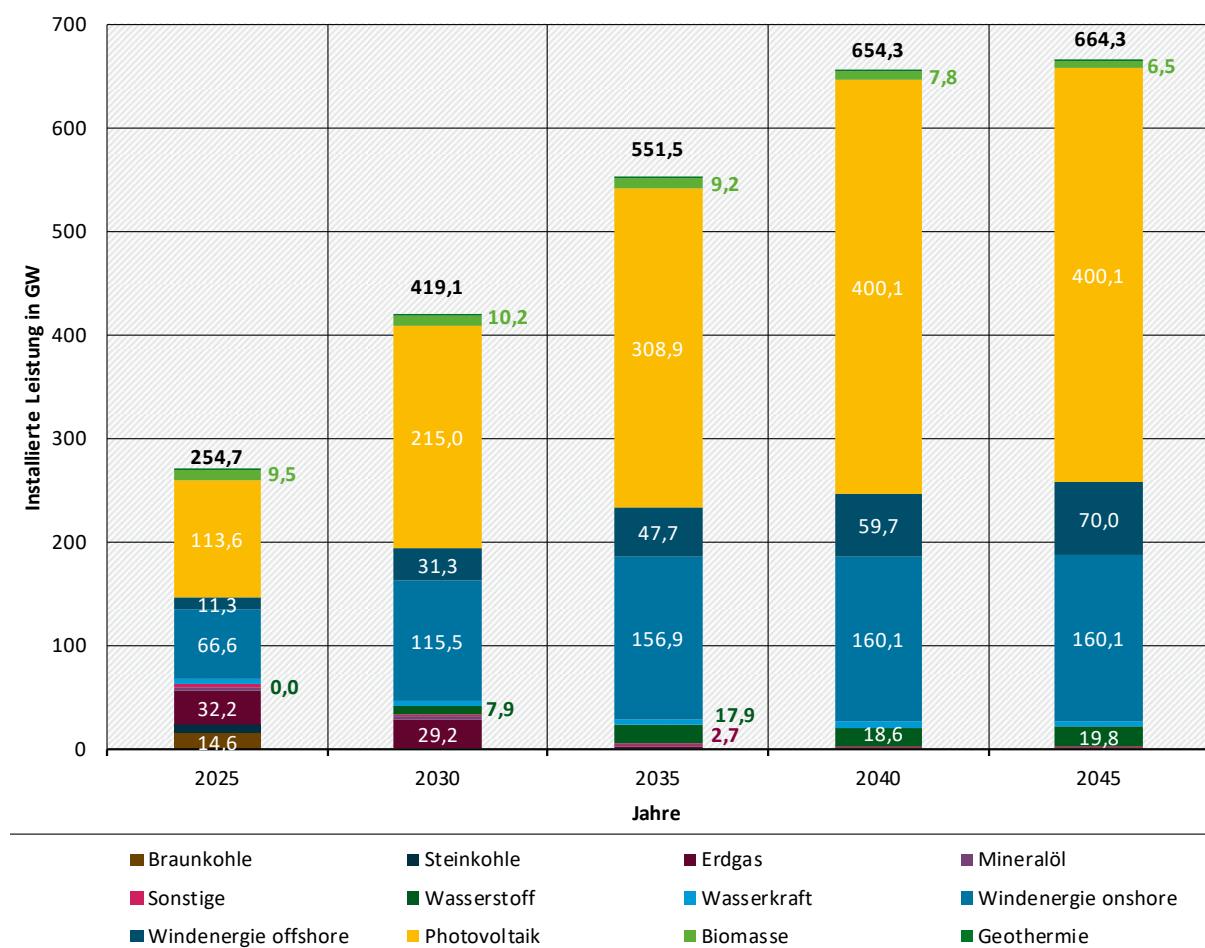
Wasserstoffkraftwerke werden ebenfalls gemäß den Ausschreibungen im EEG 2023 sowie der Kraftwerksstrategie (BMWK 05.02.2024) zugebaut; es wird im Jahr 2045 eine installierte Leistung von knapp 20 GW erreicht. Batterien, der Logik des Projektionsberichts 2024 (Harthan et al. 2024) folgend, werden proportional zum Zubau von Photovoltaik und Windenergieanlagen an Land zugebaut.

³⁴ In CARESupreme geschieht CCS nur in Müllheizkraftwerken. Bei der festen Biomasse handelt es sich um den biogenen Anteil des Abfalls.

³⁵ In CARESupreme und CARETech werden die Ausgangsstoffe für Kunststoffe auf Basis von atmosphärischem Kohlenstoff importiert. Die Senke entsteht im Ausland und die Einspeicherung im Inland wird nicht bilanziert.

³⁶ Treibhausgasminderung, Bereitstellung von Negativemissionen, Erfüllung der Nachfrage nach Strom, Fernwärme und in Deutschland produziertem Wasserstoff.

Abbildung 24: Entwicklung der installierten Leistung im Szenario CARESupreme, 2025-2045



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Der Kohleausstieg ist bis zum Jahr 2030 vollzogen. Die Erdgasleistung nimmt bis 2030 nur geringfügig ab; zwischen 2030 und 2035 geht sie sehr stark zurück, es verbleiben nur noch wenige Kraftwerke. Die erneuerbaren Energien (vor allem Wind und Solarenergie) werden entsprechend dem EEG-Pfad ausgebaut. Der Batterieausbau ist an den Ausbau von PV und Windanlagen an Land geknüpft. Die Leistung der Elektrolyseure orientiert sich bis 2030 am Pfad des Projektionsberichts 2024 (Harthan et al. 2024), lässt jedoch durch einen deutlich stärkeren Zubau in den Folgejahren eine höhere Flexibilität des Einsatzes zu; im Jahr 2045 liegt die installierte Leistung dennoch rund 40 % unter der in den Langfristszenarien (Fraunhofer ISI; Consentec; ifeu; TU Berlin Fachgebiet E&R 2024) abgeschätzten installierten Leistung von 58 GW³⁷. Dies liegt daran, dass die Wasserstoffproduktion in den Langfristszenarien höher ist, während in CARESupreme ein Teil (für stoffliche Zwecke) importiert wird.

Tabelle 14: Entwicklung der installierten Leistung im Szenario CARESupreme in GW, 2025-2045

	2025	2030	2035	2040	2045
Braunkohle	14,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0

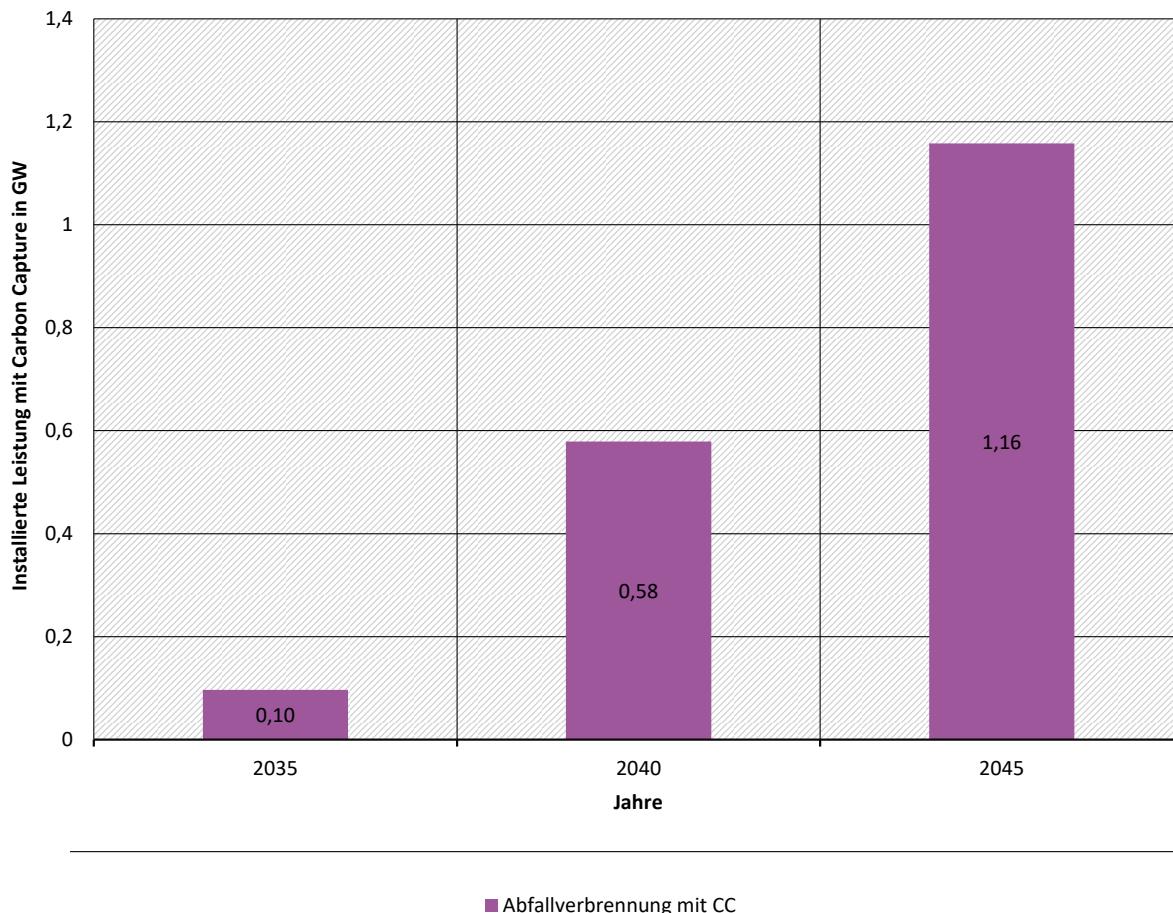
³⁷ Szenario 045-Strom.

	2025	2030	2035	2040	2045
Erdgas	32,2	29,2	2,7	0,0	0,0
Mineralöl	2,7	1,7	0,4	0,1	0,0
Sonstige	3,9	2,8	2,2	2,1	2,0
Wasserkraft	5,4	5,4	5,5	5,5	5,5
Windenergie an Land	66,6	115,5	156,9	160,1	160,1
Windenergie auf See	11,3	31,3	47,7	59,7	70,0
Photovoltaik	113,6	215,0	308,9	400,1	400,1
Biomasse	9,6	7,4	6,1	1,6	1,2
Geothermie	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Wasserstoff	0,0	7,9	17,9	18,6	19,8

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Um einen Sicherheitspuffer für Negativ-Emissionen sicherzustellen, wurde in CARESupreme ab 2035 Carbon Capture-Anlagen in Müllheizkraftwerken errichtet (WACCS). Im Jahr 2045 sind 60 % der installierten Leistung von Müll-Heizkraftwerken mit solchen Abscheideanlagen ausgestattet. Abbildung 25 zeigt die daraus resultierende installierte Leistung von Müll-Heizkraftwerken mit diesen Abscheideeinrichtungen. Während 2035 weniger als 100 MW mit solchen Anlagen ausgestattet sind, sind es 2045 bereits rund 1,2 GW.

Abbildung 25: Entwicklung der installierten Leistung von Müll-Heizkraftwerken, die mit Carbon Capture ausgestattet sind, CARESupreme, 2035-2045



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

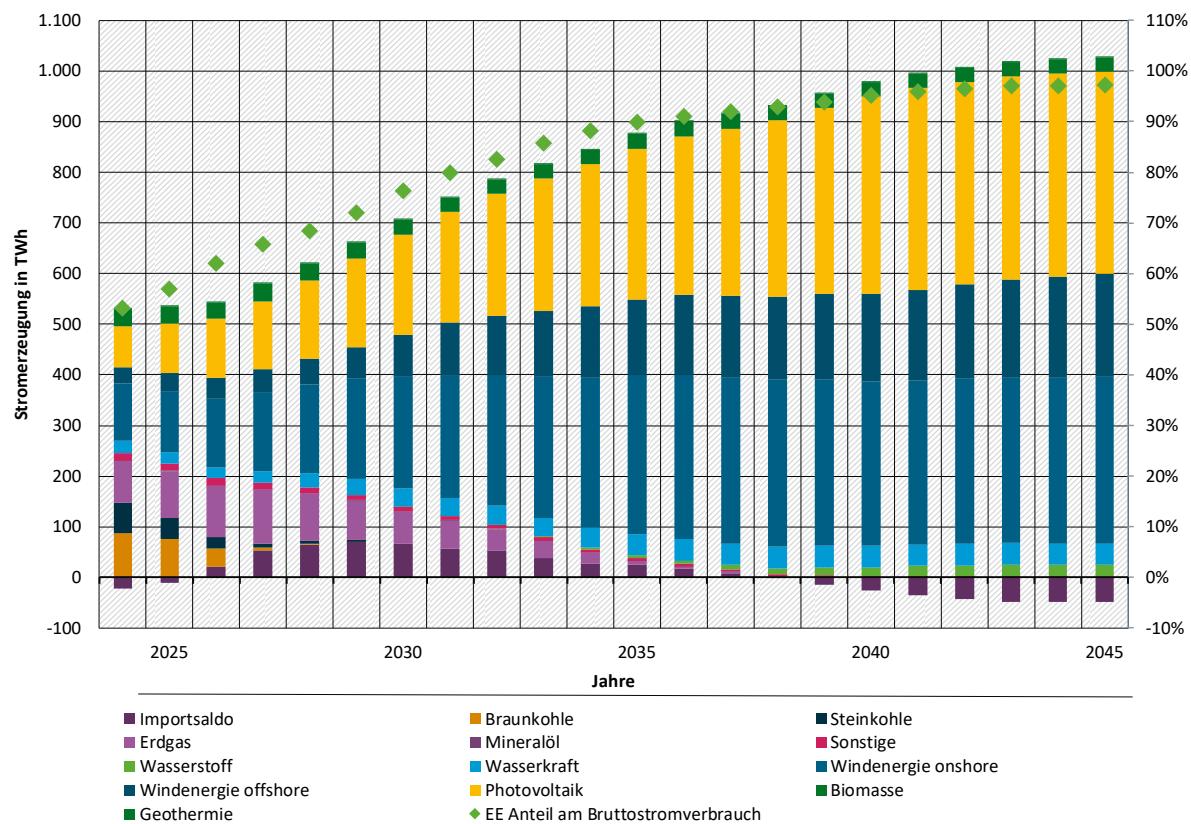
Abbildung 26 sowie Tabelle 15 zeigen die projizierte Entwicklung der Nettostromerzeugung. Es ist zunächst auffällig, dass sich die Stromerzeugung in etwa verdoppelt im betrachteten Zeitraum bis 2045. Wie bereits zuvor beschrieben steigt die Nachfrage der Verbrauchssektoren stark an. Diese abrupte und starke Zunahme des Stromverbrauchs kann vom existierenden Stromsystem nicht leicht aufgefangen werden. Um den Strombedarf zu decken, wird ein ambitionierter Ausbau der erneuerbaren Erzeugungstechnologien entlang der Ausbauziele von EEG 2023 und WindSeeG angenommen, dieser ist jedoch nicht rasch genug, um die erhöhte Nachfrage inländisch decken zu können, sodass ab 2026 Netto-Stromimporte benötigt werden. Der Importsaldo steigt auf bis zu rund 70 TWh im Jahr 2030 an und bleibt positiv bis 2038. Danach ist Deutschland wieder ein Netto-Stromexporteur, wobei sich die Exporte bis 2045 bei etwa 50 TWh einpendeln.

Die Stilllegungen der fossilen Kraftwerke korreliert mit der Zunahme des Stromimports. Obwohl auch die Einspeisung von erneuerbar erzeugtem Strom stark zunimmt, liegt der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch³⁸ erst im Jahre 2031 bei 80 %. Dies liegt darin begründet, dass der Bruttostromverbrauch zwischen 2025 und 2035 stark zunimmt, vor allem in den Bereichen Verkehr (Elektrofahrzeuge), Industrie und für die Produktion von Wasserstoff (Abbildung 11, Tabelle 5). Batteriespeicher und DSM tragen zur Integration der Erneuerbaren bei. So stammen

³⁸ Hier ist zu berücksichtigen, dass der Einsatz von Speichern (sowohl Pump- als auch Batteriespeicher) zwar über ihren die Stromaufnahme den Gesamtbruttostromverbrauch erhöhen und damit ebenso wie Nettoimporte, bei gleichbleibender EE-Einspeisung, den EE-Anteil am Bruttostromverbrauch senken.

im Jahr 2045 rund 40 TWh Strom aus diesen Speicher- und Flexibilisierungsmaßnahmen. Wasserstoffkraftwerke tragen mit rund 25 TWh im Jahr 2045 verhältnismäßig wenig zur Stromerzeugung bei. Um dies besser zu verstehen, wird im Folgenden die Auslastung der Elektrolyseure in Deutschland in Kombination mit der Nachfrage nach Wasserstoff betrachtet (Tabelle 16).

Abbildung 26: Entwicklung der Nettostromerzeugung im Szenario CARESupreme, 2024-2045



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Tabelle 15: Entwicklung der Nettostromerzeugung im Szenario CARESupreme, 2025-2045

	2025	2030	2035	2040	2045
TWh					
Braunkohle	76	-	-	-	-
Steinkohle	42	-	-	-	-
Erdgas	92	64	7	-	-
Mineralöl	1	1	0	0	-
Sonstige	14	9	5	3	1
Wasserkraft inkl. PSW	22	34	41	42	42
Windenergie an Land	121	221	315	324	329
Windenergie auf See	35	84	149	174	203

	2025	2030	2035	2040	2045
Photovoltaik	98	198	297	389	400
Biomasse	34	29	29	29	28
Geothermie	0	0	1	1	1
Wasserstoff	-	1	6	17	23
Batterien	3	12	21	25	26
DSM	0	2	6	9	12
Importsaldo	-12	67	26	-26	-48
Nettostromerzeugung ohne Speicher	534	629	837	969	1.022
EE-Anteil am Bruttostromverbrauch	57 %	76 %	90 %	95 %	97 %

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Ein negatives Vorzeichen des Importsaldos zeigt einen Netto-Export an.

Die Elektrolyseure müssen komplett die inländische Nachfrage nach Wasserstoff zur energetischen Nutzung (in Verkehr, Industrie und in Kraftwerken) bedienen, da Importe für diesen Zweck exogen ausgeschlossen wurden (Abschnitt 3.1.1). Wird der in der Fortschreibung der Wasserstoffstrategie angestrebte Aufbau von 10 GW bis 2030 Elektrolysekapazität erreicht und erfolgt in den weiteren Jahren ein weiterer ambitionierter Ausbau auf 30 GW im Jahr 2035, bleiben die Vollbenutzungsstunden der Anlagen mit rund 3.800 (2030) bzw. rund 3.300 (2035) unter 4.000 pro Jahr. Damit können die Anlagen in Kombination mit dem zur Verfügung stehenden Wasserstoffspeicher flexibel eingesetzt werden. Zunächst fokussiert die Wasserstofferzeugung auf die Bereitstellung für die Endverbrauchssektoren, erst ab 2035 steigt auch der Anteil des in Kraftwerken eingesetzten Wasserstoffs deutlich an und macht im Jahr 2045 rund 45 % der Wasserstoffnachfrage aus. Diese zunehmende Bedeutung wird auch anhand der Volllaststunden der Wasserstoffkraftwerke deutlich, die nach 2035 ansteigen und ab 2040 bei rund 1.000 und darüber liegen. Die Stromerzeugung aus Wasserstoff-Kraftwerken ist mit rund 25 TWh im Jahr 2045 jedoch nur begrenzt. Erst nachdem die Wasserstoffnachfrage aus Endverbrauchssektoren in eine Sättigung eintritt (ab 2035) sowie ausreichend Wasserstoffspeicher und Wasserstoffkraftwerke zur Verfügung stehen (ab 2035), kann die Wasserstoffverstromung ansteigen. Die Wasserstoffverstromung bleibt auch deshalb begrenzt, da zunächst die Stromerzeugung durch günstige Erneuerbare Energien genutzt wird (Tabelle 15).

Tabelle 16: Flexibilitäten: Installierte Leistung der Elektrolyseure, Volllaststunden, Wasserstoffproduktion (für Endverbrauchersektoren und Rückverstromung), Kapazität der Wasserstoffspeicher, sowie Kapazität, Stromerzeugung und Volllaststunden von Wasserstoffkraftwerken nebst Kapazitäten und Stromerzeugung aus Speichern und DSM, Szenario CARESupreme, 2025-2045

	2025	2030	2035	2040	2045
Elektrolyseure – Leistung [GW]	4,8	10,0	30,0	32,5	35,0
Volllaststunden [h]	86	3.812	3.285	3.715	4.006

	2025	2030	2035	2040	2045
Wasserstoffproduktion [TWh]	0,3	27,6	73,9	90,6	105,2
<i>Wasserstoffproduktion für Endverbraucher [TWh]</i>	0,3	26,6	60,1	54,0	57,9
<i>Wasserstoffproduktion für Rückverstromung [TWh]</i>	-	1,0	13,5	36,2	46,9
Kapazität der Wasserstoffspeicher [TWh]	0,3	6,7	20,0	30,0	40,0
Kapazität Wasserstoffkraftwerke [GW]	-	7,9	17,9	18,6	19,8
Stromerzeugung in Wasserstoffkraftwerken [TWh]	-	0,5	6,0	16,8	23,2
Vollaststunden Wasserstoffkraftwerke [h]	-	64	334	905	1.170
Kapazität Pumpspeicher und Batterien [GW]	21	38	55	63	65
Stromerzeugung aus Pumpspeichern und Batterien [TWh]	6	26	42	47	47
Kapazität DSM [GW]	-	2	5	7	10
Stromerzeugung aus DSM [TWh]	0	2	6	9	12

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Um die Stromnachfrage in jeder Stunde und auch bei geringer Einspeisung aus erneuerbaren Quellen und gleichzeitiger hoher Auslastung der Importkapazitäten decken zu können, muss neben den in den Rechnungen explizit abgebildeten Flexibilitäten zusätzliche Leistung bzw. Flexibilität vorgehalten werden. Diese kann durch einlastbare Kraftwerke mit treibhausgasneutralen Brennstoffen, Importe, Speicher, weiteren DSM oder typischerweise durch eine Kombination aus allen genannten Optionen erfolgen. Der Bedarf, der durch diese residuale Flexibilität gedeckt werden muss, steigt mit dem Rückgang an einlastbaren, fossil befeuerten Kraftwerken ab 2030 und dann nochmal stärker zwischen 2035 und 2040 an. Im Jahr 2045 liegt diese aber immer noch bei unter 4 TWh und damit unter 0,5 % der Stromerzeugung.

Tabelle 17: Residualer Flexibilitätsbedarf

	2025	2030	2035	2040	2045
Residualer Flexibilitätsbedarf [TWh]	-	0,1	1,5	3,0	3,9

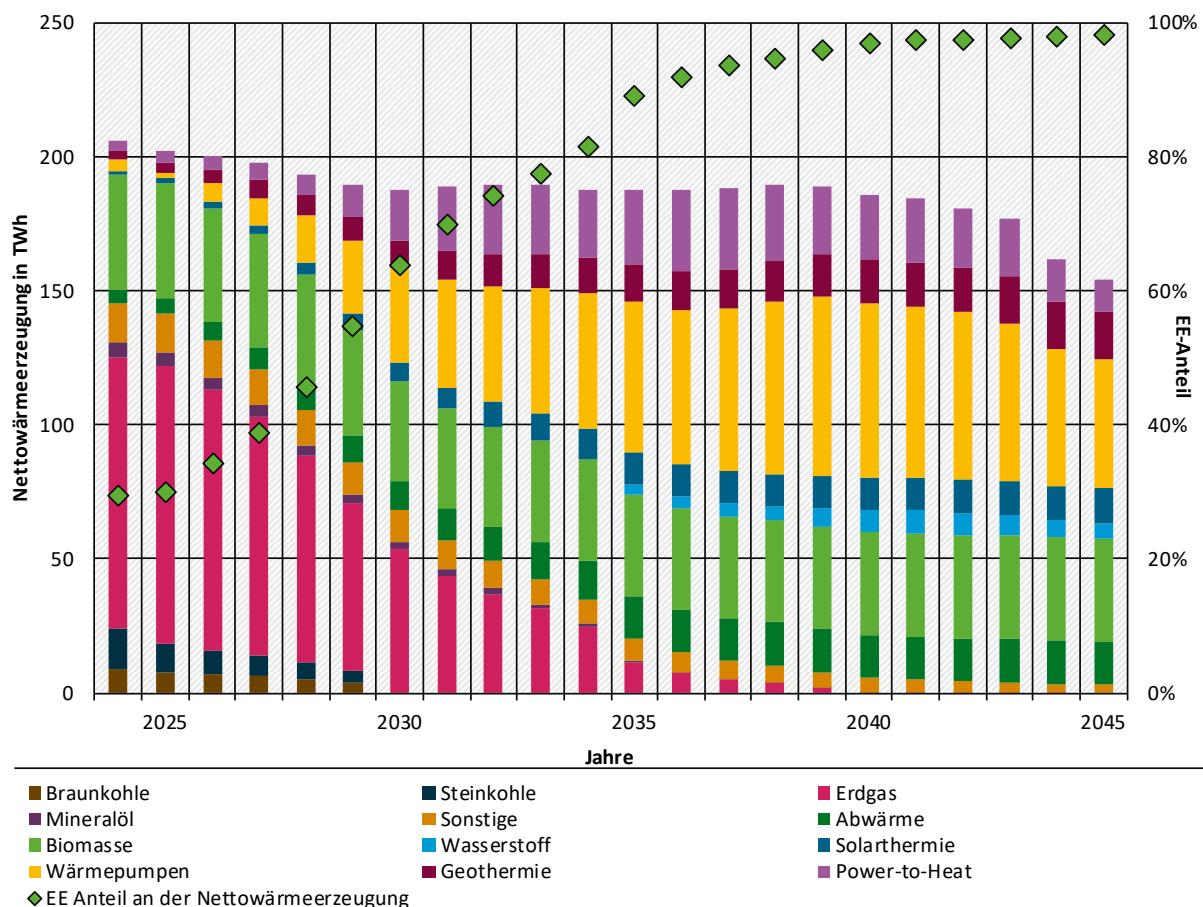
Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Der Anteil der netzgebundenen erneuerbare Wärme nimmt im Zeitverlauf stark zu. Hierbei kommt es zwischen den Jahren 2034 und 2035 zu einem weitgehenden Ausstieg aus der Wärmebereitstellung aus Erdgas im Kraftwerksbereich.

Die Rolle von strombasierten Wärmeerzeugern wie Power-to-Heat und Wärmepumpen ändert sich im Zeitverlauf. Zwischen 2030 und 2040 liegt hier ein größerer Beitrag zur Wärmeversorgung vor, nach 2040 nimmt die Rolle wieder ab. Der wesentliche Treiber hierfür ist die Abnahme der Wärmenachfrage nach 2040.

Der Beitrag der Biomasse ist im Zeitverlauf eher konstant. Der Beitrag von Wasserstoff zur Wärmebereitstellung ist gering.

Abbildung 27: Netzgebundene Netto-Wärmeerzeugung, CARESupreme, 2024-2045

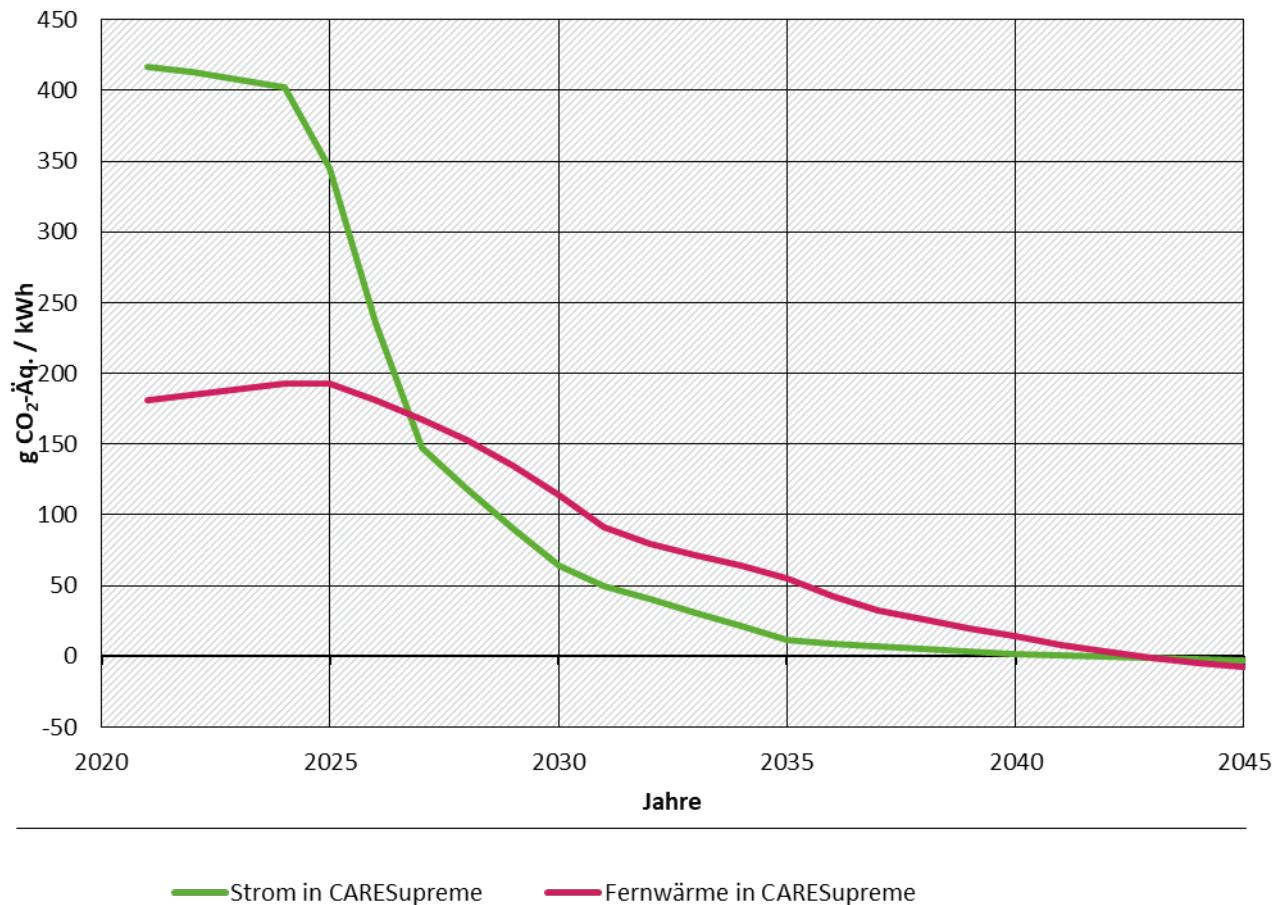


Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Resultierende Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme

Ähnlichkeiten zur Verursacherbilanz (siehe Anhang B) hat die Ermittlung der resultierenden Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme. Auch diese stellen eine Methode dar, die Emissionen der Energiewirtschaft (und der industriellen Eigenerzeugung) umzulegen. Die Entwicklung der resultierenden Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme sind in folgender Abbildung dargestellt.

Abbildung 28: Resultierende Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme, CARESupreme, 2021-2045



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, basierend auf Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Historisch ist der Stromemissionsfaktor deutlich höher als der Fernwärmeemissionsfaktor. Der schnelle Umbau von fossiler zu erneuerbarer Stromerzeugung führt dazu, dass der Stromemissionsfaktor bis 2030 unter den Fernwärmeemissionsfaktor sinkt. Der Einsatz von WACCS und BECCS bei Strom- und Wärmeerzeugung führt hier zu negativen Emissionsfaktoren am Ende des Modellierungszeitraums.

Es ist anzumerken, dass die resultierenden Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme mittlere Emissionsfaktoren sind. Sie sind daher nicht gleichzusetzen mit Grenz-Emissionsfaktoren und beschreiben daher *nicht* die Wirkung einer *zusätzlichen* Kilowattstunde an Verbrauch. Insbesondere bedeutet das für die negativen Emissionsfaktoren des Jahres 2045, dass zusätzliche Strom- oder Fernwärmennachfragen *nicht* zu einer Erhöhung der Senkenwirkungen führen.

3.2 CARETech

3.2.1 Narrativ

Durch weniger Suffizienz und Effizienz ist der Strom- und Wärmeverbrauch und die H₂-Nachfrage in den verschiedenen Sektoren in CARETech höher als in CARESupreme. Dies führt zu einer erhöhten Nachfrage in der Energiewirtschaft. Da dies nur zum Teil zu einer stärkeren Importabhängigkeit führen sollen, wird die zusätzliche Stromnachfrage über einen schnelleren

und höheren Ausbau erneuerbare Energien (PV, Windenergie an Land und auf See) gedeckt. Die zusätzliche Wärmenachfrage wird durch eine deutlich höhere Auslastung der EE-Wärmeerzeuger bedient. Die zusätzliche H₂-Nachfrage wird über mehr inländische Elektrolyseure gedeckt. Der erhöhte EE-Ausbau erfordert auch zusätzliche Flexibilitätsoptionen. Diese werden in Form von zusätzlichen H₂-Kraftwerken, Elektrolyseuren, und H₂-Speichern sowie DSM bereitgestellt. Auch die Batteriespeicher werden dem EE-Ausbau folgend ausgebaut.

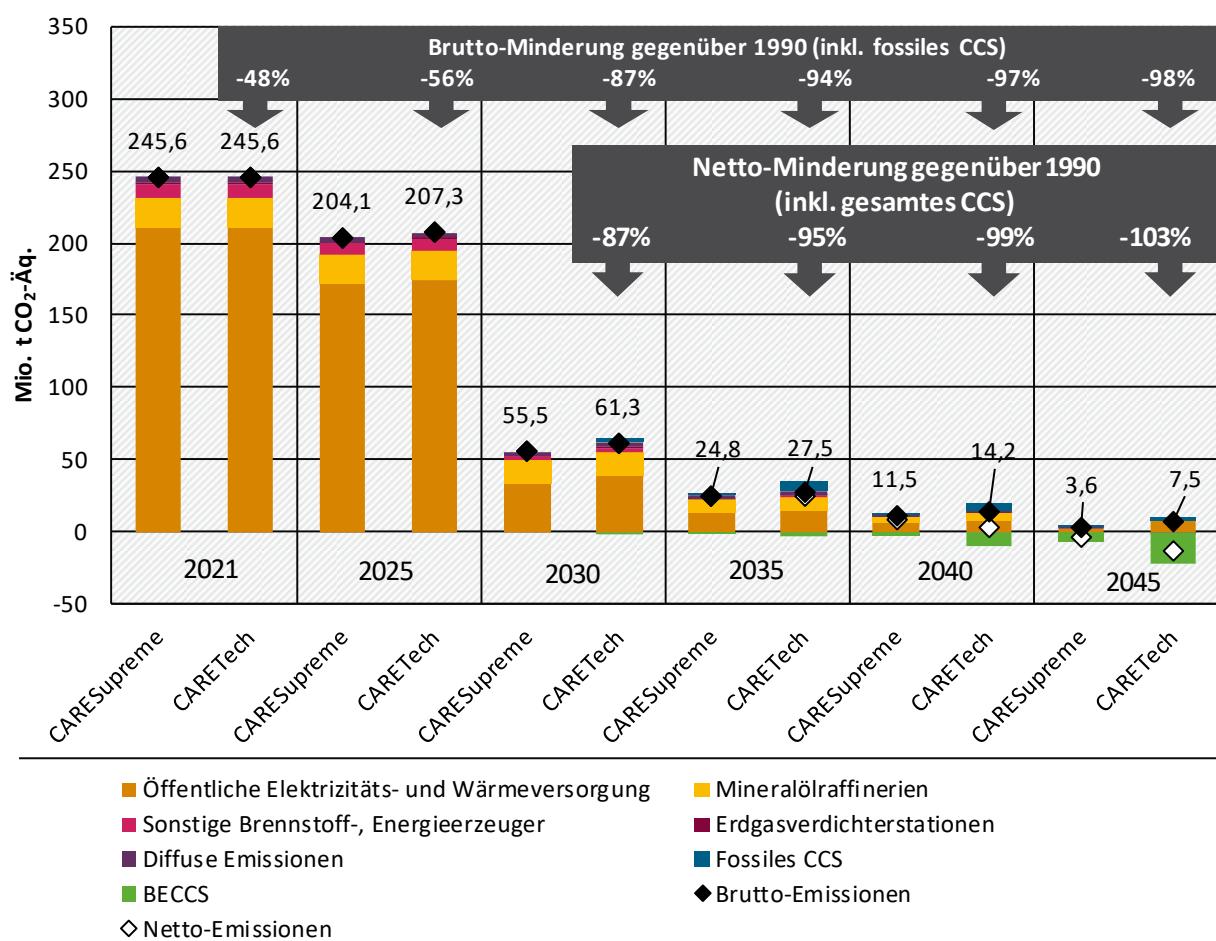
Aufgrund einer geringeren Ambition in Vergleich zu CARESupreme in Bezug auf Suffizienz und Effizienz und obwohl im Vergleich zu CARESupreme in der Industrie CCS genutzt wird, sind die Treibhausgasemissionen der anderen Sektoren in CARETech höher als in CARESupreme. Die Energiewirtschaft schließt diese Lücke, um weiterhin den angestrebten Senken-Puffer (Kapitel 1) zu erreichen. Dafür kommen neben Carbon Capture für die Müllverbrennung (WACCS), auch Carbon Capture in einem Teil der Biomasse-Heizkraftwerke und Biogasanlagen (BECCS) zum Einsatz. Die verbleibende Emissionslücke wird über den Einsatz von DACCS geschlossen.

3.2.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

- ▶ EE-Ausbau: Zur Deckung des erhöhten Bedarfes werden bereits ab 2030 die Ziele des EEG 2023 übererfüllt. Es erfolgt ein zusätzlicher Ausbau von PV- und Wind-Anlagen.
- ▶ Zur Deckung des resultierenden zusätzlichen Flexibilitätsbedarfs und der höheren H₂-Nachfrage aus den Endverbrauchssektoren steigt die installierte Leistung der Elektrolyse bis 2045 von 35 GW auf 60 GW, die Kapazität von Wasserstoffkraftwerken von rund 20 GW auf rund 50 GW. Ebenso steigt die Kapazität von Wasserstoffspeichern bis 2045 von 40 TWh auf 75 TWh und die Verfügbarkeit von DSM von 10 GW auf 15 GW bzw. 12 TWh auf 19 TWh. Mit dem EE-Ausbau werden auch die Batteriekapazitäten entsprechend erhöht.
- ▶ Zur Deckung des zusätzlichen Bedarfs an negativen Emissionen, werden neben Abfallverbrennungsanlagen auch ein Teil der Biomassekraftwerke und Biogas-Anlagen mit Carbon Capture ausgestattet: Im Jahr 2045 60 % der installierten Leistung von Abfallverbrennungsanlagen, 50 % der installierten Leistung der Biomassekraftwerke und 20 % der installierten Leistung Biogas-Anlagen.
- ▶ Der darüber hinaus verbleibende Bedarf an Negativemissionen wird durch DACCS gedeckt: Nach 2035 erfolgt ein rascher Zubau, sodass im Jahr 2040 rund 17 Mio. t CO₂ und im Jahr 2045 rund 34 Mio. t CO₂ aus der Luft abgeschieden und langfristig gespeichert werden.

3.2.3 Zentrale Ergebnisse

Abbildung 29: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 18: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft, CARETech, 2021-2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	210,7	174,6	39,6	15,6	10,2	8,3
Mineralölraffinerien	20,4	20,6	15,3	9,8	4,5	0,0
Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	9,7	8,0	3,4	1,6	0,3	0,1
Erdgasverdichterstationen	0,8	0,7	0,6	0,3	0,1	0,0
Diffuse Emissionen	4,0	3,4	2,7	1,8	1,1	0,7
Erzeugte Emissionen	245,6	207,3	61,6	29,1	16,2	9,1

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Fossiles CCS						
Fossiles WACCS	0,0	0,0	0,0	(-)0,5	(-)1,9	(-)1,6
Brutto-Emissionen (inkl. fossiles CCS)	245,9	207,3	61,3	27,5	14,2	7,5
<i>Brutto-Minderung gegenüber 1990</i>	-48,3 %	-56,3 %	-87,0 %	-92,8 %	-96,0 %	-98,4 %
Technische Negativemissionen						
BECCS aus fester Biomasse und Biogas ³⁹	0,0	0,0	-0,3	-3,5	-10,8	-21,3
WACCS von Kunststoffen auf Basis von atmosphärischem CO ₂ (nicht bilanziert) ⁴⁰	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3	-1,6
Netto-Emissionen (inkl. fossiles CCS und BECCS)	245,6	207,3	61,1	24,0	3,7	-13,8
<i>Minderung gegenüber 1990</i>	-48,3 %	-56,3 %	-87,1 %	-94,9 %	-99,2 %	-102,9 %

Aus der Atmosphäre aufgenommenes und gespeicherte CO₂ – in den Gesamtergebnissen separat vom Sektor Energiewirtschaft dargestellt:

Aus der Atmosphäre aufgenommenes und gespeicherte CO ₂ (DACCs)	0,0	0,0	0,0	0,0	-17,1	-34,2
Gesamt gespeicherte CO₂ (CCS, BECCS, DACCs, WACCS)	0,0	0,0	(-)0,3	(-)4,1	(-)29,9	(-)58,6
Gesamt technische Negativemissionen aus BECCS, DACCs	0,0	0,0	(-)0,3	(-)3,5	(-)27,6	(-)55,5

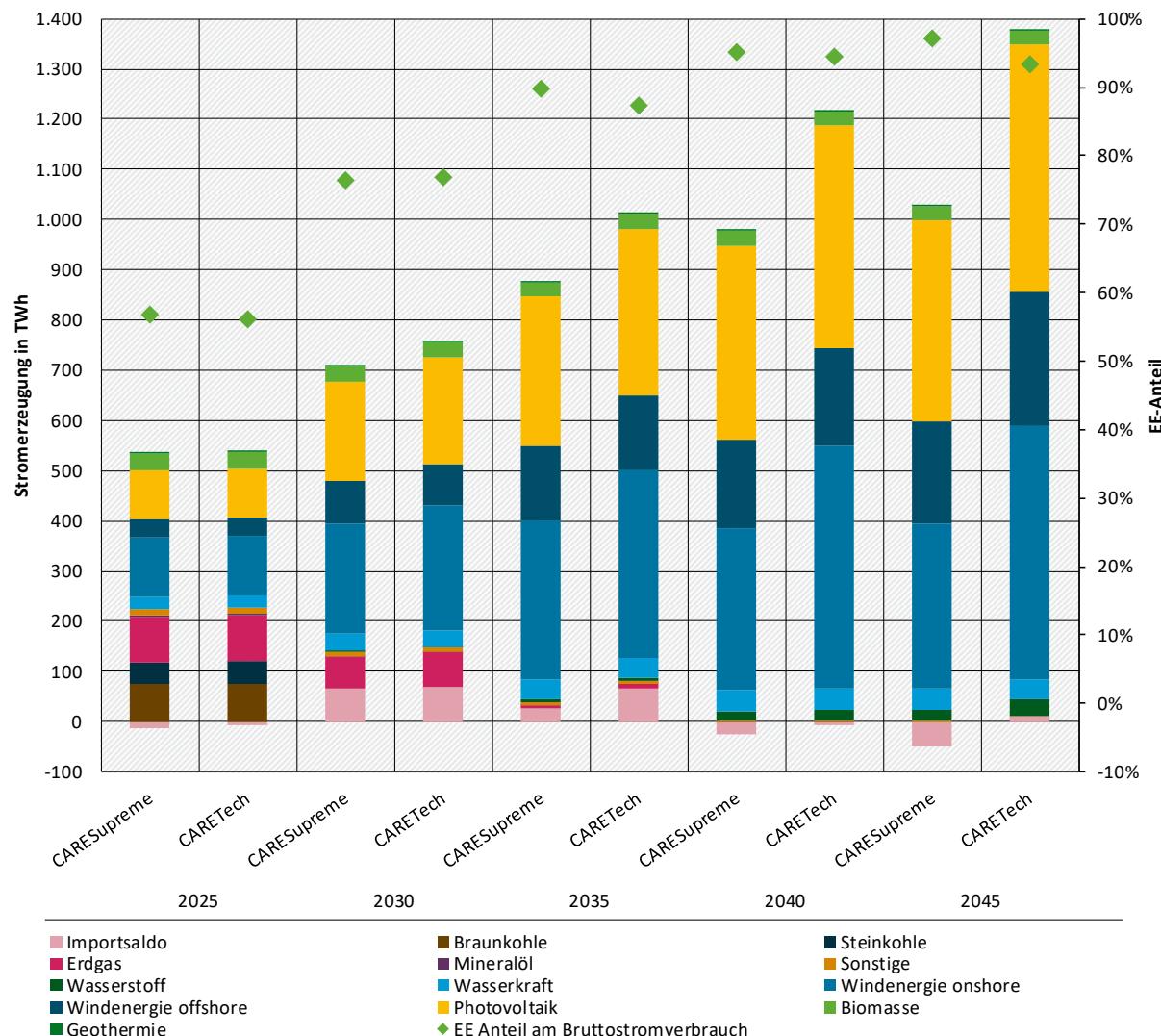
Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Die höhere Stromnachfrage der anderen Sektoren im Vergleich zu CARESupreme wird in CARETech über eine zusätzliche Erzeugung aus erneuerbaren Energien gedeckt. Die zusätzliche Erzeugung an Wind und PV steigt im Zeitverlauf bis 2045 auf über 300 TWh an. Das Niveau des Stromimports ist für 2030 in beiden Szenarien auf demselben Niveau bei rund 70 TWh. Während das Importsaldo in CARESupreme bereits im Jahr 2035 auf rund ein Drittel des Höchststandes von rund 70 TWh absinkt, verbleibt der Saldo in CARETech auch im Jahr 2035 auf diesem hohen Niveau und schmilzt erst danach in Richtung einer annährend ausgeglichenen Bilanz ab (Abbildung 30). In CARESupreme gelingt es schnell diese Abhängigkeiten zu reduzieren und im Jahr 2040 erfolgt bereits ein Netto-Stromexport von rund 25 TWh.

³⁹ In CARESupreme geschieht CCS in Müllheizkraftwerken und in mit Biogas betriebenen Kraftwerken. Bei der festen Biomasse handelt es sich um den biogenen Anteil des Abfalls.

⁴⁰ In CARESupreme und CARETech werden die Ausgangsstoffe für Kunststoffe auf Basis von atmosphärischem Kohlenstoff importiert. Die Senke entsteht im Ausland und die Einspeicherung im Inland wird nicht bilanziert.

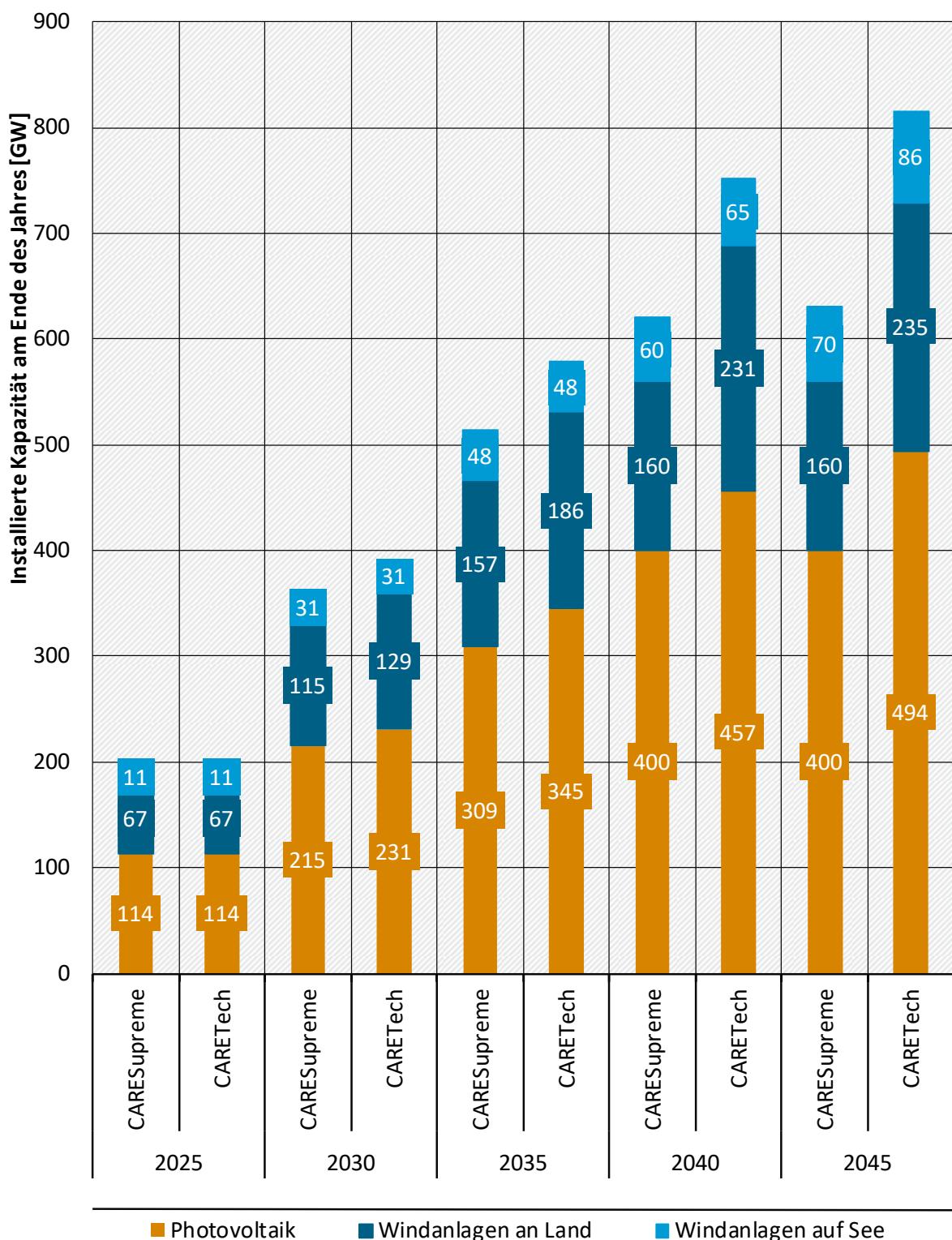
Abbildung 30: Vergleich der Nettostromerzeugung und des EE-Anteils am Bruttostromverbrauch zwischen CARESupreme und CARETech, 2025-2045



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Um die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen sicherzustellen, müssen die entsprechenden Kapazitäten zugebaut werden. Abbildung 31 vergleicht die installierten Leistungen von Photovoltaik, Windenergieanlagen an Land und auf See zwischen den Szenarien CARESupreme und CARETech. Bereits ab 2026 werden in CARETech zusätzliche Photovoltaik- und Windenergieanlagen an Land erforderlich. Auf Grund der langen Vorlaufzeiten wird angenommen, dass zusätzliche Windenergieanlagen auf See erst nach 2035 in Betrieb gehen können. Für 2045 ergeben sich zusätzlich rund 90 GW mehr an Photovoltaik, 75 GW mehr Windenergieanlagen an Land und 13 GW mehr auf See in CARETech im Vergleich zu CARESupreme. Ob das 2 %-Flächenziel ausreicht, um die notwendige Flächenkulisse für Windenergieanlagen an Land zur Verfügung zu stellen, hängt vom spezifischen Flächenverbrauch der Anlagen ab. Mit dem aktuellen spezifischen Flächenverbrauch von 3 ha/MW ließen sich rund 240 GW auf dem Bundesgebiet installieren (Pape et al. 2022).

Abbildung 31: Vergleich der Installierten Leistungen zum Jahresende von Photovoltaik, Windenergieanlagen an Land und auf See zwischen CARESupreme und CARETech, 2025-2045

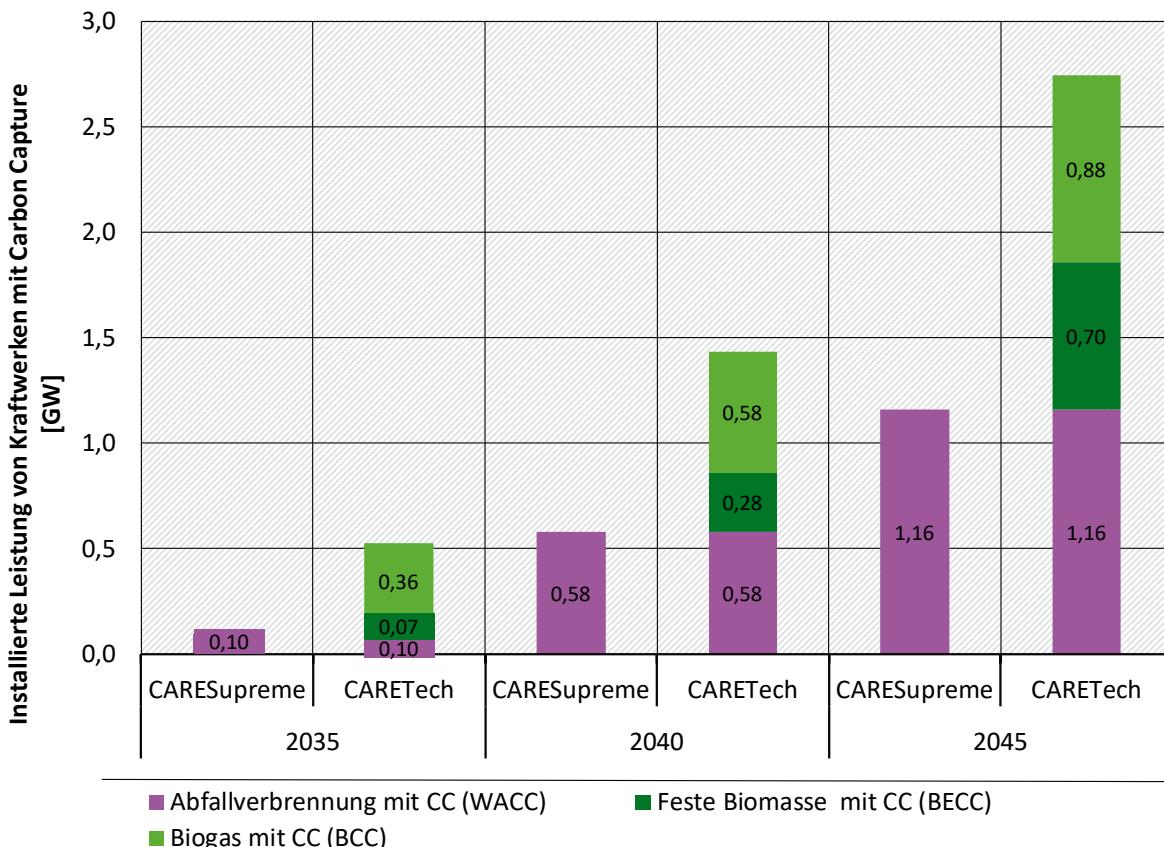


Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Im Vergleich zu CARESupreme verbleiben in CARETech die anderen Sektoren durch die ausbleibenden Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen und trotz CCS in der Industrie auf einem

deutlich höheren Emissionsniveau. Damit entsteht ein zusätzlicher Bedarf an Negativemissionstechnologien, welcher in der Energiewirtschaft bilanziert wird. Während in CARESupreme nur ein Teil der Müllheizkraftwerke mit Carbon Capture ausgestattet ist (60 % der installierten Leistung im Jahr 2045), ist in CARETech auch ein Teil der Kraftwerke, die feste Biomasse verbrennen (50 % der installierten Leistung im Jahr 2045) und die Biogase verbrennen (20 % der installierten Leistung im Jahr 2045) mit Carbon Capture ausgestattet (Abbildung 32). Ebenfalls sind Heizwerke, die Abfall und feste Biomasse nutzen, im selben Umfang mit Carbon Capture ausgestattet.

Abbildung 32: Vergleich der installierten Leistungen von Kraftwerken, die mit Carbon Capture ausgestattet sind, zwischen CARESupreme und CARETech, 2035-2045



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Um den angestrebten Senken-Puffer von -10 bis -20 Mio. t CO₂-Äq. zu erreichen, ist aufgrund des begrenzten Potenzials neben dem Einsatz von Carbon Capture in Kraft- und Heizwerken in CARETech auch der Einsatz von Direct Air Capture (DACC) notwendig. Nach 2035 erfolgt ein rascher Zubau der Technologie, sodass im Jahr 2040 rund 17 Mio. t CO₂ aus der Luft abgeschieden und langfristig gespeichert werden. Im Jahr 2045 sind es rund 34 Mio. t CO₂. Der notwendige Strom und die notwendige Wärme, die ebenfalls aus Strom über Wärmepumpen gewonnen wird, führt zu einem Anstieg der Stromnachfrage von rund 23 TWh im Jahr 2040 und rund 45 TWh im Jahr 2045 (Tabelle 19).

Tabelle 19: CO₂-Abscheidung aus Direct Air Capture sowie zusätzlicher Strombedarf, CARETech, 2035-2045

	2035	2040	2045
CO ₂ -Abscheidung über Direct Air Capture [Mio. t CO ₂]	-	-17,1	-34,2
Zusätzlicher Strombedarf für den Betrieb der Abscheideanlage [TWh]	-	23,2	44,8

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

In CARETech besteht auf Grund der höheren inflexiblen Stromnachfrage und auf Grund der Erhöhung der Erzeugung aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien ein ebenfalls erhöhter Flexibilitätsbedarf. Tabelle 20 vergleicht die in CARESupreme und CARETech verfügbaren Flexibilitäten und deren Einsatz. Die Elektrolysekapazität steigt in CARETech gegenüber CARESupreme bis 2045 um 70 % auf 60 GW an. Damit kann die gestiegene Nachfrage nach Wasserstoff gedeckt werden. In Kombination mit dem Ausbau der Wasserstoffspeicher auf 75 TWh, wird gleichzeitig die notwendige Flexibilität bereitgestellt, so dass die Vollaststunden der Elektrolyseure mit 3.710 h/a unter 4.000 h/a bleiben. In beiden Szenarien sind die Speicher höchstens zu zwei Dritteln ausgelastet, das heißt in CARESupreme beträgt der höchste Füllstand rund 27 TWh, während er in CARETech rund 51 TWh beträgt. Die Leistung von Wasserstoffkraftwerken steigt bis 2045 auf rund 50 GW in CARETech und ist damit mehr als doppelt so hoch wie in CARESupreme. Dabei steigt die Stromerzeugung nur um die Hälfte an. Ebenfalls steigt der Bedarf an Batteriespeichern, der an den Zubau an PV- und Windanlagen an Land gekoppelt ist, gegenüber CARESupreme um rund 10 GW im Jahr 2045. Dabei liegt die Stromerzeugung aus Speichern in beiden Szenarien ab 2035 in der gleichen Größenordnung bei rund 40-50 TWh. Auch der Bedarf an DSM steigt, sodass die Leistung in CARETech im Jahr 2045 um 50 % höher ist. Analog steigt der DSM-Einsatz.

Tabelle 20: Flexibilitäten: Installierte Leistung der Elektrolyseure, Vollaststunden, Wasserstoffproduktion (für Endverbrauchersektoren und Rückverstromung), Kapazität der Wasserstoffspeicher, sowie Kapazität, Stromerzeugung und Vollaststunden von Wasserstoffkraftwerken nebst Kapazitäten und Stromerzeugung aus Speichern und DSM, CARESupreme und CARETech, 2025-2045

	2025		2030		2035		2040		2045	
	Sup	Tech	Sup	Tech	Sup	Tech	Sup	Tech	Sup	Tech
Elektrolyseur-Leistung [GW]	4,8	4,8	10,0	10,0	30,0	35,0	32,5	50,0	35,0	60,0
Vollaststunden [h]	86	81	3.812	4.203	3.285	3.480	3.715	3.384	4.006	3.710
Wasserstoffproduktion [TWh]	0,3	0,3	27,6	30,4	73,9	91,4	90,6	126,9	105,2	166,9
Wasserstoffproduktion für Endverbraucher [TWh]	0,3	0,3	26,6	29,3	60,1	72,6	54,0	83,0	57,9	99,6
Wasserstoffproduktion für Rückverstromung [TWh]	-	-	1,0	1,1	13,5	18,4	36,2	43,3	46,9	66,6

	2025		2030		2035		2040		2045	
Kapazität der Wasserstoffspeicher [TWh]	0,3	0,3	6,7	6,7	20,0	30,0	30,0	70,0	40,0	75,0
Kapazität Wasserstoffkraftwerke [GW]	-	-	7,9	7,9	17,9	27,9	18,6	38,6	19,8	49,8
Stromerzeugung in Wasserstoffkraftwerken [TWh]	-	-	0,5	0,6	6,0	8,4	16,8	20,4	23,2	32,4
Vollaststunden Wasserstoffkraftwerke [h]	-	-	64	74	334	301	905	528	1.170	649
Kapazität Pumpspeicher und Batterien [GW]	21	21	38	41	55	60	63	74	65	76
Stromerzeugung aus Pumpspeichern und Batterien [TWh]	6	5	26	27	42	41	47	50	47	49
Kapazität DSM [GW]	-	-	2	2	5	10	7	13	10	15
Stromerzeugung aus DSM [TWh]	0	0	2	3	6	10	9	15	12	19

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abkürzungen: Sup: CARESupreme, Tech: CARETech

Wie in Tabelle 21 dargestellt, liegt mit den oben beschriebenen Maßnahmen der residuale Flexibilitätsbedarf in CARETech im Zeitverlauf in derselben Größenordnung wie CARESupreme.

Tabelle 21: Residualer Flexibilitätsbedarf im Szenario CARETech, 2025-2045

	2025		2030		2035		2040		2045	
	Sup	Tech								
TWh										
Residualer Flexibilitätsbedarf	-	-	0,1	0,2	1,5	1,5	3,0	2,4	3,9	3,5

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

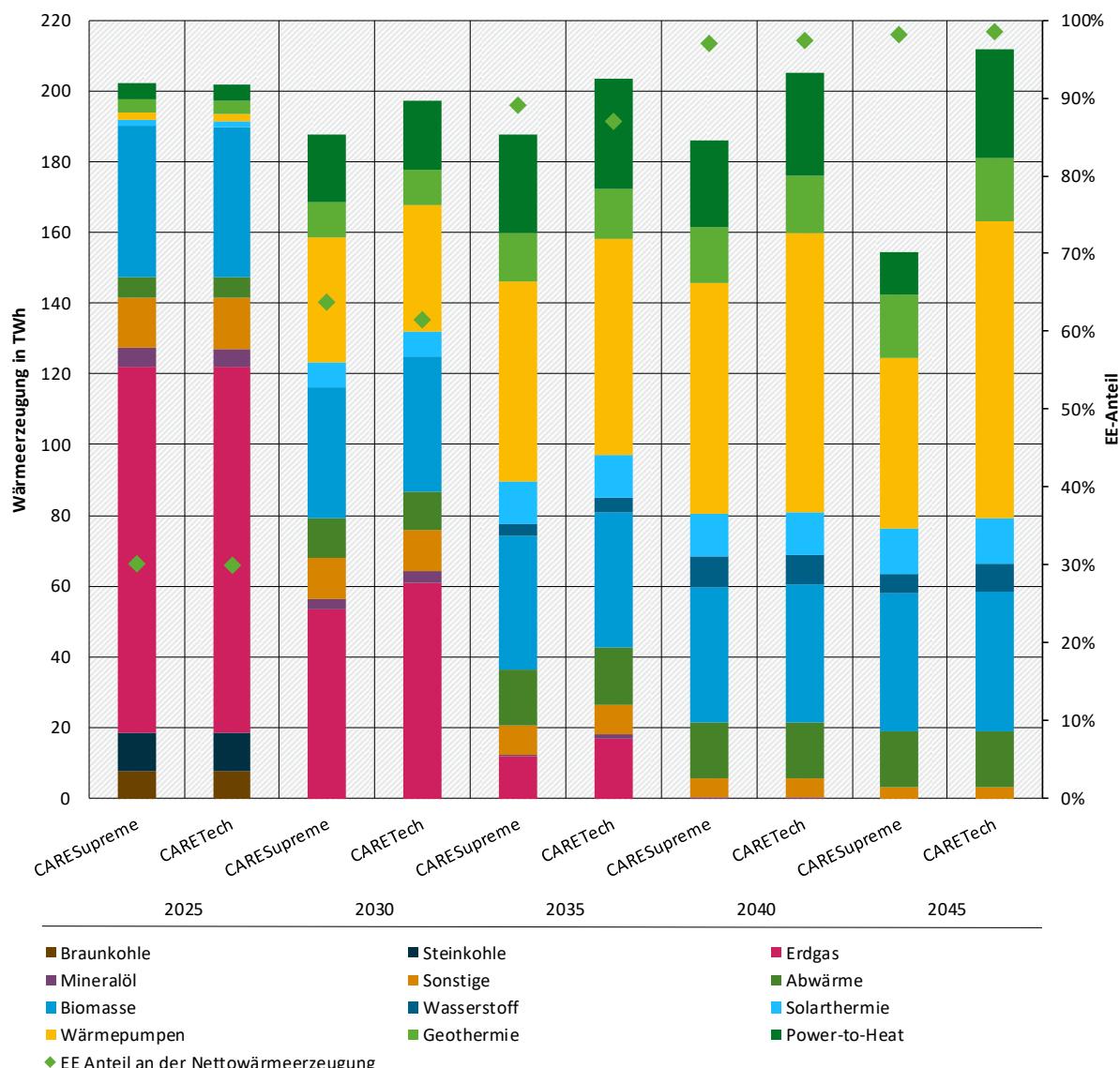
Abkürzungen: Sup: CARESupreme, Tech: CARETech

Abbildung 33 zeigt die netzgebundene Netto-Wärmeerzeugung nach Energieträgern bzw. Technologien im Vergleich der Szenarien CARESupreme und CARETech. Es wird deutlich, dass in CARETech in allen Jahren eine höhere Wärmennachfrage als in CARESupreme vorliegt. Insbesondere kommt es in CARETech zu keinem Absinken der Wärmeerzeugung, sondern zu einem leichten Anstieg bis 2045. Die Differenz zwischen CARETech und CARESupreme beträgt 2045 rund 60 TWh.

Die höhere Wärmennachfrage in CARETech wird im Jahr 2030 noch über stärkeren Einsatz von Erdgas-KWK-Anlagen ausgeglichen. Auch im Jahr 2035 kommt es in CARETech zu einem höheren Einsatz von Erdgas-KWK-Anlagen im Vergleich zu CARESupreme. Wärmepumpen und Power-to-Heat-Anlagen erhöhen ebenfalls ihre Wärmeerzeugung.

Wärmepumpen und Power-to-Heat-Anlagen gleichen in CARETech auch in den Jahren 2040 und 2045 hauptsächlich die gestiegene Nachfrage aus. Die Wärmeerzeugung in Wasserstoff-KWK-Anlagen steigt ebenfalls leicht an.

Abbildung 33: Netzgebundene Netto-Wärmeerzeugung im Vergleich zwischen CARESupreme und CARETech, 2025-2045

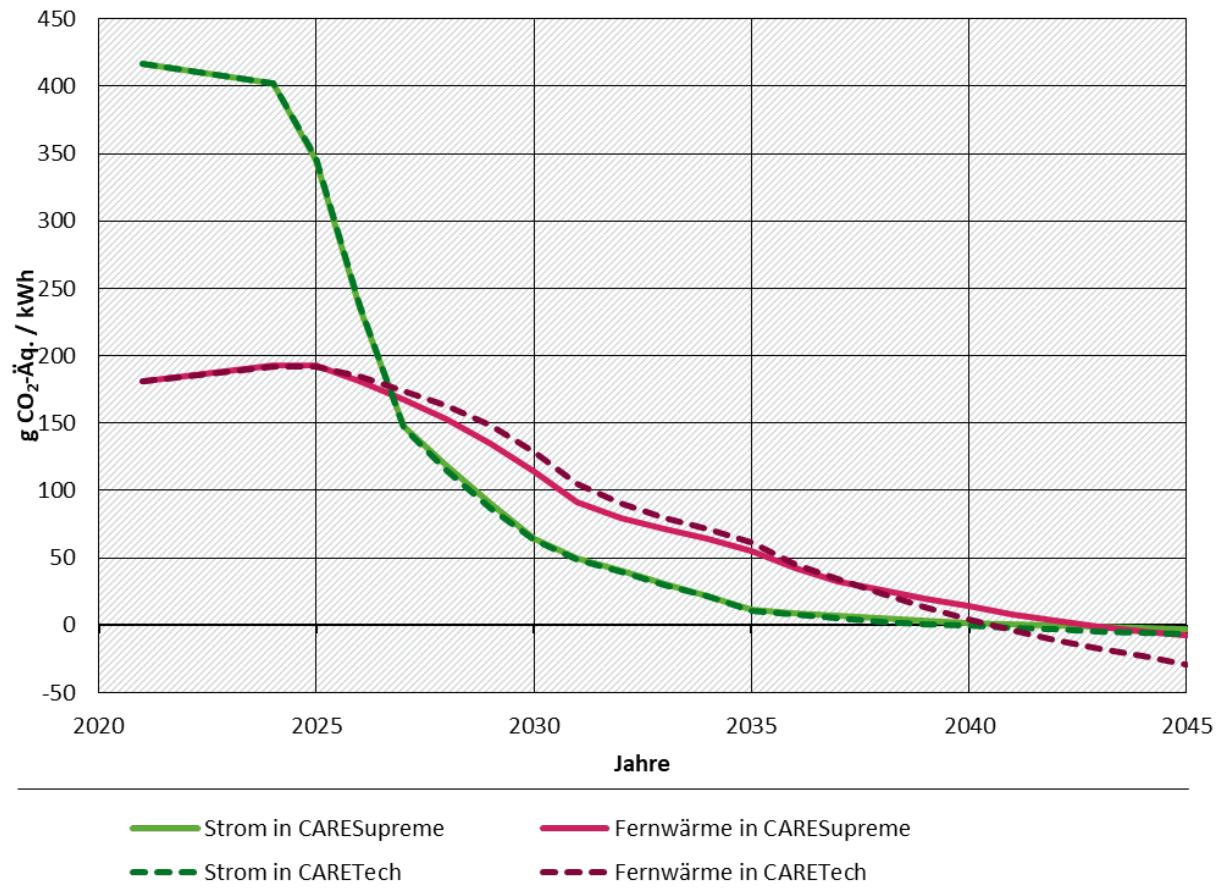


Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Resultierende Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme

Während es beim Stromemissionsfaktor im gesamten Zeitverlauf kaum Unterschiede zwischen CARESupreme und CARETech gibt, ist der Fernwärmemissionsfaktor in CARETech zunächst höher als in CARESupreme. Der stärkere Einsatz von BECCS und WACCS führt dazu, dass zum Ende des Modellierungszeitraums der Fernwärmemissionsfaktor in CARETech unter den von CARESupreme sinkt.

Abbildung 34: Resultierende Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme in CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, basierend auf Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

4 Industrie

4.1 CARESupreme

4.1.1 Narrativ

Anknüpfend an das sektorenübergreifende Narrativ von CARESupreme (Kapitel 1) besteht eine erwähnenswerte Besonderheit des Industriesektors⁴¹. Während Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft analog zu anderen Sektoren (z.B. Gebäude und Verkehr) auch im Industriesektor relevant sind, bestehen keine Suffizienzpotenziale im Industriesektor selbst. Vielmehr empfängt dieser durch Suffizienzmaßnahmen in anderen Sektoren ausgesendete Impulse. So führt eine kleinere Wohnfläche pro Person zu einem verringerten Bedarf an Gebäuden, mithin Baustoffen und energieintensiven Grundstoffen wie Zement, Stahl, Glas und Kunststoff. Ähnliche Effekte erzeugen Konsummusteränderungen im Verkehr (Automobilbesitz) und im allgemeinen Konsum (z.B. Papierbedarf für Versandverpackungen).

Diese nur indirekten Wirkungen erzeugen methodische Herausforderungen, die in diesem Projekt durch ausgeprägte Kommunikation mit den diese Produkte (und damit mittelbar Grundstoffe) nachfragenden Sektoren aufgelöst wurden. Über diese Wirkung auf industrielle Aktivität hinausgehende Interaktionen, beispielsweise durch sozio-ökonomische Veränderungen verringelter Produktion, wurden nicht untersucht. Hingegen sind die Einflüsse auf die (in der Modelllogik) nachgelagerte Energiewirtschaft berücksichtigt. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse des Industriesektor geben daher an, wie der Industriesektor auf Suffizienzimpulse aus anderen Sektoren reagieren könnte, und welche Energienachfrage und Treibhausgasemissionen aus ihnen resultieren kann. Diese beiden Ergebnisdimensionen sind stets überlagert vom zugrunde gelegten Pfad der Konsistenz, also der technologisch dominierten Transformation der subsektoralen Produktionssysteme.

Der Industriesektor folgt diesem Pfad in Anlehnung an vergleichbare Energiesystem- und Sektorstudien durch Zunahme der Energieeffizienz, direkte und indirekte Elektrifizierung der Prozesswärme und Einführung neuer Produktionsverfahren. Im Folgenden werden Instrumente beschrieben, die den Industriesektor auf den im Szenario als Ziel definierten Pfad führen. Sie sind subsektoral (nach industriellen Branchen) zusammengefasst.

4.1.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

► Eisen und Stahl

- Umstellung der Primärproduktion (Klimaschutzverträge, IPCEI, Innovationsfonds): Das maßgebliche Instrument zur Erreichung der technologischen Umstellung ist die Subventionierung der deutlich höheren OPEX der H₂-DRI-Route über Klimaschutzverträge. Es wird ergänzt durch Grüne Leitmärkte und einen europäisch wirksam geschützten Markt (z.B. CBAM).
- Erhöhung des Sekundärrouutenanteils (R): Im Zuge der Reduktion der Primärstahlerzeugung wird die Sekundärroute ausgebaut. Die Schrottverfügbarkeit kann durch eine Verringerung des (in-)direkten Schrottexports (bspw. Altfahrzeuge), der

⁴¹ Der Industriesektor umfasst die verarbeitende Industrie – darunter besonders emissionsintensive Subsektoren Eisen und Stahl, nicht-metallische Mineralien und Grundstoffchemie – und die dort ebenfalls bilanzierten Industriekraftwerke. Die industriellen Treibhausgasemissionen setzen sich aus energie- und prozessbedingten zusammen.

Verringerung der Schrottnutzung in anderen Prozessen (bspw. Eisenguss)⁴² und durch eine verbesserte Sammlung und Aufbereitung von Stahlschrotten erhöht werden⁴³.

Zusätzlich werden Stahlschrotte, die bisher in der Hochofenroute genutzt wurden, eingesetzt.

- Reduktion der Rohstahlnachfrage (R, S): Die Stahlnachfrage hat direkten Einfluss auf die benötigten Stahlmengen aus der Primär- und Sekundärroute sowie die Schrottverfügbarkeit. Bis 2045 sinkt die Stahlnachfrage von 44 Mt (2018) auf 38 Mt. Dies wird hauptsächlich durch Nachfragereduktionen des Hauptabnehmers Bau verursacht.

► Verarbeitung von Steinen und Erden (hier: Zement)

- Reduktion der Nachfrage (R, S): In Verknüpfung mit Instrumenten im Gebäude- und Verkehrssektor sinkt die Zementnachfrage von (2018) 35 Mt auf (2045) 20 Mt. Dies ist analog zu Stahl durch den rückläufigen Pro-Kopf-Flächenbedarf (S) und den Holzbau (R) sowie zusätzlich durch den reduzierten Tiefbau (S) verursacht.
- Umstellung der Prozesswärme: Die Erzeugung der benötigten Prozesswärme wird technologisch auf einen Mix aus biogenen Abfallstoffen und direkter sowie indirekter Elektrifizierung und hochkalorischem Ersatzbrennstoffen umgestellt.
- Adressierung von prozessbedingten Emissionen über neue Bindemittel (R): Im Szenario wird keine Form der CO₂-Abscheidung (weder mit Speicherung noch Nutzung) berücksichtigt. Der Großteil der durch die Entsäuerung des Kalksteins entstehenden prozessbedingten Emissionen verbleiben daher innerhalb des Subsektors Industrie insgesamt unadressiert. Ein Teil der prozessbedingten Emissionen wird aber durch die Nutzung von innovativen Bindemitteln gemindert.

► Verarbeitung von Steinen und Erden (hier: Kalk) (R, S)

- Nachfragerückgang (Kohlekraftwerke, weitere Rauchgasreinigung): Die Kalkproduktion sinkt bis 2040 etwa um 40 %, da mit Kohlekraftwerken und Hochöfen wichtige Nachfrager vollständig bzw. (Produktion von Stahl in Direktreduktionsanlagen als Ersatz für Hochöfen) teilweise wegfallen.
- Elektrifizierung Prozesswärmennutzung: Die Prozesswärmeverzeugung wird stark elektrifiziert ergänzt durch Wasserstoff, wo dies aufgrund gewünschter Produkteigenschaften notwendig ist.

► Grundstoffchemie

- Wasserstoffbasiertes Ethylen (Olefine), Ammoniak und Methanol, auf Kreislaufführung von Kunststoffen beruhende Rohstoffbasis (R), ermöglicht durch Klimaschutzverträge: Die Produktion von Olefinen wird von der auf fossilem Öl (Naphtha) basierten Route bis 2045 vollständig auf wasserstoffbasierte Verfahren umgestellt. Dabei gibt es zwei Varianten, die sowohl bilanziell für Deutschland als auch technologisch deutlich

⁴² Es wird davon ausgegangen, dass die steigenden Preise für Stahlschrott, die Nutzung außerhalb der Stahlherstellung, begrenzen. Es wird angenommen, dass diese bis 2040 von rund 4 Mt auf 0 Mt sinken wird. Dies ist eine Entwicklung, die sich bereits heute im Eisenguss abzeichnet.

⁴³ Aktuell gibt es rund 15 % dissipative Verluste zwischen Schrottentstehung und -verwendung. Für das Szenario wird einer Verbesserung um 10 %-Punkte angenommen. Da es basierend auf statistischen Daten nicht möglich ist, die dissipativen Verluste zuzuordnen, ist dies jedoch mit Unsicherheit behaftet.

unterscheidbar sind. Das Szenario legt den Fokus auf die Methanol-to-Olefines-Route (MtO), in der aus Wasserstoff und CO₂ erzeugtes Methanol zu Olefinen synthetisiert wird.

- Elektrifizierung der Prozesswärme: Die Prozesswärmebereitstellung wird überwiegend elektrifiziert, Teile von Hochtemperaturprozessen können auch mit (an den Standorten aufgrund der stofflichen Nutzung verfügbaren) Wasserstoff bzw. daraus erzeugter Wärme betrieben werden. Instrumente dafür sind mit der Prozesswärmebereitstellung anderer Subsektoren identisch (Industriestrompreis, attraktiver Wasserstoff).

► Glas

- Elektrifizierung und ergänzend Wasserstoffnutzung: Glasherstellung wird vorrangig elektrifiziert mit Nischen für die Nutzung von Wasserstoff, wo dies technisch notwendig oder besonders vorteilhaft ist. Entsprechend gelten die Aussagen zur Elektrifizierung anderer Prozesswärme. Wasserstoff (in geringen Mengen Kohlenwasserstoff) wird ergänzend eingesetzt, um Produkteigenschaften und Prozessstabilität zu gewährleisten.
- Sinkende Nachfrage im Bau- und Verpackungsbereich (S): Die Gesamtproduktion sinkt um rund 15 % entsprechend reduzierter Bauaktivität insbesondere im Wohnungsbau, aber auch aufgrund der rückläufigen Verwendung im Nahrungsmittelbereich. Die Nachfrage nach Flachglas sinkt um ca. 27 % bis 2045 aufgrund des verringerten Pro-Kopf-Flächenbedarfes und die Nachfrage nach Behälterglas um rund 12 % aufgrund der verringerten Nachfrage nach Verpackungen.

► NE-Metalle

- Verbesserte Sammlung, Sortierung und Aufbereitung (R): Das Recycling von Aluminium und Zink ist bereits heute durch geringe dissipative Verluste charakterisiert (global, 5-15 %). Das höchste Verbesserungspotenzial gibt es bei Kupfer. Daher wird angenommen, dass die dissipativen Verluste für alle drei NE-Metalle bei rund 15 % liegen. Instrument hierfür ist insbesondere die verbesserte Sammlung und Aufbereitung der Schrotte.
- Elektrifizierung der Prozesswärme: Die Produktion wird weitgehend elektrifiziert (~80 %), mit Ergänzung durch Wasserstoff, wo notwendig. Es gelten daher die Herausforderung von Elektrifizierung/Wasserstoffnutzung wie in anderen Sektoren und es werden entsprechende Instrumente benötigt.

► Papier

- Sinkende Nachfrage durch Digitalisierung (Printprodukte) und verändertes Konsumverhalten (Verpackungsprodukte, R): Die Produktionsmenge sinkt nachfragebedingt um etwa 20 % (S). Dies ist im geringen Maße durch die fortschreitende Digitalisierung begründet. Der größere Hebel ist der Rückgang von Verpackungsmaterialien durch ein geändertes Konsumverhalten (S). Ähnlich wie bei Kunststoffen und Glas kann diese Verhaltensänderungen einerseits durch Informationen für die Endverbrauchenden und andererseits durch rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden. Für Papierverpackungen sind dies bspw. verpflichtende Versandkosten beim Online-Versand.
- Elektrifizierung der Prozesswärme: Für die Elektrifizierung der Dampferzeugung in der Papierherstellung wird ein subventionierter Strompreis benötigt.

► Allgemeine Prozesswärme

- Industriestrompreis: Zentrales Instrument für die Elektrifizierung der Prozesswärme ist – wie in den einzelnen Subsektoren bereits angeführt – ein gegenüber fossilen Optionen wettbewerbsfähiger Strompreis. Dies wird absehbar nicht allein über einen CO₂-Preis erreicht⁴⁴. Eine breite Entlastung von anderen Preisbestandteilen wäre ein geeignetes Instrument, um die Lücke zu schließen.
- Hoher CO₂-Preis: Ein Preisniveau von 4-5 €ct/kWh (entspricht etwa der maximalen Entlastung, bei der fast nur noch Erzeugung und Vertrieb als Preisbestandteile verbleiben) könnte in Kombination mit einem ambitionierten CO₂-Preis (schnell ~200 €/t) ein entsprechendes Umfeld schaffen.
- Beschleunigung des Anlagenaustrauschs: Parallel zur Schaffung der wirtschaftlichen Attraktivität muss in vielen Branchen auch die Austauschgeschwindigkeit von Prozesswärmeanlagen deutlich erhöht werden (Größenordnung Faktor 1,4). Dies kann theoretisch als Reaktion auf Preissignale "von selbst" geschehen, eine entsprechende Begleitung mit darauf zielenden Instrumenten scheint aber notwendig zu sein.

► Einsatz und Emissionen fluorierter Treibhausgase

- Ambitionierter Phase-Down für HFKW: Der HFKW-Phase-Down führt jenseits der Verbote zu einer Verknappung der für Neuanlagen und Nachfüllungen verfügbaren HFKW-Mengen, zu höheren HFKW-Preisen und steigender Attraktivität von Alternativstoffen ohne oder mit niedrigerem GWP und im Endeffekt mit Zeitverzögerung zu geringeren HFKW-Emissionen aus dem Betrieb und der Entsorgung von HFKW-haltigen Geräten und Produkten.
- Spezifische Verbote für den Einsatz von SF₆ und HFKW in Neuanlagen: Für CARESupreme wird der Revisionsvorschlag von 2022 der Europäischen Kommission zur F-Gase-Verordnung 517/2014 berücksichtigt (Europäische Kommission 2022), der auch einen Fahrplan für selektive Verbote zur Verwendung von SF₆ in neuen elektrischen Schaltanlagen enthält.
- Optimierte Entsorgung von SF₆ aus außer Betrieb gehenden Schaltanlagen

Durch eine verstärkte Sensibilisierung der Branche könnten die SF₆-Verluste bei der Entsorgung minimiert werden.

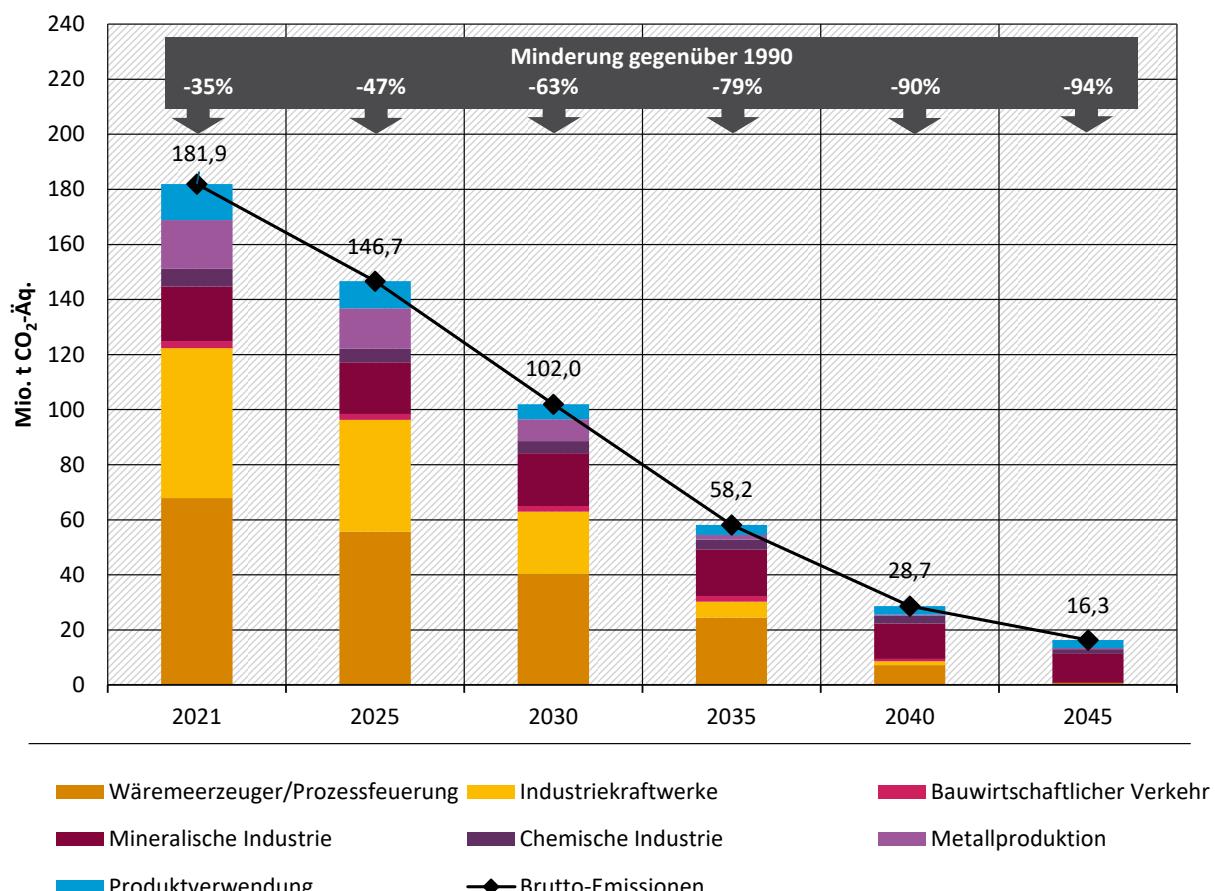
In CARESupreme wird angenommen, dass die Emissionsraten der Entsorgung von 5 % im Jahr 2025 auf 1 % im Jahr 2030 sinken und dann konstant bleiben.

Eine detaillierte Beschreibung sowie deren Parametrisierung aller berücksichtigten Instrumente kann Anhang A entnommen werden.

⁴⁴ 2018 betrug der Preisspread von Strom zu Erdgas etwa 65 €/MWh (Eurostat Datenbank NRG_PC_205, NRG_PC_203, ohne Umsatzsteuer und andere erstattungsfähige Steuern und Abgaben, Bänder I5 und IF). Diese Differenz würde (unter der Annahme, es gäbe keine Wirkung auf den Strompreis) durch eine CO₂-Preiserhöhung von etwa 300 €/t ausgeglichen (Emissionsfaktor Erdgas: 0,202 t CO₂/MWh).

4.1.3 Zentrale Ergebnisse

Abbildung 35: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie, CARESupreme, 2021–2045



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

Tabelle 22: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen	67,9	55,7	40,1	24,4	7,2	0,8
Industriekraftwerke	54,5	40,6	22,8	5,8	1,4	-0,1
Bauwirtschaftlicher Verkehr	2,5	2,2	2,1	2,1	0,9	0,0
Prozesse: Mineralische Industrie	19,9	18,7	19,2	16,9	12,9	10,5
Prozesse: Chemische Industrie	6,4	4,9	4,4	3,6	2,8	1,7
Prozesse: Metallproduktion	17,7	14,7	7,9	1,6	0,5	0,4
Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln	2,1	2,0	1,8	1,5	1,6	1,6
Prozesse: Elektronik-Industrie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Produktverwendung als ODS-Ersatzstoff	7,9	5,8	2,8	1,4	0,7	0,6
Sonstige Produktherstellung und -verwendung	2,9	1,8	0,8	0,6	0,6	0,6
Prozesse: Andere Bereiche	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erzeugte/ Brutto-/ Netto-Emissionen Gesamt	181,9	146,7	102,0	58,3	28,7	16,3
Minderung gegenüber 1990	-34,7 %	-47,4 %	-63,4 %	-79,1 %	-89,7 %	-94,2 %

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

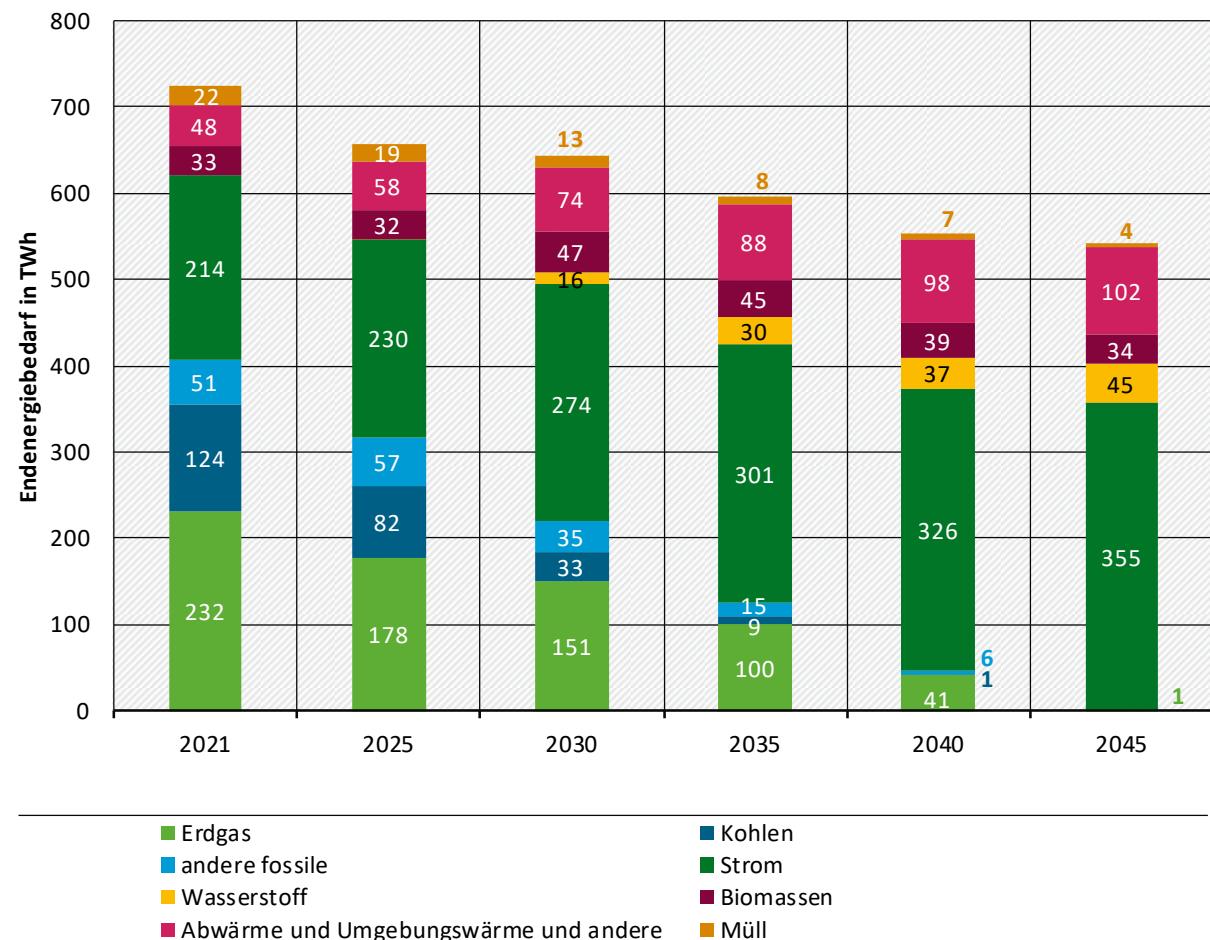
Die Treibhausgasemissionen des Industriesektors werden in CARESupreme im Jahr 2045 gegenüber 1990 um 94 % gemindert (Abbildung 35, Tabelle 22). Die Minderung verläuft weitgehend linear – mithin also auf Basis einer intertemporal gleichen Lastenverteilung im Modellierungszeitraum. Sie betrifft alle Teilbereiche (Prozesswärme, Industriekraftwerke, prozessbedingte Treibhausgasemissionen, Produktverwendung, andere) und bewirkt nur geringfügige residuale Treibhausgasemissionen in einer Vielzahl der Kategorien (Tabelle 22). Relevante verbleibende Treibhausgasemissionen sind in Prozessen der mineralischen Industrie (10,5 Mio. t CO₂-Äq.), der chemischen (1,7 Mio. t CO₂-Äq.) und Metallindustrie (0,4 Mio. t CO₂-Äq.) und der Produktverwendung und Elektronik (2,9 Mio. t CO₂-Äq.)⁴⁵ vorhanden. Die Residualmenge in der mineralischen Industrie ist die bei weitem bedeutendste. Sie wird durch die auch in diesem Szenario anhaltend hohe – und nach aktuellem Kenntnisstand nicht grundsätzlich vermeidbare – Abhängigkeit von Kalkstein als rohstoffliche Basis der Zement- und Kalkherstellung erzeugt. Sie wird durch hohe Ambitionen der Produktionsmengenreduzierung von Zement und Kalk deutlich gegenüber 2021 reduziert (~50 %). Dadurch kann auf die für diese Kategorie in anderen Szenarien stark diskutierte Option CO₂-Abscheidung verzichtet, und dennoch eine Minderung im Industriesektor erreicht werden, die einen angemessenen Beitrag des Sektors zu Treibhausgasneutralität des Gesamtsystems vermuten lässt.

Der Endenergiebedarf des Industriesektors sinkt im Modellierungszeitraum (2021-2045) von 705 TWh auf 542 TWh (Abbildung 36). Parallel zu dieser durch Energie- und Materialeffizienz sowie Suffizienz und Kreislaufwirtschaft getriebenen Entwicklung (vergleiche Abschnitt 4.1.2), werden starke Verschiebungen der Energieträgeranteile umgesetzt. Neben einer starken Elektrifizierung (vergleiche Abbildung 36 und Abbildung 37) insbesondere in der Prozesswärmeerzeugung, sinkt der Anteil der Erdgasnutzung von 32 % (216 TWh) auf 0 % (in 2045). Bis 2045 werden auch keine anderen fossilen Energieträger (Öle, andere Gase) mehr eingesetzt (2021: 7 %, 51 TWh) und 2040 erfolgt der Ausstieg aus der Kohlenutzung in der Industrie (2021: 17 %, 124 TWh). Wasserstoff kommt als neuer Energieträger – überwiegend für die Direktreduktion von Stahl – hinzu und erreicht bis 2045 einen Anteil von 8 % (45 TWh). Die absolute Nutzung von Biomassen bleibt in 2045 (34 TWh) gegenüber 2021 (33 TWh) weitgehend stabil, anteilig steigt die Nutzung aber leicht von 5 % auf 6 %. Zwischen 2030 und 2040 übersteigt die Biomassenutzung zwischenzeitlich jene von 2021 deutlich (2032: 49 TWh). Die Nutzung von an die Industriestandorte gelieferte Wärme steigt moderat gegenüber 2021 (48 TWh) an (59 TWh), die Verwendung von Ab- und Umgebungswärme in Wärmepumpen

⁴⁵ Weitere kleine verbleibende Quellen residualer Treibhausgasemissionen sind modellbedingt – insbesondere nicht technisch unvermeidbar. Tatsächlich liegt bei einem weit überwiegend auf CO₂-arme Energieträger umgestellte Nachfragesektoren die Verwendung fossiler Energieträger in einzelnen Nischen aufgrund von logistischen Überlegungen eher fern. Die Residualmenge in der Wärmeerzeugung kann daher als Null genähert/interpretiert werden. Sie wird hier zur Beibehaltung der Konsistenz des Datensatzes dennoch angegeben.

steigt stark (2021: 0 TWh, 2045: 43 TWh). Die Nutzung von Müll geht gegenüber 2021 (22 TWh) stark zurück und konzentriert sich 2045 auf die Zementherstellung (4 TWh)⁴⁶. Der überwiegende Teil dieser Umschichtungen erfolgt in der Prozesswärmeverzeugung.

Abbildung 36: Endenergiebedarf Industrie in CARESupreme, 2021-2045



Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Direkte und indirekte Elektrifizierung spielt in der Prozesswärmeverzeugung eine hervorgehobene Rolle. Insbesondere der direkte Elektrifizierungsgrad nimmt in allen Subsektoren stark zu (Abbildung 37). Während er im Mittel 2021 noch bei nur 3 % liegt (mit mehreren Subsektoren ohne relevante direkte Stromnutzung in der Prozesswärmeverzeugung), sind die meisten Branchen 2045 in großem Umfang elektrifiziert (9 Branchen >50 %), mit Spitzenwerten von über 80 % (Glas und Keramik) und 70 % (Grundstoffchemie, NE-Metalle). Unter Einbeziehung von Ab- und Umgebungswärme liegen die von der Dampfnutzung bestimmten Subsektoren (Chemie, Papier, Nahrungsmittel) bei 80 % mittelbarer Elektrifizierung. Und unter Einbeziehung von Wasserstoff (indirekter Elektrifizierung) wird 2045 ein Mittel über alle Subsektoren von 79 % erreicht, mit Spitzen von 98 % (Metallerzeugung, Glas und Keramik) bis 87 % (Papier).

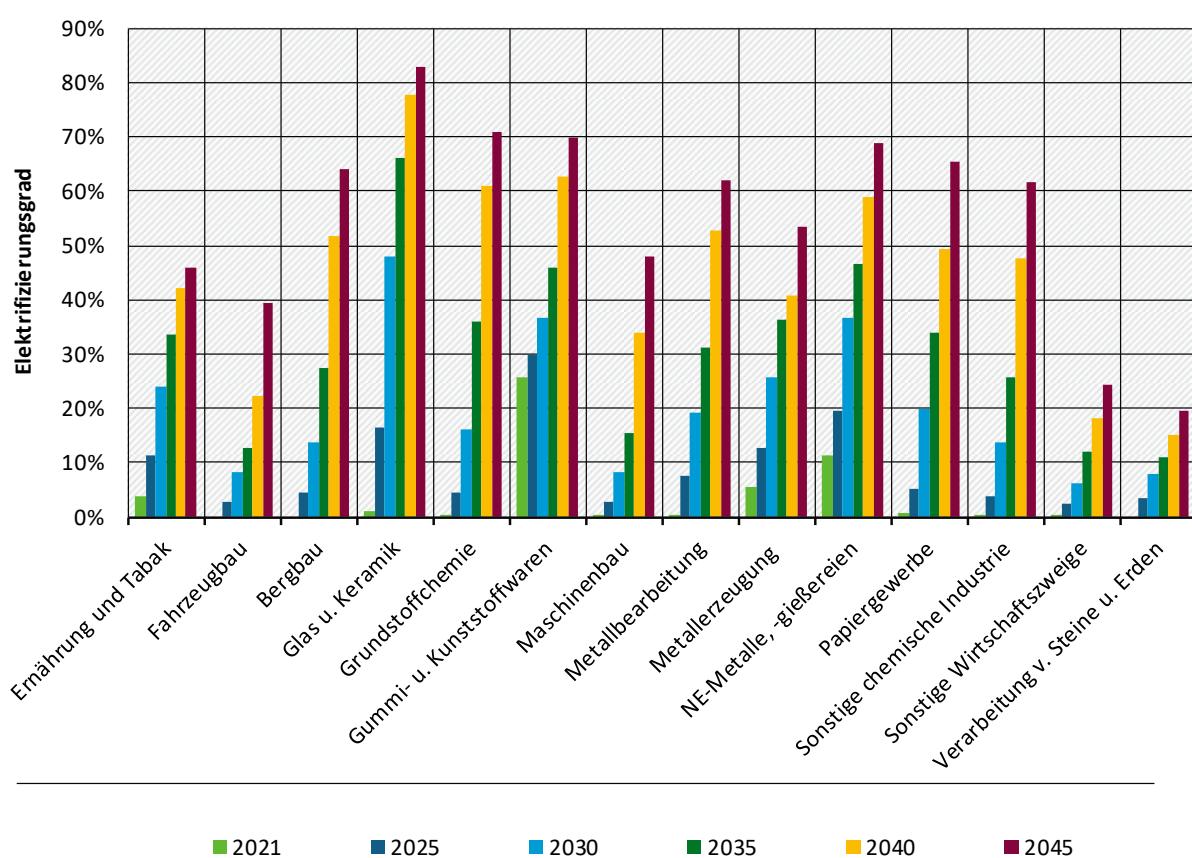
Dabei sinkt das Aktivitätsniveau - physische Produktionsmenge als Indikator für den Ressourcenbedarf - bis 2045 auf etwa 80 % des Wertes von 2021 (Abbildung 38). Dies begründet maßgeblich - neben Wirkungen der Energieeffizienz - den Rückgang des

⁴⁶ Die Kunststofffraktion dieser verringerten energetischen Müllnutzung wird als Rohstoff der chemischen Industrie für mechanisches und chemisches Recycling verwendet.

Endenergiebedarfs und wird durch den Materialbedarf reduzierende Strategien Kreislaufwirtschaft, Materialeffizienz und Suffizienz gestützt. Zusätzlich verringern einige Konsistenzmaßnahmen (Umstellung von Roheisenerzeugung) umgesetzte Materialmengen in Zwischenschritten der Produktion – ohne jedoch Konsummuster oder die Menge des ausgebrachten Endproduktes zu beeinflussen. Das Szenario geht dabei von gleichbleibenden Niveaus der Wertschöpfung aus, diese werden durch qualitative Verbesserungen erzielt.

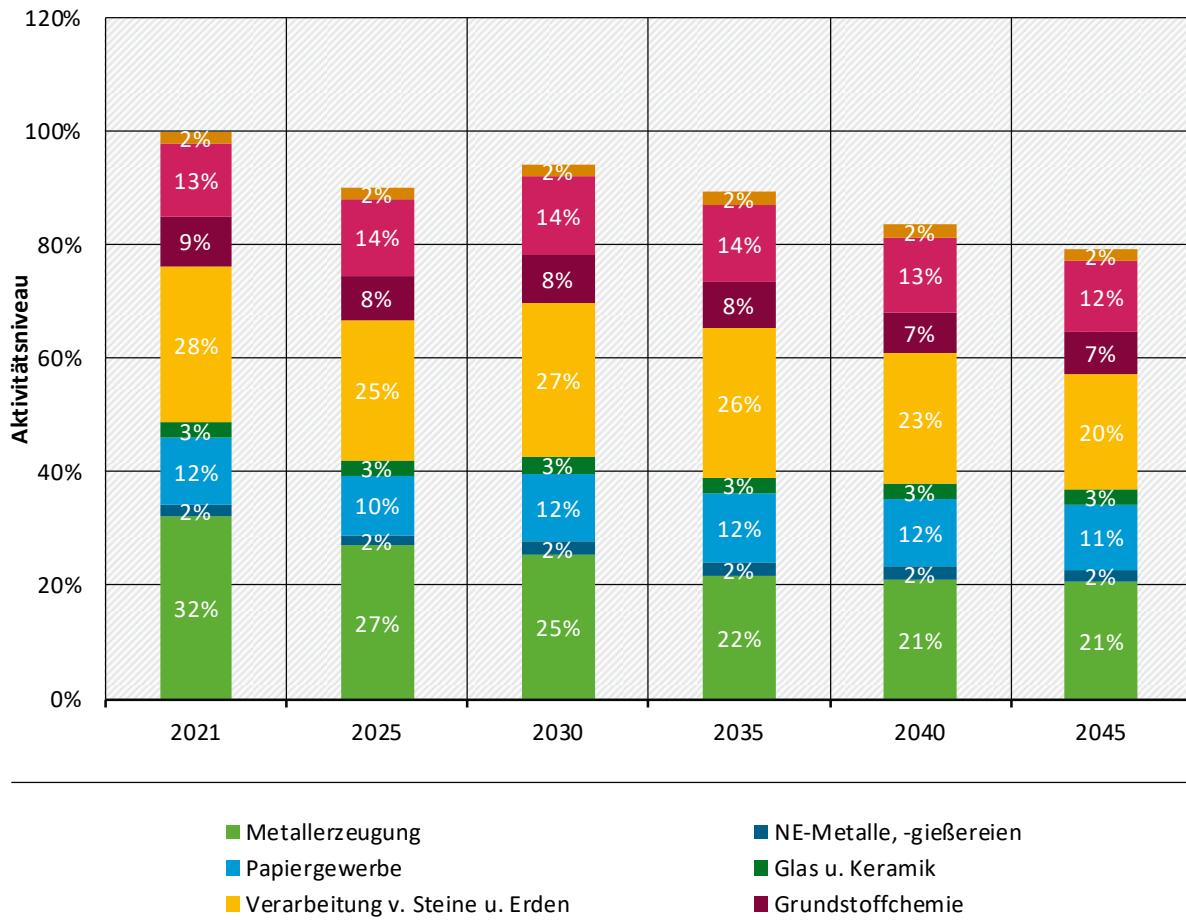
Innerhalb der Prozesswärme wird in der Modellierung der Nieder- und Mitteltemperaturbereich der Dampf- und Warmwassererzeugung (Abbildung 39) und dem Hochtemperaturbereich der Industrieöfen (Abbildung 40) unterschieden. Im Dampfbereich wird die 2021 vorherrschende Erdgasnutzung (91 TWh, 45 %) durch direkte Elektrifizierung in Wärmepumpen und Elektrodenkesseln (2045: 133 TWh, 71 %) abgelöst – ergänzt in geringem Umfang durch Wasserstoff (2045: 8 TWh, 4 %) und mit stark verringelter Biomassenutzung (2045: 11 TWh, 6 %) ergänzt. Der gesamte Zuwachs an Ab- und Umgebungswärmenutzung sowie der gelieferten Wärme (2045: 72 TWh, 38 %) findet im Dampfbereich statt. Im Industrieofenbereich (Abbildung 41) wird die im Vergleich stärkere Kohlen- (2021: 99 TWh, 38 %), Erdgasnutzung (95 TWh, 36 %) und Nutzung anderer fossiler (37 TWh, 14 %) durch direkte Elektrifizierung (2045: 93 TWh, 59 %) und Wasserstoff (2045: 38 TWh, 24 %) abgelöst. Hinzu kommt verstärkte Biomassenutzung, vor allem in der Zementherstellung (2045: 23 TWh, 15 %).

Abbildung 37: Direkter Elektrifizierungsgrad der Prozesswärme nach Subsektor, CARESupreme, 2021-2045



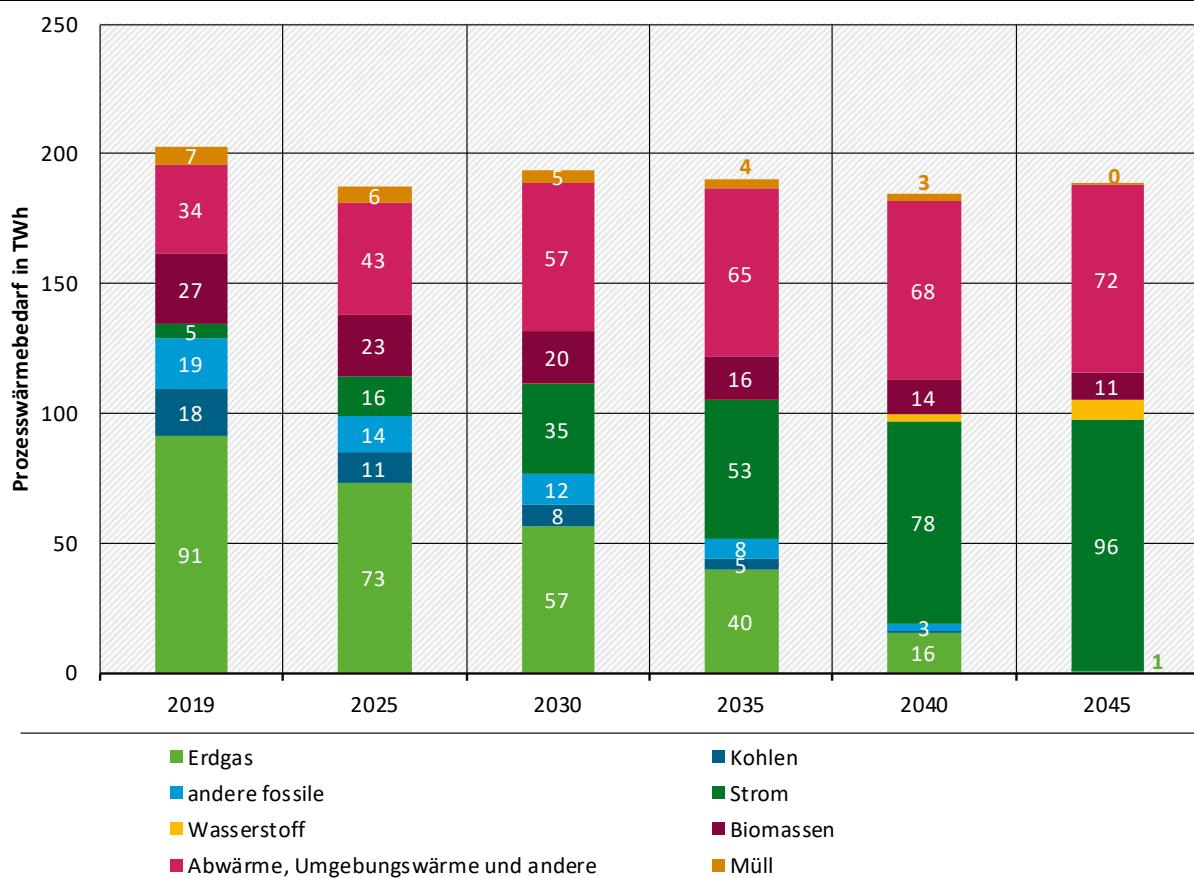
Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Abbildung 38: Aktivitätsniveau energieintensiver Subsektoren, CARESupreme, 2021-2045



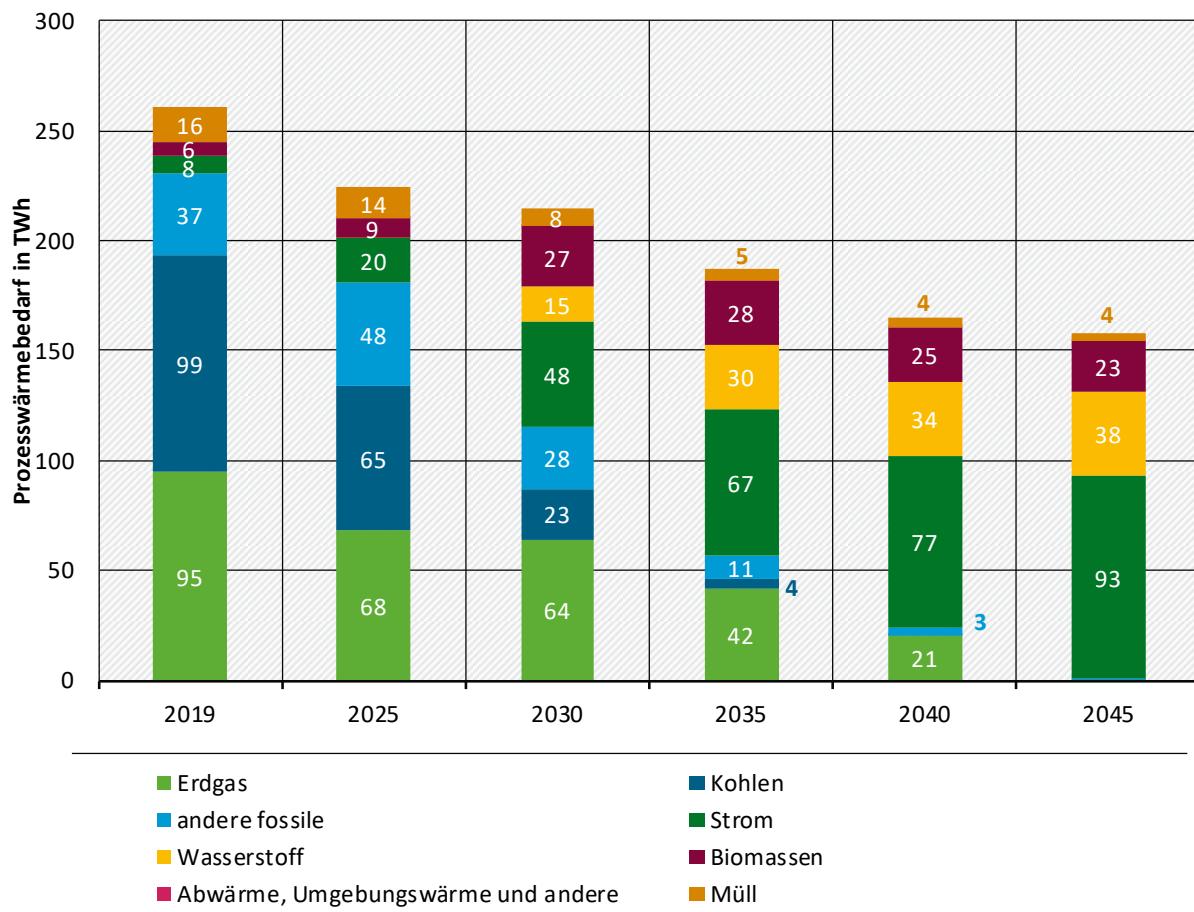
Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Abbildung 39: Prozesswärmeverbrauch Industrie (Dampf), CARESupreme, 2019-2045



Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Abbildung 40: Prozesswärmeverbrauch Industrie (Öfen), CARESupreme, 2019-2045



Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

4.2 CARETech

4.2.1 Narrativ

Das Szenario CARETech basiert auf CARESupreme. Die Berücksichtigung von Suffizienz als Nachhaltigkeitsstrategie ist in CARETech allerdings deutlich reduziert. Da die angestrebte Reduktion von Treibhausgasemissionen vergleichbar ist, wird eine stärker technologiebasierte Transformation notwendig. CARETech beantwortet damit die Frage nach einem möglichen (bezüglich der Treibhausgasemissionen) äquivalenten Pfad, falls Suffizienz und Kreislaufwirtschaft nicht in einem in CARESupreme angenommenen Ambitionsniveau Eingang in den Instrumentenmix finden oder die in CARESupreme angenommenen Beiträge aus anderen Gründen nicht erbracht werden können. Aus den in diesem Pfad erhöhten Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe entstehen höhere Bedarfe an fossilen und hochwertigen CO₂-armen Energieträgern. Zudem wird die Abscheidung prozessbedingter Treibhausgasemissionen notwendig, um innerhalb des Industriesektors mit CARESupreme vergleichbare Treibhausgasminderungen darzustellen.

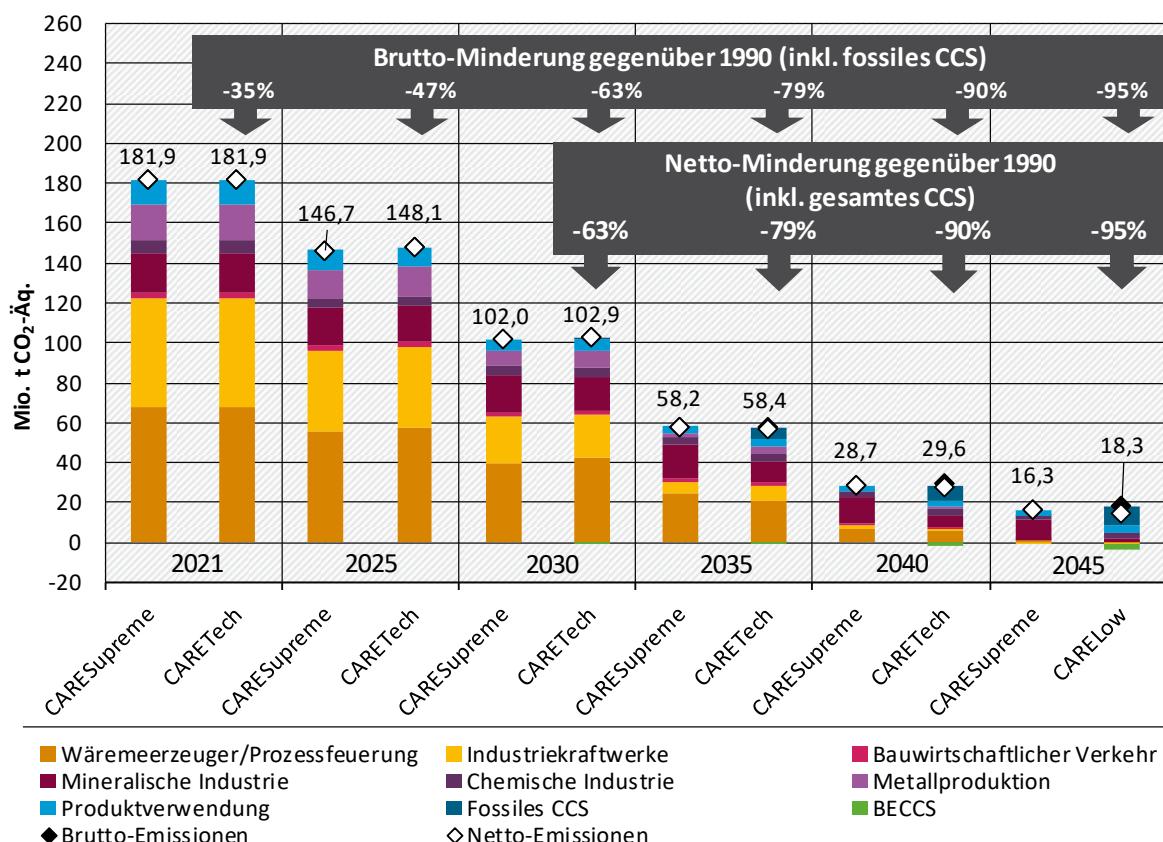
4.2.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

In CARETech werden Instrumente, die Suffizienz und Kreislaufwirtschaft verstärken, entfernt. Die folgend aufgeführten Einflüsse auf die Nachfrage nach Grundstoffen finden in CARETech somit **nicht** statt (vergleiche Abschnitt 4.1.2)

- ▶ Eisen und Stahl
 - Reduktion der Rohstahlnachfrage (R, S)
- ▶ Verarbeitung von Steinen und Erden (hier: Zement)
 - Reduktion der Nachfrage (R, S)
- ▶ Grundstoffchemie
 - Kreislaufführung von Kunststoffen (R)
- ▶ Glas
 - Sinkende Nachfrage im Bau- und Verpackungsbereich (S)
- ▶ NE-Metalle
 - Verbesserte Sammlung, Sortierung und Aufbereitung (R)
- ▶ Papier
 - Sinkende Nachfrage durch Digitalisierung (Printprodukte) und verändertes Konsumverhalten (Verpackungsprodukte, R)

4.2.3 Zentrale Ergebnisse

Abbildung 41: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie, CARESupreme und CARETech, 2021–2045



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

Anmerkung: Für die Kategorien „Wärmeerzeugung und Prozessfeuerungen“ und „Mineralische Industrie“ sind die *Bruttoemissionen* (vor den Abzug des abgeschiedenen und gespeicherten CO₂) dargestellt. Die *Nettoemission* pro Kategorie sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Erzeugte Treibhausgase (exkl. CCS, BECCS)						
Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen	67,9	57,8	42,2	20,4	5,8	0,4
Industriekraftwerke	54,5	40,3	24,7	16,2	4,7	0,8
Bauwirtschaftlicher Verkehr	2,5	2,2	2,1	2,1	0,9	0,0
Prozesse: Mineralische Industrie	19,9	17,9	19,0	19,2	21,0	20,8
Prozesse: Chemische Industrie	6,4	4,9	4,5	3,9	3,3	2,6
Prozesse: Metallproduktion	17,7	15,1	8,4	3,9	1,0	0,5
Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln	2,1	2,0	1,8	1,5	1,6	1,6
Prozesse: Elektronik-Industrie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Produktverwendung als ODS-Ersatzstoff	7,9	5,8	2,8	1,4	0,7	0,6
Sonstige Produktherstellung und -verwendung	2,9	1,8	0,8	0,6	0,6	0,6
Prozesse: Andere Bereiche	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt (=erzeugte Emissionen)	181,9	148,1	106,5	69,4	39,8	28,1
Fossiles CCS aus Industrieprozessen	0,0	0,0	-0,9	-4,2	-6,7	-9,2
Fossiles CCS aus Brennstoffen	0,0	0,0	-2,7	-6,7	-3,5	-0,6
Gesamt Abscheidung	0,0	0,0	-3,6	-11,0	-10,1	-9,8
Technische Negativemissionen						
BECCS aus fester Biomasse	0,0	0,0	-0,2	-0,9	-1,9	-3,7
Gesamt (=Netto-Emissionen)	181,9	148,1	102,8	57,5	27,7	14,6
<i>Minderung gegenüber 1990</i>	<i>-34,7 %</i>	<i>-46,9 %</i>	<i>-63,1 %</i>	<i>-79,4 %</i>	<i>-90,1 %</i>	<i>-94,8 %</i>

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

Die Treibhausgasemissionen des Industriesektors werden in CARETech im Jahr 2045 gegenüber 1990 um 90 % gemindert (Abbildung 41, Tabelle 23). CARETech erreicht damit nicht das Niveau der Treibhausgasminderung von CARESupreme. Die Minderung verläuft weitgehend linear –

mithin also auf Basis einer gleichen Lastenverteilung im Modellierungszeitraum. Allerdings sind Minderungen in den Jahren 2025 und 2030 etwas geringer als in CARESupreme (0,5 % und 0,3 % jeweils gegenüber 1990). Die Minderung betrifft auch in CARETech alle Teilbereiche (Prozesswärme, Industriekraftwerke, prozessbedingte Treibhausgasemissionen, Produktverwendung, andere) und bewirkt nur geringfügige residuale Treibhausgasemissionen in einer Vielzahl der Kategorien (Tabelle 23). Relevante verbleibende Treibhausgasemissionen sind in Prozessen der mineralischen Industrie (25 Mio. t CO₂-Äq.), der chemischen (2,6 Mio. t CO₂-Äq.) und Metallindustrie (0,5 Mio. t CO₂-Äq.) und der Produktverwendung und Elektronik (3,9 Mio. t CO₂-Äq.)⁴⁷ vorhanden. Die Residualmenge in der mineralischen Industrie ist die bei weitem bedeutendste und muss einem treibhausgasneutralen Gesamtsystem ausgeglichen werden. In CARETech wird daher für diese prozessbedingten und schwer vermeidbaren Quellen (Kalk- und Zementherstellung) CO₂-Abscheidung eingesetzt ((-)13,5 Mio. t CO₂-Äq.)⁴⁸. Diese ist so dimensioniert, ein ähnliches Niveau der Gesamtminderung wie in CARESupreme zu erreichen. Dabei werden vorrangig prozessbedingte Treibhausgasemissionen abgeschieden ((-)9,2 Mio. t CO₂-Äq.). Da im Gasstrom aber auch energiebedingte Treibhausgasemissionen enthalten sind, werden diese auch kurz- und mittelfristig aus der Nutzung fossiler⁴⁹ ((-)0,6 Mio. t CO₂-Äq.) und aus der Nutzung biogener Energieträger (-2,9 Mio. t CO₂-Äq.) abgeschieden. Dabei ist in CARETech wie in CARESupreme sichergestellt, dass die Umstellung auf CO₂-arme Energieträger Vorrang vor der Nutzung von CO₂-Abscheidung hat⁵⁰.

In CARETech sinkt der Endenergiebedarf nur geringfügig, und erreicht 2045 wieder in etwa den Stand von 2021 (708 TWh, Abbildung 42). Bis 2028 wird dabei die gleiche Entwicklung wie in CARESupreme unterstellt, hiernach wirken die in CARESupreme angenommenen Instrumente zur Steigerung von Kreislaufwirtschaft und Suffizienz nicht. Damit ist der Endenergiebedarf 2045 gegenüber CARESupreme um 166 TWh (30 %) erhöht. Dieser Mehrbedarf beinhaltet – aufgrund qualitativ gleicher Konsistenzstrategie – weit überwiegend eine höhere Stromnachfrage (+124 TWh, +35 %), ergänzt durch höheren Wasserstoff- (+28 TWh, +62 %) und sonstigen Bedarf (Biomassen, Abwärme, Müll, +15 TWh, +11 %).

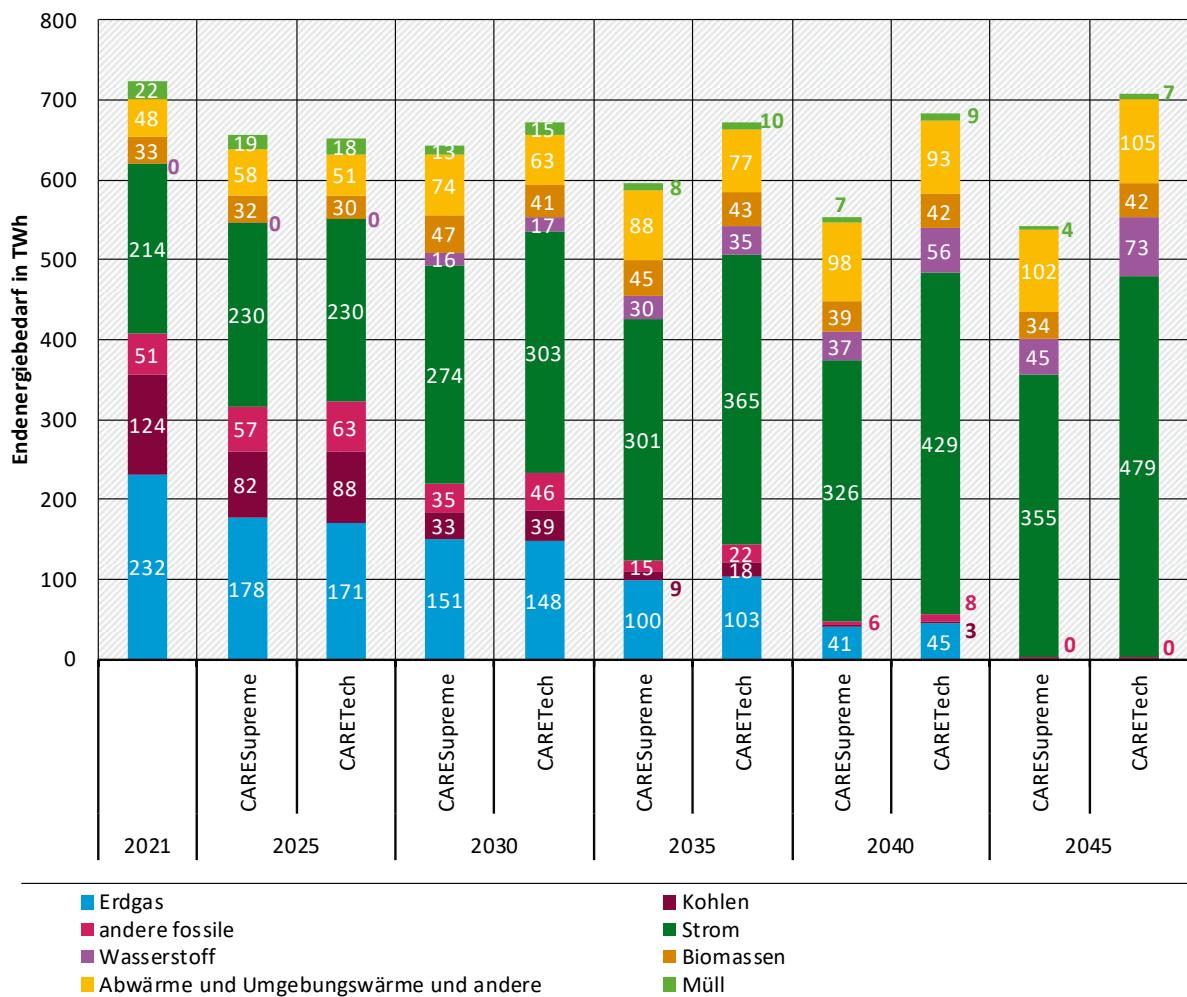
⁴⁷ Weitere kleine verbleibende Quellen residualer Treibhausgasemissionen sind modellbedingt – insbesondere nicht technisch unvermeidbar. Tatsächlich liegt bei einem weit überwiegend auf CO₂-arme Energieträger umgestellte Nachfragesektoren die Verwendung fossiler Energieträger in einzelnen Nischen aufgrund von logistischen Überlegungen eher fern. Die Residualmenge in der Wärmeerzeugung kann daher als Null genähert/interpretiert werden. Sie wird hier zur Beibehaltung der Konsistenz des Datensatzes dennoch angegeben.

⁴⁸ Hierfür werden etwa 3,5 TWh elektrische Energie benötigt. Diese Abschätzung basiert auf einem vereinfachten Ansatz, der weitere Bestätigung benötigt, die Größenordnung aber gut abbildet.

⁴⁹ Im Zementwerk als Energieträger eingesetzter Müll. Der tatsächlich noch fossile Anteil des darin enthaltenen Kohlenstoffs wird hier konservativ mit 100 % angenommen – dürfte sich aber durch die Umstellung der Rohstoffbasis der Kunststoffherstellung reduzieren und langfristig gegen 0 gehen.

⁵⁰ Näherungsweise so abgebildet, dass der Anteil CO₂-armer Energieträger am Gesamtenergiebedarf des Subsektors stets deutlich über der Diffusion der CO₂-Abscheidung liegt.

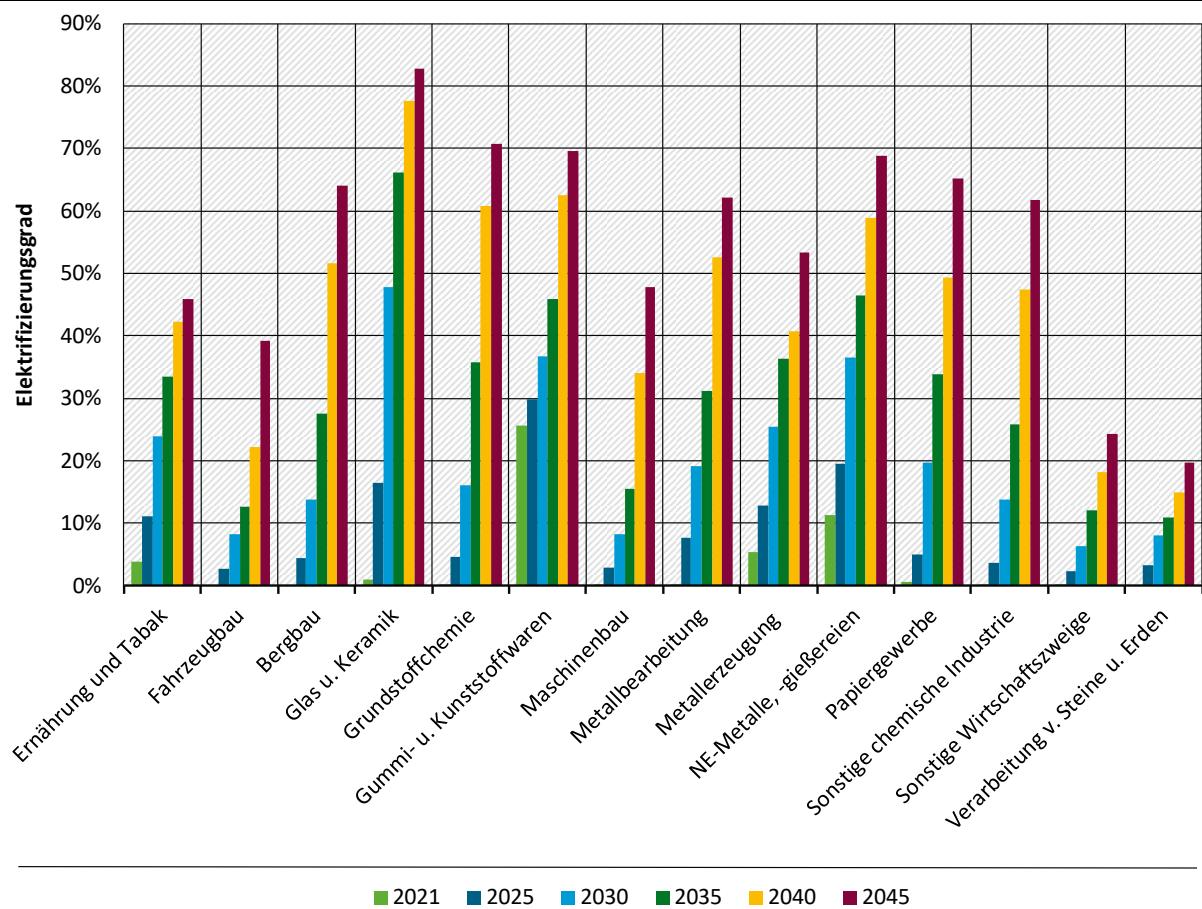
Abbildung 42: Endenergiebedarf Industrie, CARESupreme im Vergleich zu CARETech, 2021-2045



Quelle: Eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

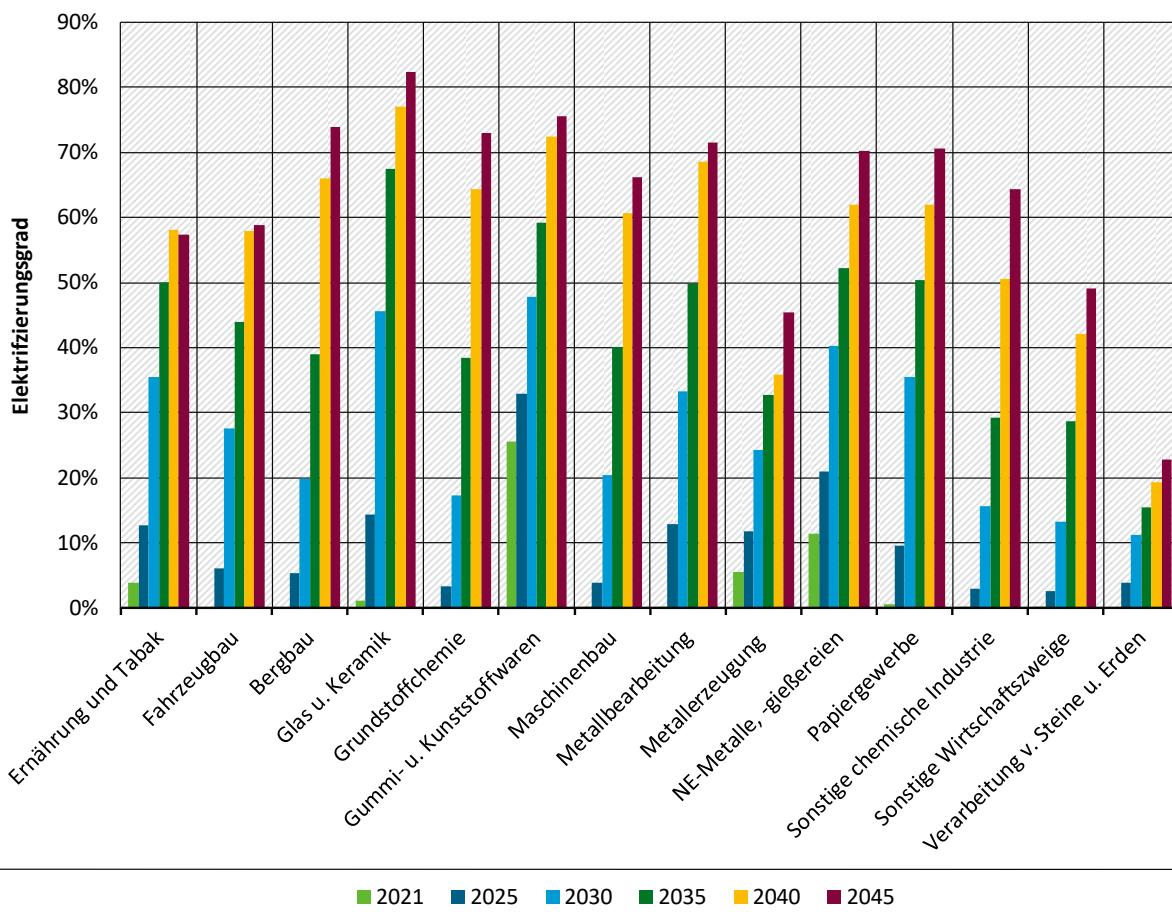
Der Elektrifizierungsgrad ist in CARETech generell etwas höher als in CARESupreme, nimmt aber grundsätzlich die gleiche Entwicklung (Abbildung 43 und Abbildung 44). Strom wird in CARETech überproportional stärker in der Prozesswärmeverzeugung genutzt, da die anderen zur Verfügung stehenden Energieträger (Fern- und Umgebungs-/Abwärme, Biomassen) nicht im gleichen Maß wachsen – die Differenz wird über direkte Stromnutzung gedeckt. Hinzu kommt eine Verschiebung von Wärmepumpen zu direkter elektrischer Beheizung. Dabei handelt es sich um eine Szenarioannahme, die geringeren Effizienz- und Transformationswillen abbildet.

Abbildung 43: Direkter Elektrifizierungsgrad der Prozesswärme nach Subsektor, CARESupreme, 2021-2045



Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

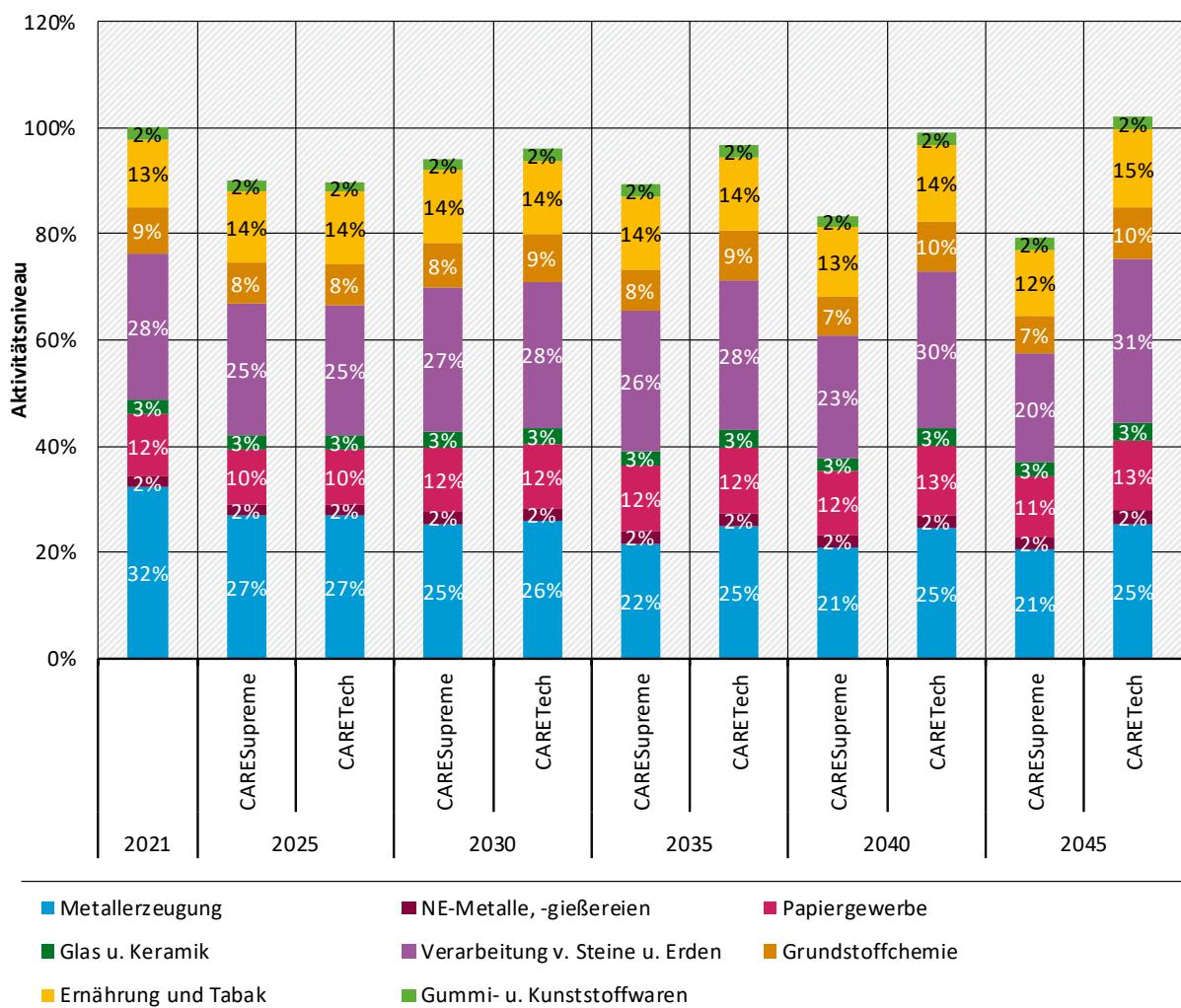
Abbildung 44: Direkter Elektrifizierungsgrad der Prozesswärme nach Subsektor, CARETech, 2021-2045



Quelle: eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Durch den Verzicht auf verstärkte Kreislaufwirtschaft und Suffizienz in CARETech, steigt der Bedarf an energieintensiven Grundstoffen nach 2028 an (Abbildung 45). Dies betrifft alle Subsektoren, allen voran aber die Verarbeitung von Steinen und Erden (50 % höhere Aktivität im Jahr 2045 als in CARESupreme), Grundstoffchemie (36 % höhere Aktivität) und Metallerzeugung (22 % höhere Aktivität).

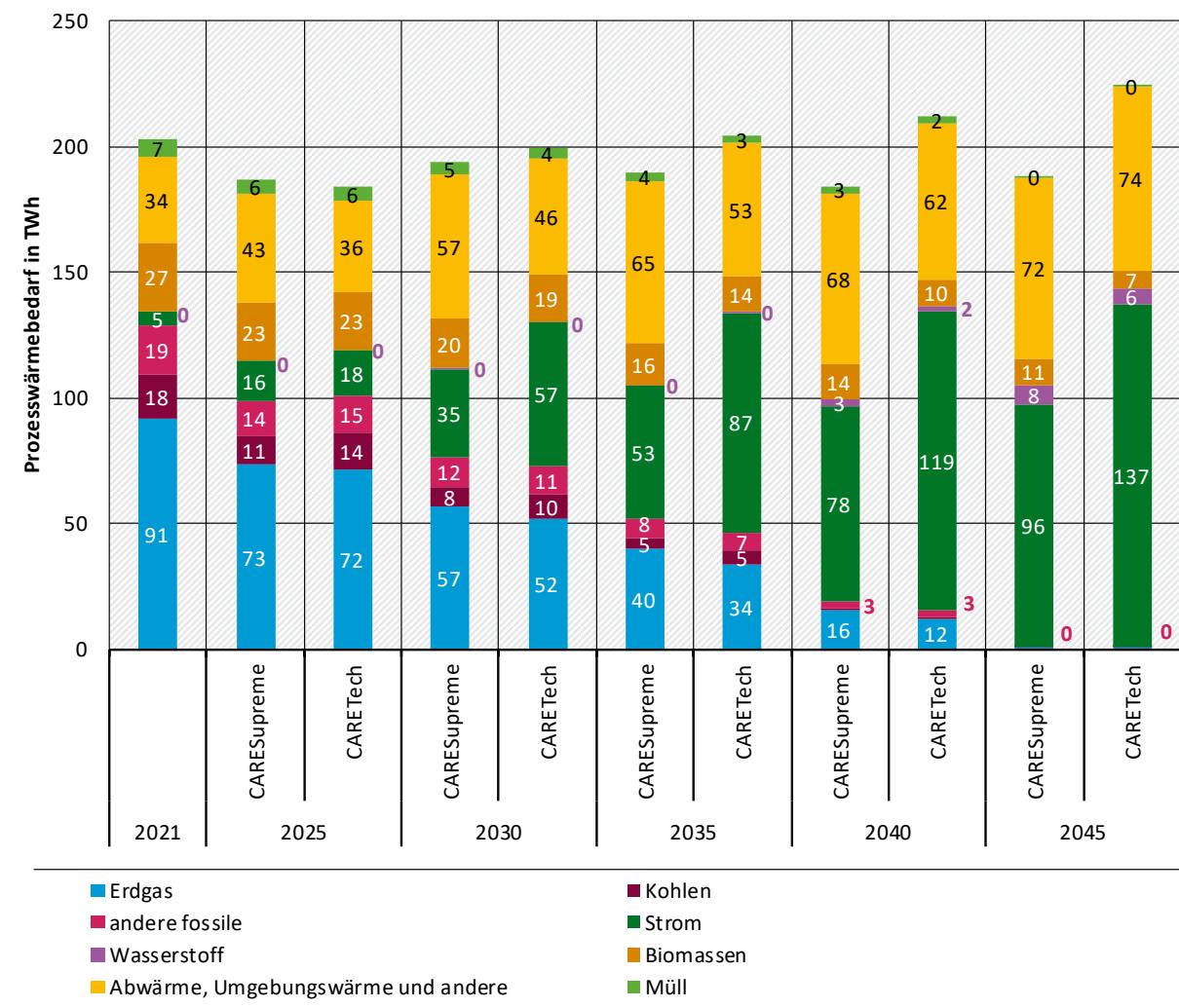
Abbildung 45: Aktivitätsniveau energieintensiver Subsektoren, CARESupreme im Vergleich zu CARETech, 2021-2045



Quelle: Eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

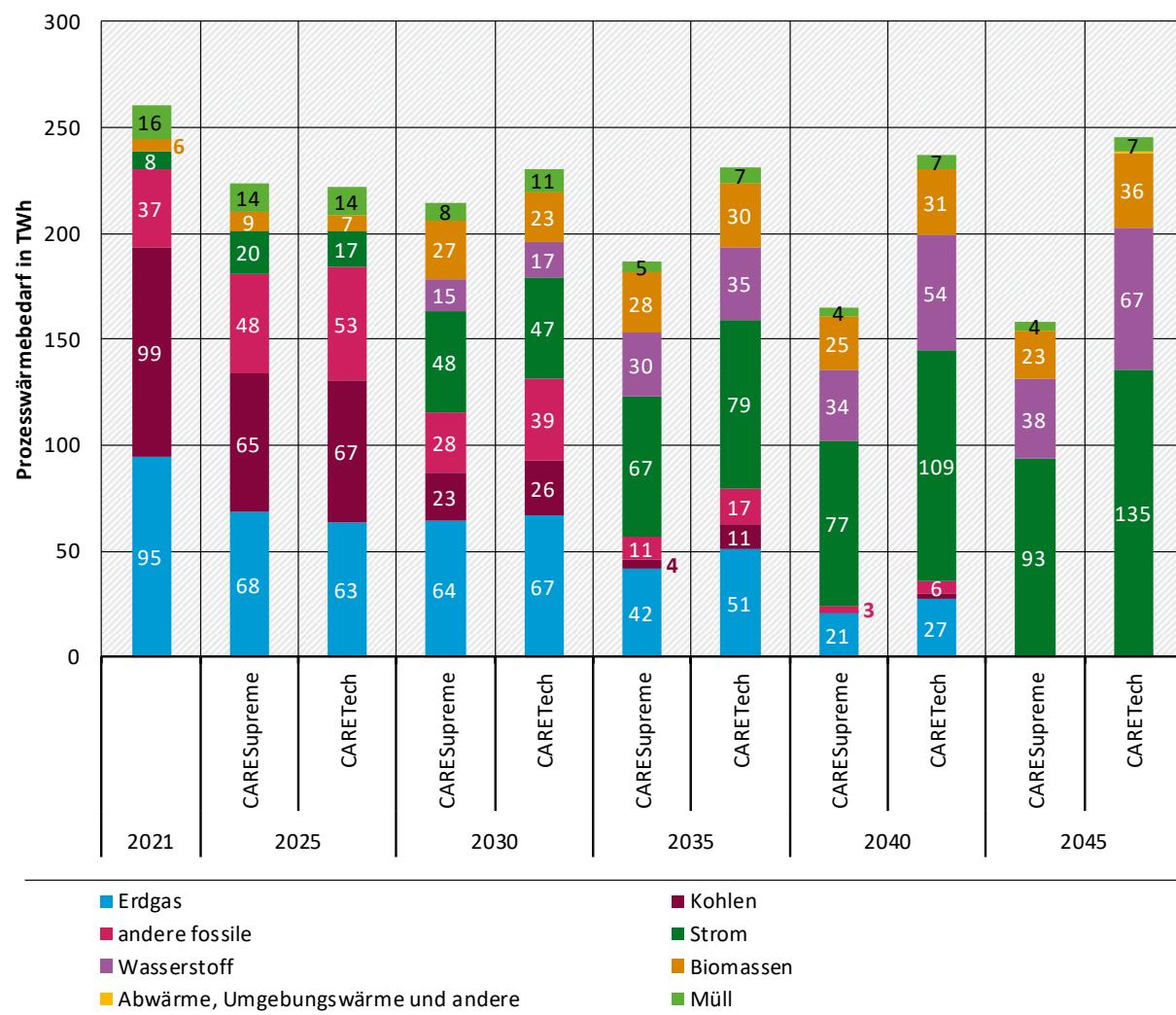
Die durch die Aktivität in CARETech vorgegebene – und bereits im gesamten Endenergiebedarf sichtbare – Entwicklung setzt sich im Prozesswärmebedarf fort. CARETech beinhaltet ab 2030 einen höheren Bedarf in der Dampferzeugung im Vergleich zu CARESupreme (+36 TWh im Jahr 2045) und den Industrieöfen (+88 TWh im Jahr 2045) (Abbildung 46). Darin wird in beiden Technologiebereichen mehr Strom eingesetzt im Vergleich zu CARESupreme (+40 TWh in Dampf, +42 TWh in Öfen, jeweils im Jahr 2045), darüber hinaus in Öfen auch mehr Wasserstoff (+29 TWh) und Biomasse (+12 TWh).

Abbildung 46: Prozesswärmeverbrauch Industrie, Dampf, CARESupreme im Vergleich zu CARETech, 2021-2045



Quelle: Eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

Abbildung 47: Prozesswärmeverbrauch Industrie, Industrieöfen, CARESupreme im Vergleich zu CARETech, 2021-2045



Quelle: Eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

5 Gebäude⁵¹

5.1 CARESupreme

5.1.1 Narrativ

Das Szenario zeichnet sich dadurch aus, dass Gebäude durch ambitionierte Neubaustandards, Modernisierungen und Sanierungen deutlich weniger Energie für Raumwärme und -kälte im Vergleich zu heute verbrauchen. Sie werden vollständig durch erneuerbare Energien versorgt.

Gebäude werden – im Sinne von „worst first“ – beginnend mit den ineffizientesten Gebäuden sukzessive energetisch modernisiert. Leitstandard ist dabei der EH-70 Standard. Bei der Sanierung kommen Dämmmaterialien aus natürlichen Rohstoffen, materialeffiziente Fenster und Holzbauweisen vermehrt zum Einsatz.

Schlüsseltechnik der dezentralen Wärmeversorgung ist die Wärmepumpe. Der Einsatz von Biomasse (v.a. Holz) geht deutlich zurück und beschränkt sich auf Gebäude, für die keine Alternativen zur Verfügung stehen. Die Wärmeversorgung über Wärmenetze wird deutlich ausgebaut. Die Dekarbonisierung der Wärmenetze erfolgt über eine Vielzahl verschiedener Techniken und Energiequellen, v.a. Großwärmepumpen, (unvermeidbare) Abwärme, Biomasse, Solarthermie und Wasserstoff.

Durch die Annahme von suffizientem Verhalten werden weitere Einsparungen erzielt: Im Bereich des Neubaus liegt der Fokus auf dem Bau von Mehrfamilienhäusern. Als Folge innovativer Bau- und Wohnkonzepte reduziert sich der Pro-Kopf-Wohnflächenbedarf und damit auch die absolute Wohnfläche. Die Entwicklung des Wohn- und Nutzflächenbedarfs wird aktiv instrumentiert. Außerdem wird die Raumtemperatur in allen Gebäuden im Winter im Mittel um einen Grad auf durchschnittlich 19°C gesenkt.

Neben dem Raumwärme- und Kältebedarf beinhaltet der Gebäudesektor große elektrische Haushaltsgeräte (z. B. Waschmaschinen), IKT-Endgeräte (z. B. Fernseher), Beleuchtung, Klimatisierung und sonstige elektrische Kleingeräte (z. B. Haartrockner). In Nichtwohngebäuden sind darüber hinaus Anlagen für Prozesswärme, Prozesskälte, Druckluft und sonstige Anwendungen enthalten.

Hierzu lösen politische Maßnahmen und Lifestyle-Änderungen einen nachhaltigen Konsumwandel aus. Die Ausstattungsraten von Geräten je Haushalt bleiben konstant. Geräte sind langlebiger, reparierbar und werden bis zum technischen Lebensende genutzt. Vorsorge senkt vorzeitige Ausfälle, die Nutzung bestimmter Geräte nimmt ab. Der Trend zu größeren Geräten stagniert. Neben diesen Suffizienz-Änderungen verbessert sich die Energieeffizienz der Geräte stark, unterstützt durch schärfere EU-Effizienzstandards und Energielabel-Verordnungen.

⁵¹ Der Sektor Gebäude umfasst im Bundes-Klimaschutzgesetz ausschließlich die direkten Treibhausgasemissionen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe in Haushalten und Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD). Im Sektor werden deshalb die Anwendungen Raumwärme und Warmwasser sowie Geräte und Prozesse bilanziert.

5.1.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

Raumwärme und Warmwasser

- ▶ Reform der Steuern, Abgaben, Umlagen bei den Energiepreisen sowie CO₂-Bepreisung: Dadurch dass die Nutzung erneuerbarer Energieträger günstiger wird als die fossiler, werden die ökonomische Rahmenbedingungen für die Dekarbonisierung gesetzt.
- ▶ Gebäudeenergiegesetz (GEG):
 - 65 %-Anforderung für erneuerbare Wärmeenergien: Die Ausgestaltung in CARESupreme ist ambitionierter als die in der Realität verabschiedete GEG-Novelle. Die Anforderung für neuinstallierte Heizungen gilt im Szenario wie im GEG ab dem 30.6.2026/2028. Für von 2024 bis Mitte 2028 verbauten Gaskessel gelten in CARESupreme und GEG die gleichen Mindestquoten für den Einsatz erneuerbarer Brennstoffe: 15 % im Jahr 2029, 30 % im Jahr 2035 und 60 % im Jahr 2040. In der Modellierung wird davon ausgegangen, dass Eigentümer*innen spätere Mehrkosten in ihre Investitionsentscheidung miteinpreisen. Dies wird durch begleitende Informationskampagnen sichergestellt. Das Ambitionsniveau in CARESupreme ist zudem höher als im realen GEG: Der Einsatz von fester Biomasse wird im Szenario nur erlaubt, wenn keine andere Lösung technisch möglich ist („Kaskadenmodell“). Mehrkosten für Wasserstoff und Biomethan sind in CARESupreme vom Vermieter zu tragen. Es gibt keine Wasserstoffnetzausbaugebiete. Ab 2029 wird die 65 %-Vorgabe in der Modellierung zu einer 100 %-Vorgabe angeschärft.
 - Mindestenergieeffizienzstandards für Bestandsgebäude (MEPS) in ambitionierter Form für Wohngebäude („worst 75 %“ im Jahr 2042) und Nichtwohngebäude („worst 75 %“ im Jahr 2039): Während in der EU-Gebäuderichtlinie nur MEPS für Nichtwohngebäude vereinbart wurden, wird dieses Instrument in CARESupreme auch für Wohngebäude eingeführt. Außerdem ist das Ambitionsniveau höher als in der Realität: Anstatt nur die ineffizientesten 26 % „wegzusanieren“, werden in CARESupreme die ineffizientesten 75 % energetisch saniert.
 - Verstärkte Mindestvorgaben für Effizienz bei Neubau (Effizienzhaus 40 ab 2025) und Sanierung (Leitstandard Effizienzhaus 70 ab 2025): Wenn neugebaut bzw. saniert wird, stellt eine Verschärfung des GEG sicher, dass ambitionierter Wärmeschutz zum Tragen kommt.
- ▶ Anpassungen der Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG): Ausrichtung der Förderkonditionen am Langfristziel eines treibhausgasneutralen Gebäudebestandes durch Fokussierung auf Bestandssanierungen gegenüber Neubau, höhere Fördersätze für höhere Standards, Haushaltsunabhängige langfristige Sicherstellung ausreichender Mittel, Einstellung der Förderung für Biomasseheizungen aus Gründen der Nachhaltigkeit
- ▶ Verschärfung der Immissionsschutz-Grenzwerte (Biomasseheizungen): Dadurch wird der Einsatz von Holz zum Heizen sukzessive verringert, insbesondere für dezentrale Kaminöfen.
- ▶ Heizungsoptimierung und andere geringinvestive Maßnahmen
 - Ausweitung der Bestimmungen der EnSimMaV in Form verpflichtender Heizungsoptimierung und hydraulischem Abgleich sowohl in Mehr- als auch in Einfamilienhäusern.

- Einführung eines Energieeinsparverpflichtungssystems (Energy Efficiency Obligation System; EEOS): Grundidee des Instruments ist, dass z.B. Energieversorgungsunternehmen wie Stadtwerke verpflichtet werden jährlich Energie einzusparen, d.h. z.B. ihren Gasabsatz zu reduzieren. Um das zu erreichen, führen sie Effizienzmaßnahmen bei ihren Kund*innen durch. Die Kosten dafür werden auf alle umgelegt. Es wird ein Fokus auf Effizienz bei Haushalten mit geringen Einkommen gelegt.
- ▶ Wärmepumpen-Offensive: Zusätzlicher Förderschwerpunkt für den Einsatz von Wärmepumpen insb. In Bestands-Mehrfamilienhäusern, um den Markthochlauf mit Praxis-Beispielen zu verstärken.
- ▶ Kommunale Wärmeplanung wie im Wärmeplanungsgesetz
- ▶ Anpassungen am Mietrecht, z. B. (Teil)Warmmietenmodell zur sozialgerechten Verteilung der Modernisierungskosten in vermieteten Gebäuden zwischen Mietenden, Vermietenden und Staat (über Förderung).
- ▶ Verpflichtender gebäudeindividueller Sanierungsfahrplan (iSFP) bei Eigentumsübertragung, Neuvermietung und Förderung.
- ▶ Förderung Serielles Sanieren: Durch einen erhöhten Vorfertigungsgrad können Kosten und Zeitaufwand bei Sanierungen reduziert werden.
- ▶ Instrumentenset zur Eindämmung des Flächenbedarfs (Wohn- und Nutzfläche): z.B. Förderprogramm für effiziente Wohnraumnutzung, kommunale Beratungsstellen, Wohnungstauschbörsen, Vorgaben und Vollzug gegen Leerstand und Zweckentfremdung von Wohnraum, Fokus der Neubauförderung auf Mehrfamilienhäuser und Vorgaben zum flexiblen Umbau (Teilung) von Ein- und Zweifamilienhäusern.

Geräte und Prozesse

- ▶ Verschärfte Mindesteffizienzstandards unter der EU Ökodesign-Richtlinie: Anhebung von Mindesteffizienzstandards für folgende Produktgruppen: Kühlschränke, Gefrierschränke, Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler, Herde, Beleuchtung, elektronische Displays (einschließlich Fernsehgeräten), Computer, Set-Top-Boxen.
- ▶ Anforderungen an kreislauforientiertes Produktdesign: Die neue Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte ((EU) 2024/1781) setzt einen Rahmen für die Festlegung von Anforderungen, um Kreislaufwirtschaft und andere Nachhaltigkeitsaspekte zu verbessern. Dieser Rahmen ermöglicht die Festlegung zahlreicher Anforderungen, u. a. in Bezug auf die Reparierbarkeit von Produkten. Parametrisierung über eine pauschale Anhebung der durchschnittlichen technischen Lebensdauern neuer Geräte.
- ▶ Informationskampagne für Klima- und Ressourcenschutz: Im Zuge einer gezielten Informationskampagne wird ein Wandel hin zu nachhaltigem Konsum unterstützt. Pauschale Reduzierung der Nutzungsintensität (Betriebsstunden pro Jahr). Keine weitere Zunahme der Gerätegröße (z.B. Bildschirmdiagonale von Fernsehgeräten). Keine weitere Zunahme der Ausstattungsraten (Anzahl der Geräte je Haushalt), beispielsweise für Klimaanlagen.
- ▶ Verbot von Gasherden: Verbot neuer Gasherde ab 2025 und damit Substitution hinzu Stromherden. Bestehende Gasherde verbleiben bis zum Ende ihrer Lebensdauer im Bestand.

Eine detaillierte Beschreibung sowie deren Parametrisierung aller berücksichtigten Instrumente kann Anhang A entnommen werden.

5.1.3 Zentrale Ergebnisse

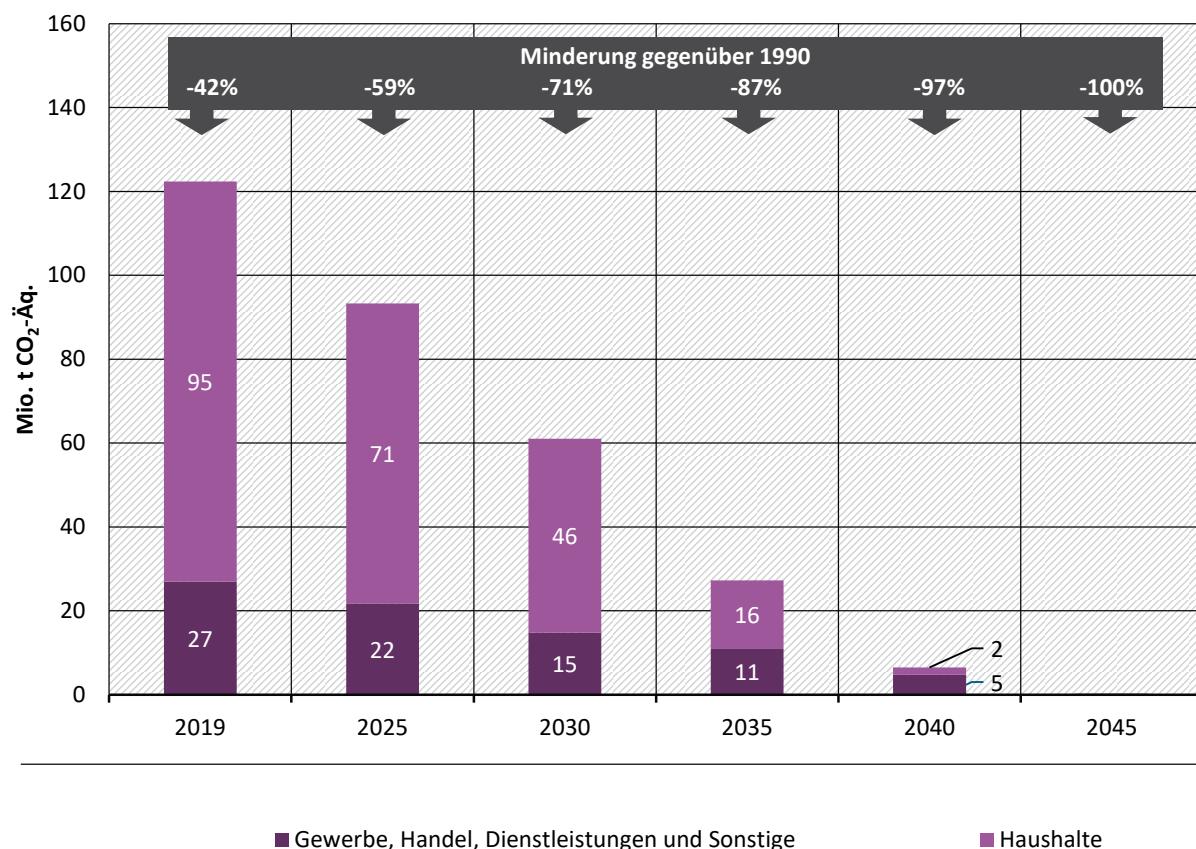
Abbildung 48 und Tabelle 24 zeigen die direkten Emissionen des Gebäudesektors.⁵² Das Sektorziel für 2030 im Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 wird erreicht. Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Gründe: erstens die Anforderung zur Nutzung von 65 % erneuerbaren Energien für neuinstallierte Heizungen, die ambitionierter ist als das verabschiedete GEG. Das ordnungsrechtliche Instrument leitet den Phase-Out aus der fossilen Wärmeerzeugung in Gebäuden ein. Zweitens sorgen ambitionierte MEPS dafür, dass die energetisch ineffizientesten Gebäude mit dem höchsten CO₂-Ausstoß prioritär energetisch saniert werden.

Nach 2030 schreitet die Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung weiter stark voran. Die 65 %-Regel hat die Trendwende hin zu erneuerbaren Energien eingeleitet. Durch die ökonomischen Rahmenbedingungen wird diese Entwicklung verstärkt: Ein steigender CO₂-Preis trifft auf zielgerichtete und attraktive Förderbedingungen. Ambitionierte MEPS in den Dreißigerjahren führen dazu, dass der Gesamtbestand bis 2045 zu effizienten Nullemissionsgebäuden saniert wird – nur 18 % der Gebäude haben noch die Effizienzklasse C oder schlechter. Im Jahr 2045 wird das Ziel der Treibhausgasneutralität erreicht.⁵³

⁵² In Gebäuden wird Fernwärme und Strom verwendet. Gemäß KSG-Sektorenlogik werden deren Emissionen im Sektor Energiewirtschaft bilanziert. Direkte Emissionen bei der Verwendung von Biomasse werden ebenfalls nicht bilanziert.

⁵³ Die Verbrennung von Biomasse führt zu marginalen Methan- und Lachgasemissionen.

Abbildung 48: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude, CARESupreme, 2021–2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Tabelle 24: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Sonstige	26,9	21,8	14,8	10,9	4,8	0,1
Haushalte	92,6	71,5	46,2	16,4	1,7	0,1
Gesamt	119,5	93,3	61,0	27,3	6,5	0,3
Minderung gegenüber 1990	-43,1 %	-55,6 %	-70,9 %	-87,0 %	-96,9 %	-99,9 %

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

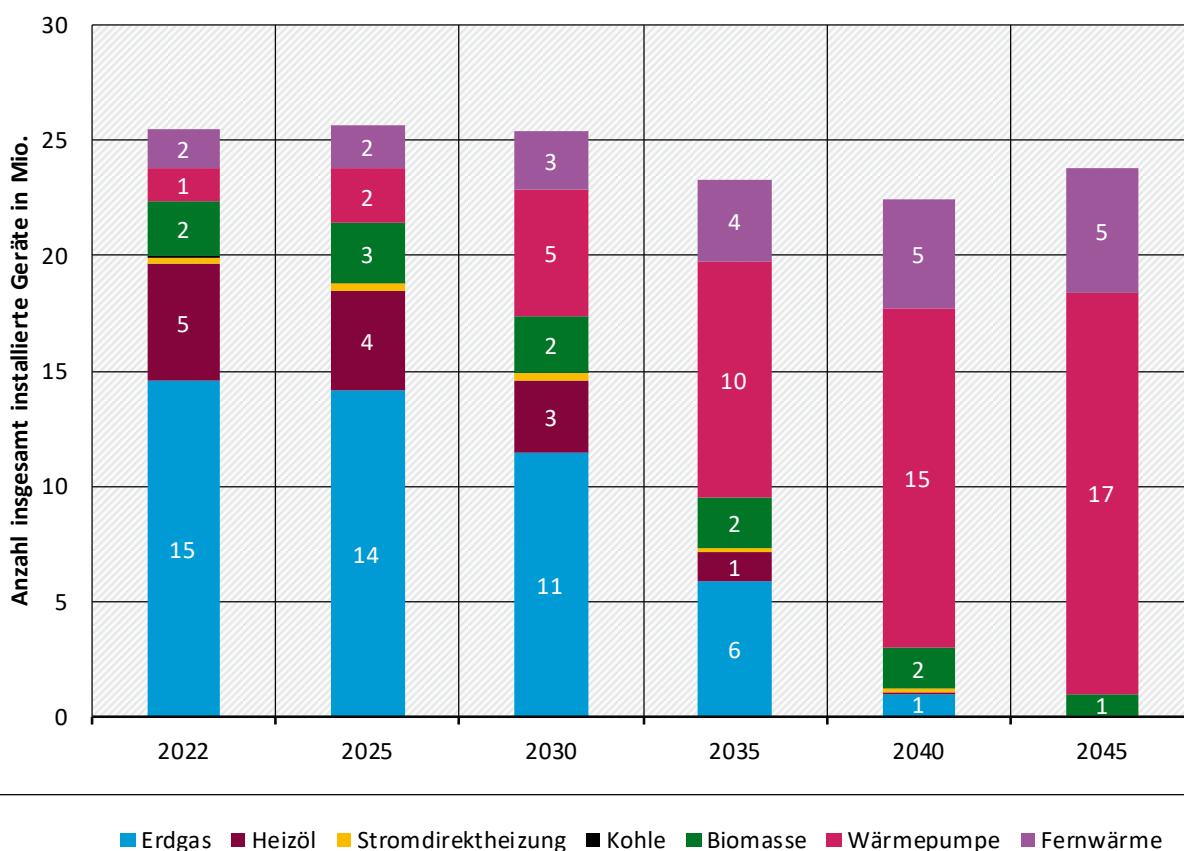
Die Wärmewende besteht grundsätzlich aus zwei Elementen: erstens der Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien und zweitens aus der Senkung des Energieverbrauchs durch energetische Sanierung (Dämmung) und angepasstes Verhalten (Suffizienz).

Die Entwicklung der Wärmeversorgung wird in Abbildung 49 veranschaulicht. Dort ist die Anzahl der insgesamt verbauten Geräte zu sehen, die als primäre Wärmeerzeuger dienen.⁵⁴ Die bisher vorherrschenden, fossilen Leittechniken Erdgas- und Heizölkessel werden abgelöst. Zukünftig wird die Wärmepumpe am häufigsten verwendet, gefolgt vom Anschluss an ein Wärmenetz. Die Verwendung von Biomasse zur Beheizung von Gebäuden wird durch den Instrumentenmix stark zurückgefahren und verbleibt auf einem niedrigen Niveau, das durch das nachhaltig verfügbare, nationale Biomassepotenzial gedeckt werden kann. Die Verwendung von Biomasse konzentriert sich auf Restholz, das zu Pellets verpresst in effizienten Zentralheizungen zum Einsatz kommt in Gebäuden mit Hemmnissen für Wärmepumpen und Wärmenetze. Solarthermie dient zur Reduktion des Brennstoffeinsatzes. Durch den Phase-Out fossiler Kessel und Holzheizungen spielt sie in diesem Szenario nur eine geringe Rolle.

Das Diagramm stellt die Anzahl verbauter Geräte dar. Das heißt, ein Mehrfamilienhaus, das mit Erdgas-Etagenheizungen versorgt wird, taucht mit mehr als einem Gerät auf, und bei Wärmepumpen nehmen wir eine Kaskadenschaltung mehrerer Geräte an. Der Anteil an Fernwärme, für die je Gebäude nur eine zentrale Anschlussstation verbaut wird, ist somit im Diagramm geringer als der Anteil an Energie je Energieträger.

In der [Datentabelle zu den Szenarien CARESupreme und CARETech](#) sind die jährlich verbauten Wärmeerzeuger zu finden.

Abbildung 49: Entwicklung der installierten primären Wärmeerzeuger in Mio. in Wohn- und Nichtwohngebäuden, CARESupreme, 2022-2045



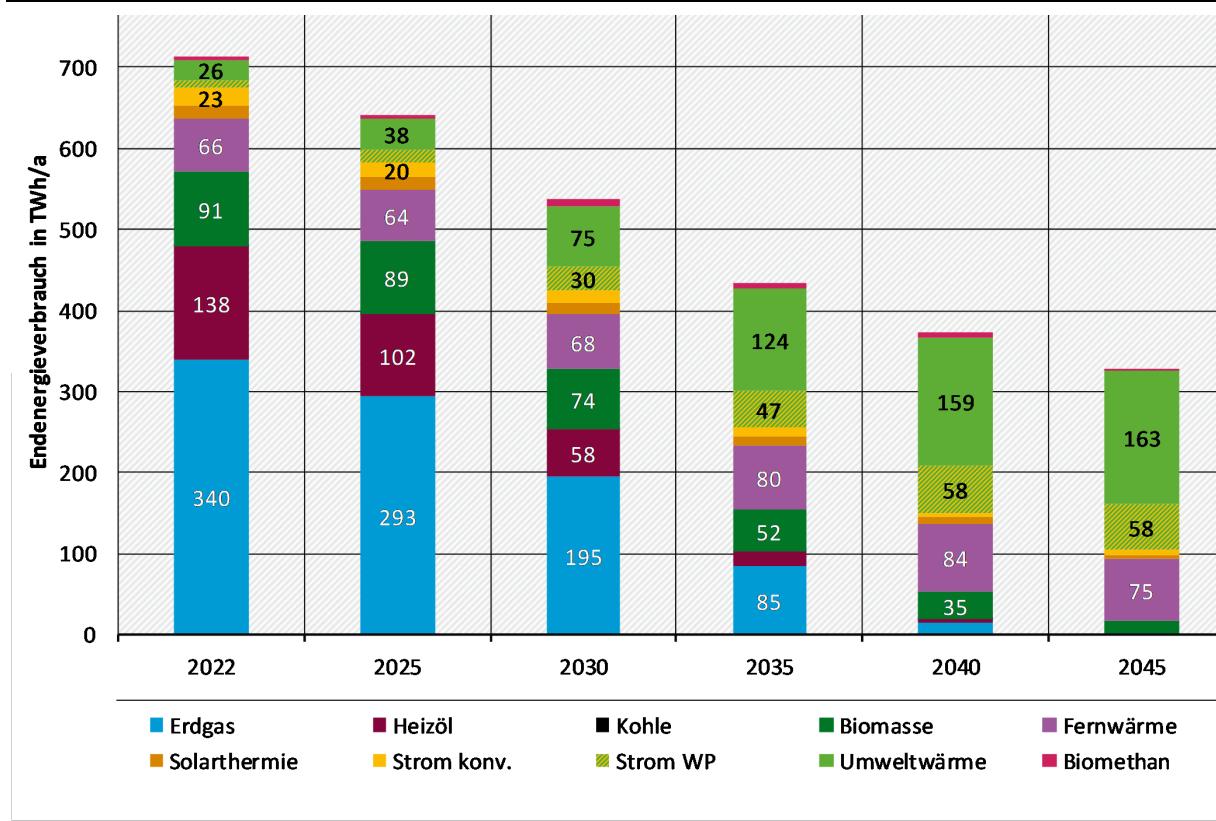
Quelle: Öko-Institut, Anmerkung: Hier werden die insgesamt verbauten Geräte angegeben. Ein Mehrfamilienhaus mit Gas-

⁵⁴ Als primärer oder auch Haupt-Wärmeerzeuger wird das Heizungssystem bezeichnet, das den Großteil der Wärme bereitstellt. Z.B. kann das ein Erdgaskessel sein, der zusätzlich durch einen sekundären Wärmeerzeuger wie eine Solarthermieanlage unterstützt wird.

Etagenheizung taucht mit mehr als einem Gerät auf, ebenso Gebäude, die dezentralen mit Biomasse beheizt werden. Große Gebäude werden von mehreren Wärmepumpengeräten versorgt (Kaskadierung).

Der Endenergieverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden des GHD-Sektors je Energieträger in Abbildung 50 korreliert mit der Verteilung der installierten Heizungssysteme: Erdgas und Heizöl werden durch Wärmepumpen und Fernwärme ersetzt. Die Effizienz der Wärmepumpen ist hoch: Im Jahr 2045 ergibt sich eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von 3,8. Generell ist CARESupreme durch ein kaum zu übertreffendes Ambitionsniveau hinsichtlich der Instrumente und ihrer stringenten Umsetzung gekennzeichnet, weshalb sich der Endenergieverbrauch von 2022 bis 2045 halbiert.

Abbildung 50: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser je Energieträger, CARESupreme, 2022-2045

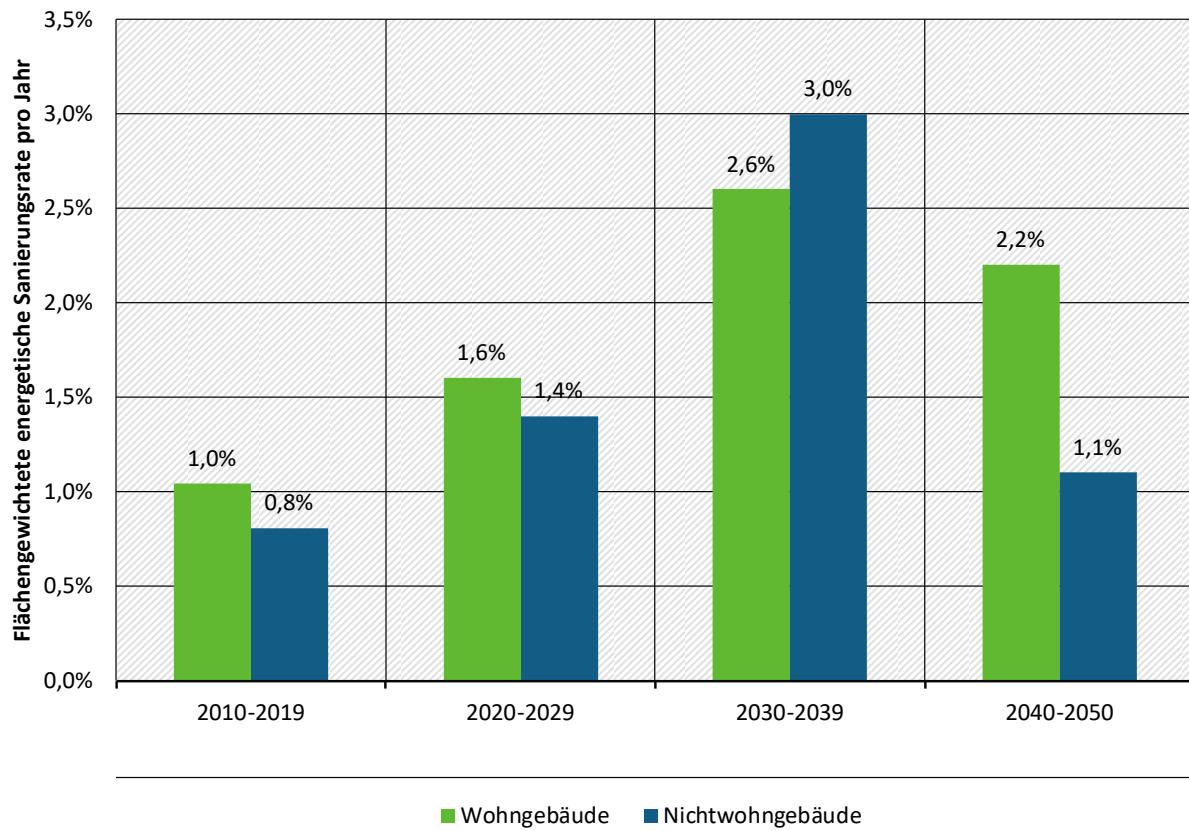


Quelle: Öko-Institut; Strom konv. = konventionelle Stromdirektheizungen, Strom WP = Wärmepumpen

Die hohen Endenergieeinsparungen werden zum einen durch eine Steigerung der Energieeffizienz erreicht. In Abbildung 51 ist zu sehen, dass die flächengewichtete Sanierungsrate stark ansteigt. Haupttreiber dafür sind MEPS, die zu einer zeitweisen Verdreifachung der Sanierungsrate führen. Wir nehmen an, dass Gebäudeeigentümer*innen vorausschauend sanieren und MEPS zusätzlich sicherstellen, dass das Ambitionsniveau der Sanierungen hoch ist. Außerdem gehen wir davon aus, dass kurzfristige Einsparmaßnahmen flächendeckend zum Einsatz kommen – getrieben durch Verordnungen (EnSimMaV) und das hohe Energiepreisniveau.

Zum anderen spielt Suffizienz in CARESupreme eine große Rolle. Durch die Absenkung der mittleren Raumtemperatur, energiesparendes Verhalten im Angesicht hoher Energiepreise und die Reduktion der Wohnfläche wird der Endenergieverbrauch weiter gesenkt. Wir nehmen an, dass sich außerdem die Neubaurate bis 2045 ungefähr halbiert.

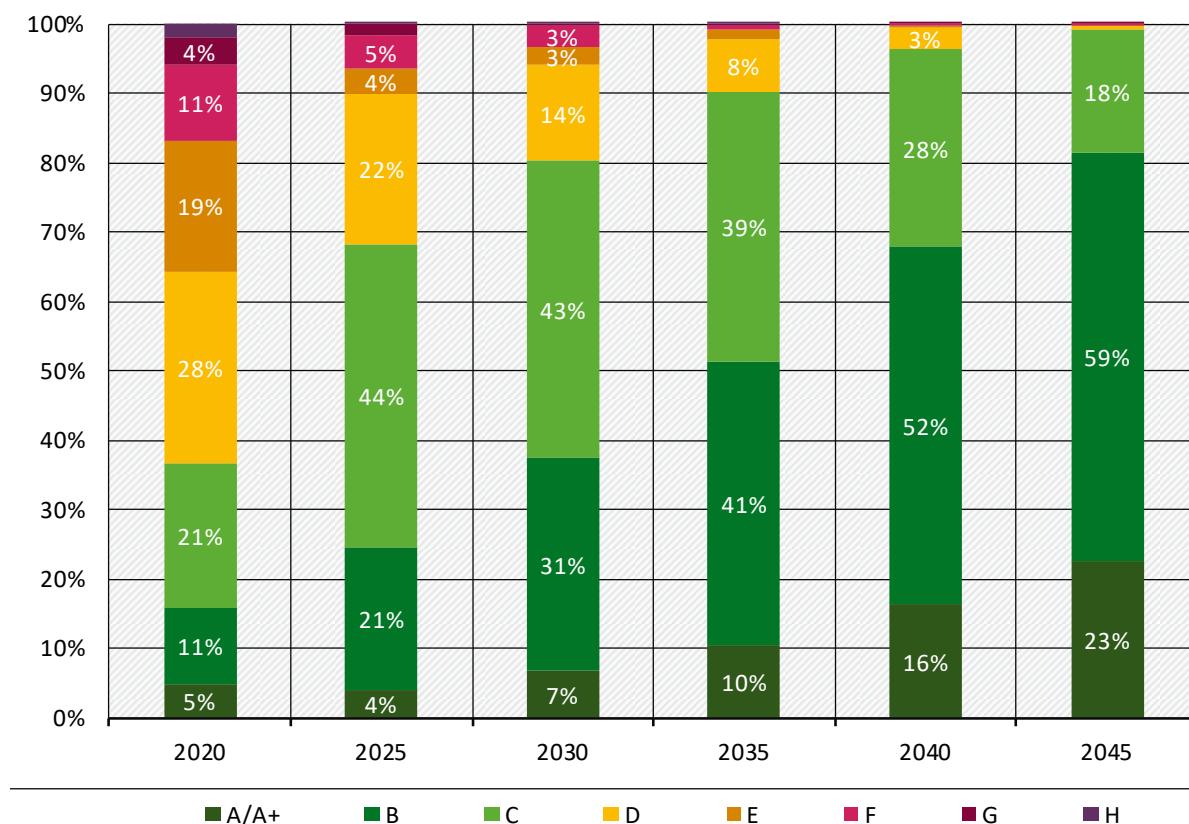
Abbildung 51: Flächengewichtete energetische Sanierungsrate, CARESupreme, 2010-2050



Quelle: Öko-Institut (Modellierung ab 2020), Cischinsky und Diefenbach (2018) (historische Sanierungsrate Wohngebäude), Hörner (2022) (historische Sanierungsrate Nichtwohngebäude)

Abbildung 52 veranschaulicht den starken Rückgang des Energieverbrauchs aus dem Blickwinkel der Verteilung der Effizienzklassen im Energieausweis nach GEG (A/A+=sehr wenig Verbrauch, H=sehr viel Verbrauch wegen unzureichendem Wärmeschutz). In der Modellierung wird für jedes Gebäude jedes Jahr berechnet, welcher Effizienzklasse das Gebäude auf Basis des Endenergieverbrauchs zugeordnet wird (Verbrauchsausweis). Der Verbrauch wird auch durch Verhalten beeinflusst. Energiesparendes Verhalten infolge hoher Energiepreise und seine Verfestigung durch Suffizienz führen zu einem starken Anstieg der grünen Effizienzklassen. Ab 2030 sorgen vor allem MEPS dafür, dass die energetisch ineffizientesten Gebäude bis 2045 nahezu komplett saniert werden.

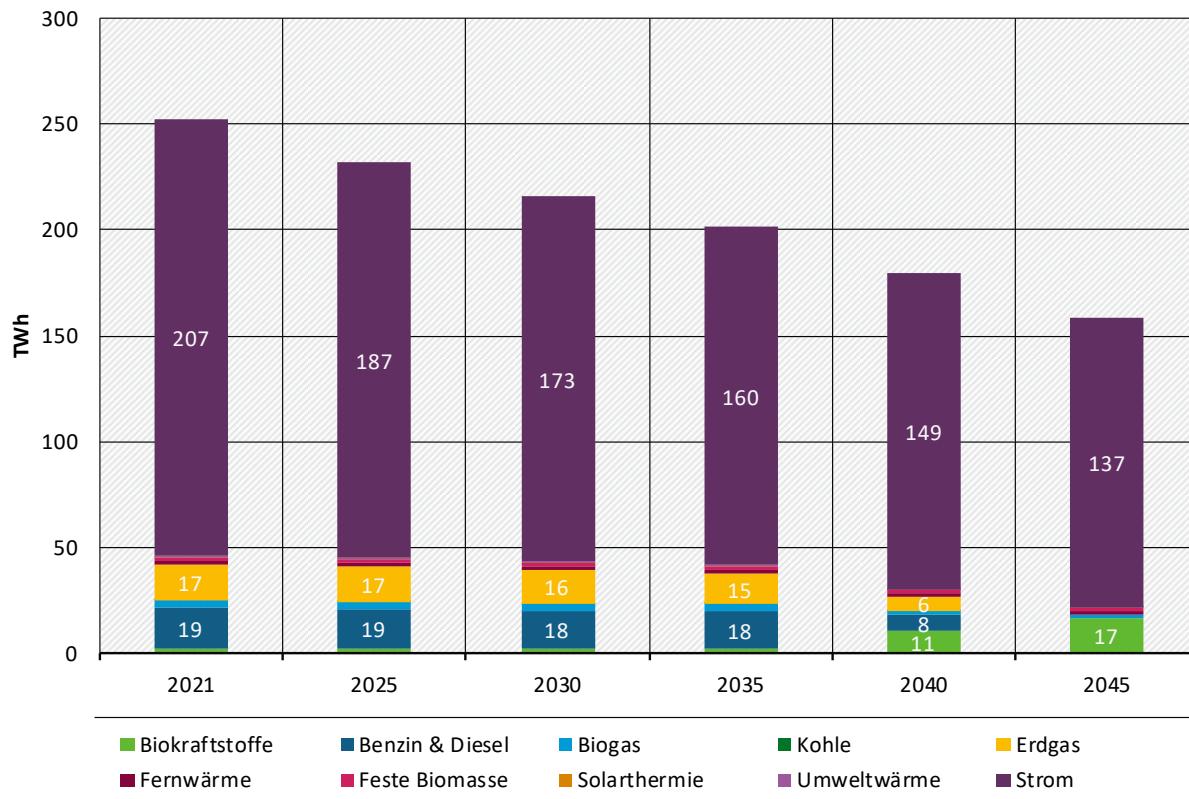
Abbildung 52: Entwicklung der Effizienzklassenverteilung von Wohngebäuden nach Energieausweis Endenergieverbrauch, CARESupreme, 2020-2045



Quelle: Öko-Institut (Modellierung ab 2020), Energieausweisdatenbank aus Bei der Wieden und Braungardt (2023) (Verteilung 2020)

Neben Raumwärme und Warmwasser stellen Geräte und Prozesse eine wichtige Anwendungsgruppe im Gebäudesektor dar. Abbildung 53 zeigt den Endenergieverbrauch für Geräte und Prozesse in den Sektoren Haushalte und GHD im Szenario CARESupreme nach Energieträgern. Getrieben durch die verstärkten Instrumente und Maßnahmen sowie das allgemeine Nachhaltigkeitsbewusstsein in der Bevölkerung sinkt der Endenergieverbrauch zwischen 2022 und 2045 um 37 % bzw. 1,6 Prozentpunkte pro Jahr. Strom ist bereits im Basisjahr 2022 mit einem Anteil von 82 % der dominierende Energieträger, der bis 2045 auf 86 % ansteigt. Ein weiterer Trend ist der starke Anstieg der Biokraftstoffe ab 2035 auf 17 TWh im Jahr 2045. Diese Biokraftstoffe werden vor allem für Prozesswärmeanwendungen und Baufahrzeuge im GHD-Sektor eingesetzt, bei denen eine Elektrifizierung mit höheren Kosten verbunden wäre.

Abbildung 53: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse in den Sektoren Haushalte und GHD im Szenario CARESupreme nach Energieträgern, 2021-2045



Quelle: Eigene Berechnungen, Fraunhofer ISI

5.2 CARETech

5.2.1 Narrativ

Das CARETech-Szenario ist ebenfalls ein Zielszenario. Dies bedeutet, dass die jährlichen Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetz 2021⁵⁵ eingehalten werden und das Szenario hinsichtlich der Dekarbonisierung des Gebäudesektors ebenfalls ambitioniert ist. Während in CARESupreme auf eine maximal mögliche Systemeffizienz inklusive Suffizienz gesetzt wird, spielt die Einsparung von Endenergie in CARETech allerdings keine zentrale Rolle mehr.

Das bedeutet zum einen, dass die der Wärmeschutz nur so insoweit verbessert wird, wie es auch in einer Referenzentwicklung ohne Zusatzanreize der Fall wäre. Zum anderen werden auch systemtechnisch suboptimale Lösungen der Wärmeversorgung eingesetzt wie Wärmepumpen mit schlechterer Effizienz und mehr Stromdirektheizungen. Anders als in CARESupreme sinkt die Nachfrage nach fester Biomasse kaum. Wasserstoff kommt in der dezentralen Wärmeversorgung wegen zu hoher Energiekosten und unsicherer Verfügbarkeit weiterhin nicht zum Einsatz. Die Effizienz in CARETech wird abgeschwächt und jegliche Suffizienz ausgesetzt.

In Bezug auf die Gebäude-Anwendungsgruppe Geräte und Prozesse kommt es im Szenario CARETech im Gegensatz zu CARESupreme zu keinen tiefgreifenden Lebensstiländerungen im Sinne einer nachhaltigen Konsumveränderung hin zu Energiesuffizienz. Die Ausstattungsraten (Geräte pro Haushalt) vieler Gerätetypen, wie z. B. Klimaanlagen oder Fernsehgeräte, steigen weiter an, was zu einem höheren Endenergieverbrauch führt. Auch der Trend zu größeren

⁵⁵ Die Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetz 2024 konnte aufgrund des Projektzeitplans nicht berücksichtigt werden.

Geräten, z. B. bei Kühlschränken, stagniert nicht. Die Mindesteffizienzstandards erreichen effektive Energieeinsparungen, sind aber weniger ausgeprägt als in CARESupreme.

5.2.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

Der in CARETech hinterlegte Politik-Mix aus Gesetzen, Verordnungen, Förderprogrammen etc. ist weniger ambitioniert als in CARESupreme. Im Folgenden werden die Änderungen gegenüber CARESupreme dargestellt.

Raumwärme und Warmwasser

- ▶ Weniger ambitioniert: Gebäudeenergiegesetz (GEG)
 - Beinahe gleiches Ambitionsniveau: 65 %-Erneuerbare-Wärme-Vorgabe inklusive Anschärfung, allerdings ist Biomasse generell als Erfüllung erlaubt wie im verabschiedeten Gesetz, und Vermietende müssen keine Mehrkosten dadurch übernehmen.
 - Nicht eingeführt: Ausweitung der Nachrüstpflichten im Gebäudeenergiegesetz (GEG) zur Dämmung der oberen Geschossdecke
 - Weniger ambitioniert: Mindesteffizienzstandards für Wohngebäude beschränken sich auf die erste Stufe („worst 15 %“ in 2030) und für Nichtwohngebäude auf das Ambitionsniveau der novellierten EU-Gebäuderichtlinie („worst 16/26 %“ in 2030/33).
 - Nicht eingeführt: Verschärfung des Neubaustandards auf Effizienzhaus 40 und verbindlicher Leitstandards Effizienzhaus 70 für Sanierungen
- ▶ Weniger ambitioniert: Biomasseheizungen werden weiterhin gefördert wie in der BEG 2024
- ▶ Nicht eingeführt: Verschärfung der Immissionsschutz-Grenzwerte als Instrumente für einen Phase-Out von Biomasseheizungen
- ▶ Nicht eingeführt: Ausweitung der Bestimmungen in der EnSimMaV zur Heizungsoptimierung und Einführung eines Energieeinsparverpflichtungssystems (Energy Efficiency Obligation System; EEOS)
- ▶ Nicht eingeführt: Instrumentenset zur Eindämmung des Flächenbedarfs

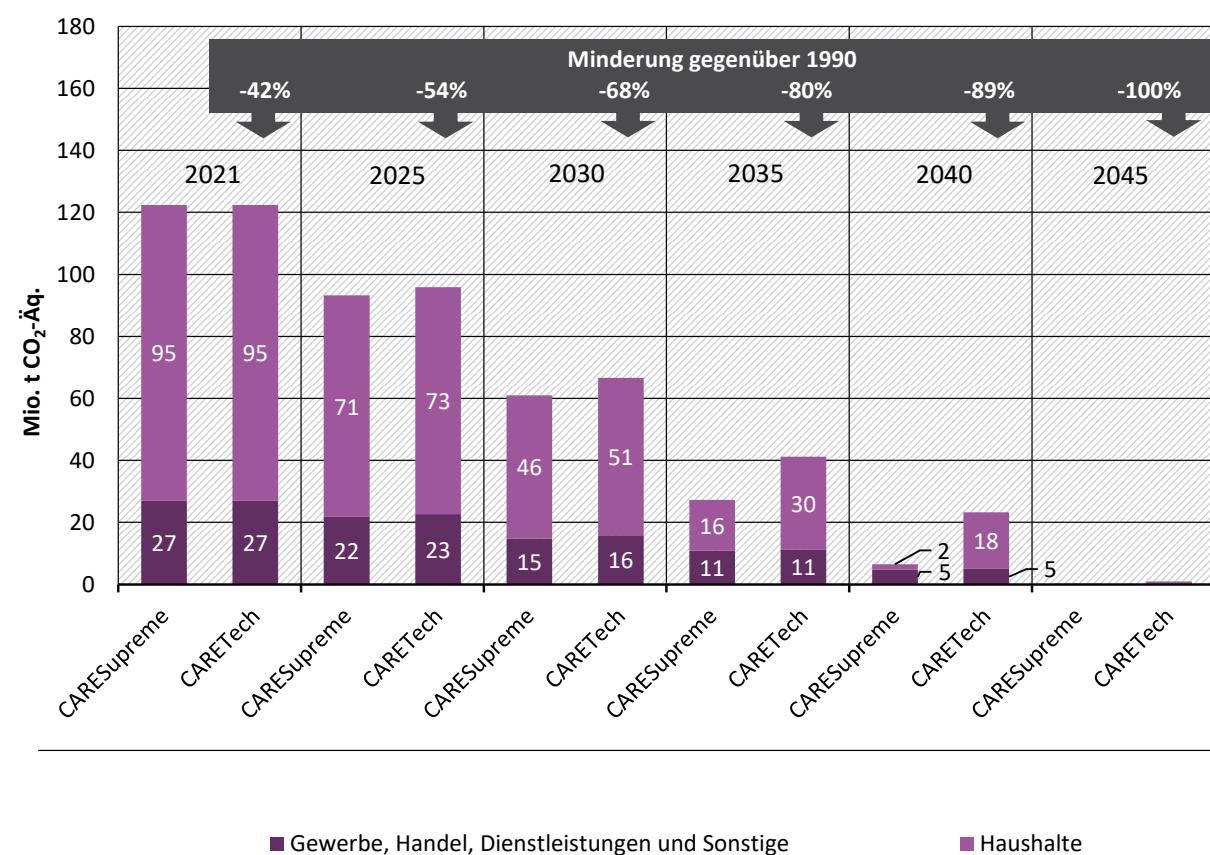
Geräte und Prozesse

- ▶ Weniger ambitioniert: Mindesteffizienzstandards unter der EU Ökodesign-Richtlinie sind weniger streng als in CARESupreme und verringern damit den Markt-Push für energieeffiziente Geräte und Prozesse.
- ▶ Weniger ambitioniert: Die Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte bleibt in Bezug auf die Reparierbarkeit von Geräten nur bedingt effektiv. So kommt es im Vergleich zu CARESupreme nicht zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Lebensdauer von Geräten gegenüber heute.
- ▶ Gestrichen: Informationskampagne für Klima- und Ressourcenschutz. Damit kommt es gegenüber CARESupreme zu keinen Veränderungen hinsichtlich Ausstattungsraten (Geräte pro Haushalt), Betriebsstunden (Stunden pro Gerät und Jahr), und Gerätegrößen (z.B. Volumen von Kühlschränken).

5.2.3 Zentrale Ergebnisse

Die Emissionen im Gebäudesektor reduzieren sich in beiden Szenarien stark, wie in Abbildung 54 und der dazugehörigen Tabelle 25 zu sehen ist. Beide Szenarien erreichen die Sektorziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021. Insbesondere durch die 65 %-Erneuerbare-Wärme-Vorgabe, die ambitionierter als im verabschiedeten GEG modelliert wird, werden konsequent fossile durch erneuerbare Wärmeerzeuger ersetzt. In CARESupreme schreitet die Dekarbonisierung allerdings etwas schneller voran, was vor allem an der gesteigerten Effizienz fossil beheizter Gebäude liegt.⁵⁶

Abbildung 54: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Tabelle 25: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Sonstige	26,9	22,6	15,9	11,3	5,0	0,2
Haushalte	92,6	73,2	50,8	30,0	18,2	0,7

⁵⁶ Wie auch in CARESupreme verbleiben auch im Szenario CARETech marginale Methan- und Lachgasemissionen durch die Verbrennung von Biomasse.

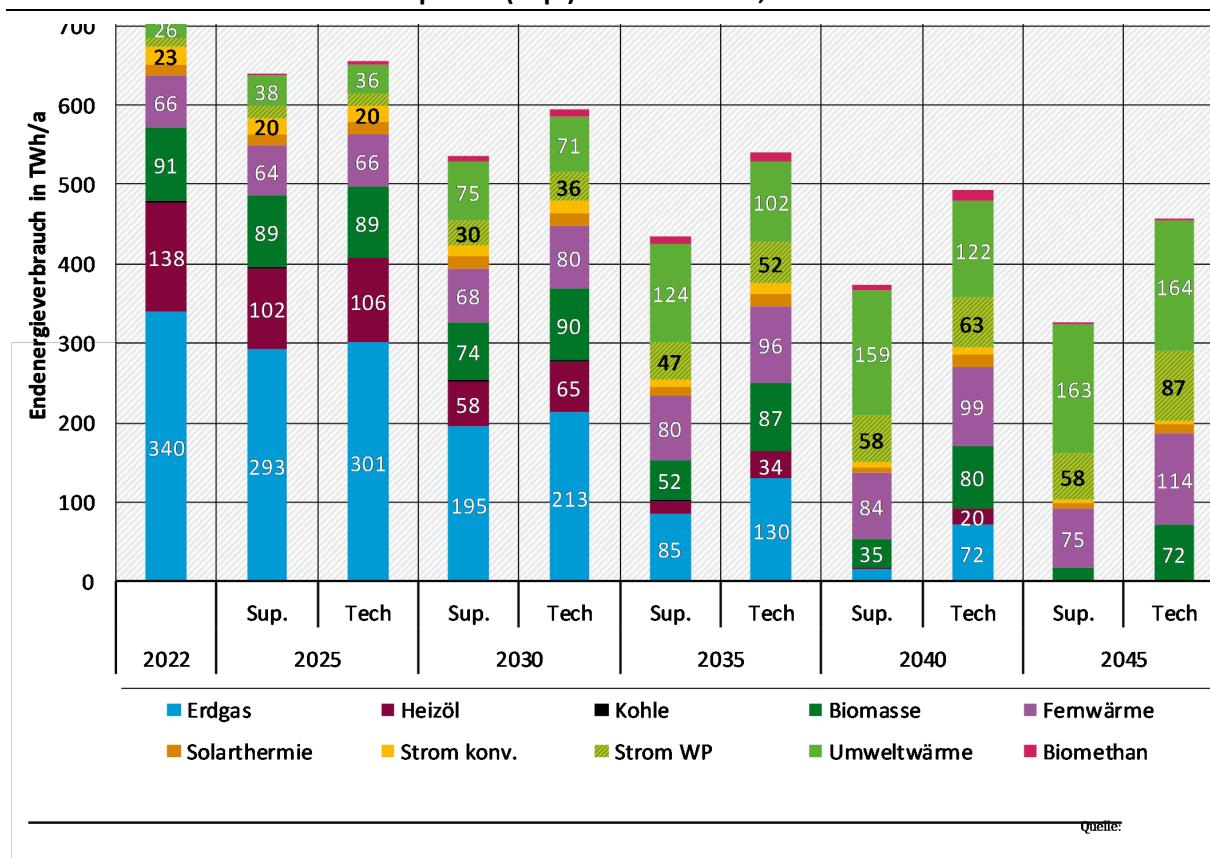
	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Gesamt	119,5	95,9	66,7	41,2	23,2	0,9
Minderung gegenüber 1990	-43,1 %	-54,4 %	-68,3 %	-80,4 %	-88,9 %	-99,6 %

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Die starken Unterschiede zwischen den Szenarien in Bezug auf Energieeinsparungen werden in Abbildung 55 deutlich. Die Abbildung zeigt den Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und den Nichtwohngebäuden des GHD-Sektors. In CARETech wird deutlich weniger Endenergie eingespart als in CARESupreme, da zum einen die Einsparungen aus suffizientem Verhalten fehlen. Zum anderen setzt der hinterlegte Politik-Mix nicht auf Effizienz, sondern zielt lediglich auf Dekarbonisierung der Wärmeversorgung ab.

Auch bezüglich der Energieträgerverteilung unterscheiden sich die Szenarien: In CARETech ist das Verhältnis vom Strom zu Umweltwärme ungünstiger, was bedeutet, dass mehr ineffiziente Wärmepumpen und Stromanwendungen verbaut werden. Zum Vergleich: In CARESupreme wird im Jahr 2045 eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von 3,8 erreicht, in CARETech nur von 2,9. Außerdem wird der Einsatz fester Biomasse ggü. 2022 in absoluten Zahlen kaum reduziert. Der Anteil von Fernwärme im Zielsystem 2045 ist mit 23 % in CARESupreme und 25 % in CARETech ähnlich.

Abbildung 55: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser je Energieträger in den Szenarien CARESupreme (Sup.) und CARETech, 2022-2045

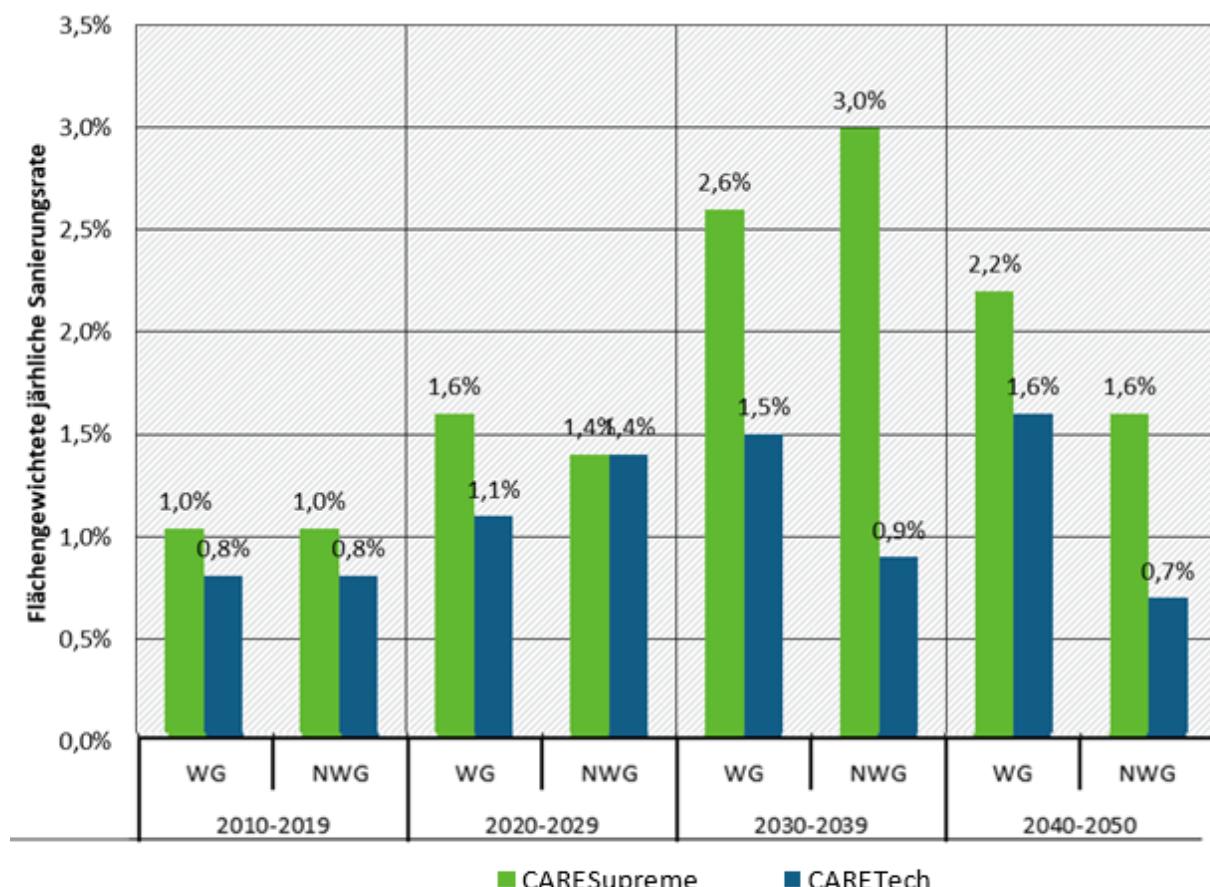


Quelle: Öko-Institut; Strom konv. = konventionell, d.h. in Stromdirektheizungen, Strom WP = Wärmepumpen

Das unterschiedliche Ambitionsniveau hinsichtlich der Effizienz wird auch anhand der flächengewichteten energetischen Sanierungsquoten aus Abbildung 56 deutlich. Die

Sanierungsaktivität ist in CARESupreme durchweg höher aufgrund der ambitioniert implementierten Mindesteffizienzstandards, auf die Gebäudeeigentümer*innen in der Modellierung vorausschauend reagieren. In den Zwanzigerjahren ist die Sanierungsrate bei Nichtwohngebäuden in den Szenarien gleich hoch, da bis 2033 dieselben Mindesteffizienzstandards gelten, die allerdings in CARESupreme weitergeführt werden.

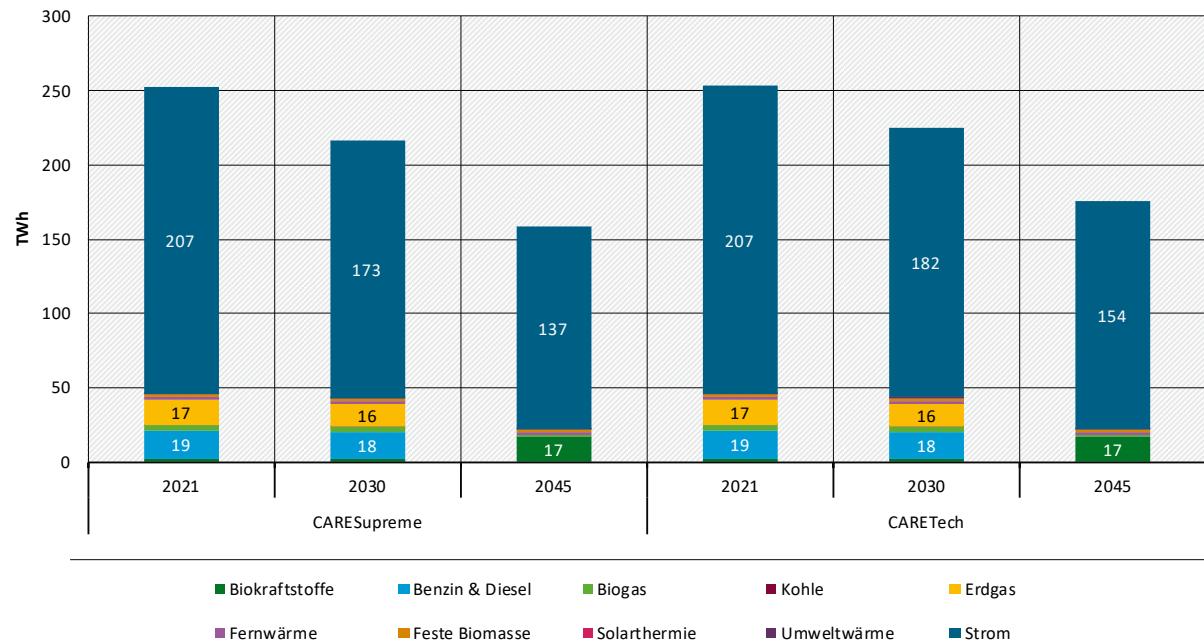
Abbildung 56: Flächengewichtete energetische Sanierungsrate für Wohn- und Nichtwohngebäude in den Szenarien CARESupreme und CARETech, 2010-2050



Quelle: Öko-Institut (Modellierung ab 2020), Cischinsky und Diefenbach (2018) (historische Sanierungsrate Wohngebäude), Hörner (2022) (historische Sanierungsrate Nichtwohngebäude); Anmerkung: WG=Wohngebäude, NWG=Nichtwohngebäude

Abbildung 57 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse in den Sektoren Haushalte und GHD in den Szenarien CARESupreme und CARETech nach Energieträgern. Beide Szenarien erreichen bis 2045 deutliche Endenergieeinsparungen von 37 % (CARESupreme) bzw. 30 % (CARETech) gegenüber 2022. 2045 liegt der Endenergiebedarf in CARETech um 17 TWh bzw. 11 % höher als in CARESupreme. Die stagnierenden Ausstattungsraten von Elektrogeräten wirken sich vor allem im Haushaltssektor aus. Anwendungen in den Bereichen Prozesswärme und mechanische Energie im GHD-Sektor sind von diesen Lebensstiländerungen nur wenig betroffen, was zu geringen Unterschieden bei den Brennstoffen zwischen den beiden Szenarien führt.

Abbildung 57: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse in den Sektoren Haushalte und GHD in den Szenarien CARESupreme und CARETech nach Energieträgern, 2021-2045



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

6 Verkehr

6.1 CARESupreme

6.1.1 Narrativ

Der Verkehrssektor steht vor der Herausforderung, die zukünftige Verkehrs- und Mobilitätswelt so zu gestalten, dass bezahlbare Mobilität für alle gewährleistet werden kann, während das Ziel der Treibhausgasneutralität 2045 gewährleistet wird. Die Sektorbetrachtung in diesem Projekt umfasst die nationalen Verkehre entsprechend dem Bundes-Klimaschutzgesetz sowie die internationalen Verkehre der Seeschifffahrt und des internationalen Luftverkehrs. Wie im Gebäudesektor lagen die Treibhausgasemissionen im nationalen Verkehr im Jahr 2022 mit rund 148 Mio. t CO₂-Äq. über dem Jahresziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2022 (139 Mio. t CO₂-Äq.). Im Jahr 2023 betragen die Treibhausgasemissionen 146 Mio. t CO₂-Äq. und verfehlten das Ziel damit erneut.

An der Zielverfehlung des maximalen Emissionswerts des Bundes-Klimaschutzgesetzes für die Jahre 2021 bis 2023 zeigt sich die Herausforderung im Verkehrssektor, Mobilität zukünftig strukturell anders als heute verfügbar zu machen und dadurch die Treibhausgasemissionen und die Ressourceninanspruchnahme generell zu reduzieren. Das Szenario CARESupreme setzt genau an dieser Stelle an. Das Szenario geht davon aus, dass durch entsprechende Anreize eine Veränderung im Verhalten der Bevölkerung möglich ist und sich das Mobilitätsverhalten in Richtung Vermeidung klimaschädlicher Verkehre hin zu treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Alternativen entwickeln.

Nur mit einem Zusammenspiel aus sehr ambitionierten ökonomischen und weiteren steuernden Maßnahmen kann der Verkehrssektor einen angemessenen hohen eigenen Beitrag leisten. Dazu gehören Anreize zur Effizienzsteigerung von Pkw und Lkw, die Abschaffung klimaschädlicher Subventionen, die verursachergerechten Bepreisung von Klimaschäden im Verkehr, der Stärkung des ÖPNV sowie der Bereitstellung neuer Kraftstoffe. Ziel des Szenarios ist es nicht, rein über technische Lösungen die Treibhausgasemissionen des Verkehrs zu reduzieren, sondern über eine veränderte Verkehrsmittelwahl und die Vermeidung von Verkehren auch weitere Umweltbelastungen zu reduzieren. Daher kommt alternativen Mobilitätsangeboten wie beispielsweise dem Ridesharing eine größere Rolle zu als heute. Auch soll der Schienenverkehr größere Anteile am Modal Split übernehmen und gerade im nationalen Verkehr Reisen vom Flugzeug auf die energieeffizienteren und wenig emittierenden Schienenverkehre verlagern. Die steigende Digitalisierung bietet aber auch Chancen, Verkehre zu vermeiden, ohne das Maß der Mobilität zu verringern.

Auch liegt dem Szenario CARESupreme zugrunde, dass ab dem Jahr 2035 kein Wirtschaftswachstum mehr stattfindet mit der entsprechenden Wirkung auf die Güterverkehrsnachfrage. Klimaschutzmaßnahmen in anderen Sektoren und ihre Auswirkung auf die Güterverkehrsleistung werden dabei ebenso berücksichtigt wie Ansätze einer stärkeren Regionalisierung der Wirtschaftskreisläufe im Binnentransport. Beim internationalen Verkehr wird angenommen, dass dieser bis 2045 treibhausgasneutral gestaltet ist.

6.1.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

- ▶ EU CO₂-Flottenzielwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge / schwere Nutzfahrzeuge: Das Ambitionsniveau zur CO₂-Minderung bei Neufahrzeugen steigt im Jahr 2030 auf -50 % (leichte Nutzfahrzeuge) bzw. -55 % (Pkw) ggü. dem Jahr 2021; im Jahr 2035 liegt die Minderungsanforderung für alle Pkw und leichten Nutzfahrzeuge bei -100 % und es können

nur noch Nullemissionsfahrzeuge zugelassen werden. Bezuglich der schweren Nutzfahrzeuge müssten bereits von der EU-Regulierung erfasste Lkw ab dem Jahr 2030 einen höheren Zielwert als bisher einhalten (-45 % ggü. Referenz im Jahr 2019/2020). Die übrigen Lkw und Reisebusse werden zukünftig von den CO₂-Emissionsstandards erfasst. Deren Emissionen müssen ab dem Jahr 2030 um -45 % gegenüber ihrer Referenz aus dem Jahr 2025 zu sinken. Die Zielwerte für die Jahre 2035 und 2040 liegen bei -65 % bzw. -90 % gegenüber der jeweiligen Referenz. Zusätzlich sollen alle neuen Stadtbusse ab dem Jahr 2030 emissionsfrei sein.

- ▶ Anpassung der Kfz-Steuer (Einführung einer Klimaabgabe): Die Kfz-Steuer im 1. Jahr für neu zugelassene Pkw wird ab 2025 in Abhängigkeit der CO₂-Emissionen eines Pkw stufenweise erhöht. Die Bemessungsgrenze, über der die zusätzliche Komponente der Kfz-Steuer zu entrichten ist, sinkt kontinuierlich ab. Im Jahr 2030 sind von der Klimaabgabe alle Fahrzeuge außer Nullemissionsfahrzeuge erfasst.
- ▶ Umweltbonus / Kaufprämie für Pkw: vollständig emissionsfreie Pkw erhalten im Jahr 2023 eine staatliche Kaufunterstützung von 3.000 € (40.000 – 65.000 € Nettolistenpreis) bzw. 4.500 € (bis 40.000 € Nettolistenpreis). Ab dem 1. September 2023 erhalten nur noch Privatpersonen den Umweltbonus. Für das Jahr 2024 erhalten Pkw mit einem Nettolistenpreis unter 45.000 € eine Kaufunterstützung von 3.000 €.
- ▶ Kaufförderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben: seit 2021 findet für Nullemissions-Lkw eine Kaufförderung statt, die 80 % der technologiebezogenen Mehrkosten dieser Lkw gegenüber einem vergleichbaren Diesel-Lkw erstattet. Insgesamt stehen bis zum Jahr 2028 3 Mrd. € an Fördergeldern zur Verfügung.
- ▶ Umgestaltung der Besteuerung von Dienstwagen: für die Bestimmung des steuerrelevanten geldwerten Vorteils wird grundsätzlich 1 % des Bruttolistenpreis angesetzt. Hinzu kommt ab dem Jahr 2025 eine fahrleistungsabhängige Komponente (0,1 %-Punkt je 1.000 km private Fahrleistung / pauschaler Ansatz: Private Fahrleistung entspricht 75 % der Jahresfahrleistung). Ab dem Jahr 2025 existiert keine Bevorzugung von Plug-In-Hybride (PHEV) mehr. Für rein elektrische Fahrzeuge (BEV und FCEV) ist der Basissatz für die Berechnung des geldwerten Vorteils 0,25 % (bis 2025), 0,5 % (bis 2027), 1 % (ab 2028) des Bruttolistenpreises.
- ▶ 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 erreicht sie die volle Wirkung ab dem Jahr 2035 (6,5 ct/km für emittierende Pkw; 6,4 ct/km für emissionsfreie Pkw). Externe Kosten werden im Jahr 2035 vollständig internalisiert.
- ▶ Ausweitung und CO₂-Spreizung der Lkw-Maut sowie Ausbau der Lkw-Energieinfrastruktur: Die Lkw-Maut wird im Jahr 2025 auf alle Lkw und alle Straßen ausgeweitet. Zudem wird ab dem Jahr 2024 eine zusätzliche CO₂-Komponente in der Lkw-Maut eingeführt. Diese beträgt 200 €/t CO₂ und bleibt konstant, solange sie höher liegt als der CO₂-Preis im BEHG. Mautpflichtige Fahrzeuge bekommen den CO₂-Preis des BEHG erstattet. Zudem werden emissionsfreie Lkw ab dem Jahr 2026 zu 75 % von der Infrastrukturkomponente der Lkw-Maut befreit. Ab dem Jahr 2030 liegt mit 50 % eine geringere Befreiung zugrunde. Außerdem wird die Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw (O-Lkw), BEV und FCEV ausgebaut.
- ▶ Anpassung der Energiesteuer (Abschaffung des Dieselsteuerprivilegs / Inflationsausgleich / EU-Mindestenergiesteuersatz für Kerosin): Die Energiesteuer für Diesel, Erdgas und LPG wird im Zeitraum 2025-2028 an das Niveau der Energiesteuer von Benzin (bemessen am

Energiegehalt) angeglichen. Ferner wird für alle Kraftstoffe ein Inflationsausgleich ab 2029 eingeführt, sodass die Energiesteuern ab 2029 real gleichbleiben. Für inländische Flüge wird ab 2025 der Mindestenergiesteuersatz von 33 ct/l erhoben. Ab 2025 wird der Mindeststeuersatz auch für EU-Flüge über einen Zeitraum von 9 Jahren eingehast, sodass im Jahr 2033 der volle Mindeststeuersatz auf EU-Flüge anfällt.

- ▶ Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) bzw. ETS 2 / ETS 1 im Flugverkehr: BEHG bzw. ETS 2 siehe sektorübergreifende Instrumente. Auf Flüge wird der steigende CO₂-Preis durch den ETS1 fällig und kostenlose Zuteilungen an die Luftverkehrsindustrie entfallen entsprechend der Fortschreibung des ETS1 ab dem Jahr 2026. Ab 2030 werden außerdem nicht-CO₂-Effekte auf nationaler sowie EU-Ebene eingepreist.
- ▶ Abschaffung der Entfernungspauschale: Die Entfernungspauschale wird im Jahr 2027 abgeschafft.
- ▶ Erhöhung der Luftverkehrsteuer: Der nationale Steuersatz wird kontinuierlich überproportional angepasst. Im Jahr 2030 wird er gegenüber 2023 verdoppelt (auf 25,5 €) und im Jahr 2040 gegenüber 2023 verdreifacht (auf 38,2 €). Zwischen 2040 und 2050 wird ein schwächeres Wachstum des Steuersatzes von 1,6 % pro Jahr angenommen, im Jahr 2050 beträgt der nationale Steuersatz dann 44,6 €.
- ▶ Angebotsausweitung ÖPNV: Die Verlagerungswirkung auf den ÖPNV wird nur möglich bei zusätzlichen Ausgaben für die Angebotserweiterung im ÖPNV. Aufgrund der stark auf die Verlagerung wirkenden Preisinstrumente (z.B. BEHG, fahrleistungsabhängige Pkw-Maut) wird in dem Szenario von keiner zusätzlichen Verlagerung durch die Angebotserweiterung des ÖPNV ausgegangen. Sie ist aber die Voraussetzung dafür, dass die preislichen Instrumente eine Wirkung entfalten können.
- ▶ Fortführung des Deutschlandtickets: Ab 2023 wird das Deutschlandticket mit 49 € pro Monat eingeführt. Mit diesem Ticket ist eine Nutzung aller regionalen und überregionalen Nahverkehrszüge sowie Angebote des ÖPNV inbegriffen.
- ▶ Erhöhte Förderung des Radverkehrs: Gemäß der Ziele des Nationalen Radverkehrsplans 3.0 sollen ab 2030 30 € je Einwohner in den Radverkehr investiert werden (d.h. rund 2,4 Mrd. € pro Jahr). In CARESupreme wird die Investitionssumme von 30 € je Einwohner auf 2025 vorgezogen.
- ▶ Stärkere Implementierung der Parkraumbewirtschaftung: In Städten werden flächendeckend Bewohnerparkausweise eingeführt und Parkgebühren für temporäres Parken eingeführt. Die Preise der Bewohnerparkausweise erreicht im Jahr 2025 360 €/Jahr und im Jahr 2035 850 €/Jahr. Zusätzlich wird angenommen, dass abseits von Wohngebieten Parkgebühren je Stunde erhoben werden. Diese betragen im Jahr 2025 2 €/h, bis zum Jahr 2030 wächst der Betrag zu 4 €/h an.
- ▶ Einführung eines allgemeinen Tempolimits auf Autobahnen / Geschwindigkeitsreduzierungen bei Tempolimit: für das allgemeine Tempolimit wird angenommen, dass ab 2024 ein flächendeckendes Tempolimit auf allen Straßen mit 120 km/h auf Autobahnen, 80 km/h außerorts und 30 km/h innerorts eingeführt wird.
- ▶ THG-Quote / Energetische Quoten für erneuerbare Kraftstoffe: Bis 2030 entspricht die THG-Quote der heutigen Ausgestaltung (kontinuierlicher Anstieg bis auf 25 %.). Bis 2040 wird die THG-Quote so weiterentwickelt, dass die absolute Menge an erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor aus dem Jahr 2030 verbleibt. In der Phase von 2030 bis 2040 werden die

Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse und aus Altspeiseölen ausgephast und durch fortschrittliche Biokraftstoffe ersetzt. Dies entspricht einem Anstieg der erneuerbaren Kraftstoffanteile im Jahr 2035 von rund 30 % und von rund 60 % im Jahr 2040. Bis zum Jahr 2045 steigt der erneuerbare Anteil in den Kraftstoffen im Verkehrssektor auf 100 %.

Eine detaillierte Beschreibung sowie deren Parametrisierung aller berücksichtigten Instrumente kann Anhang A entnommen werden.

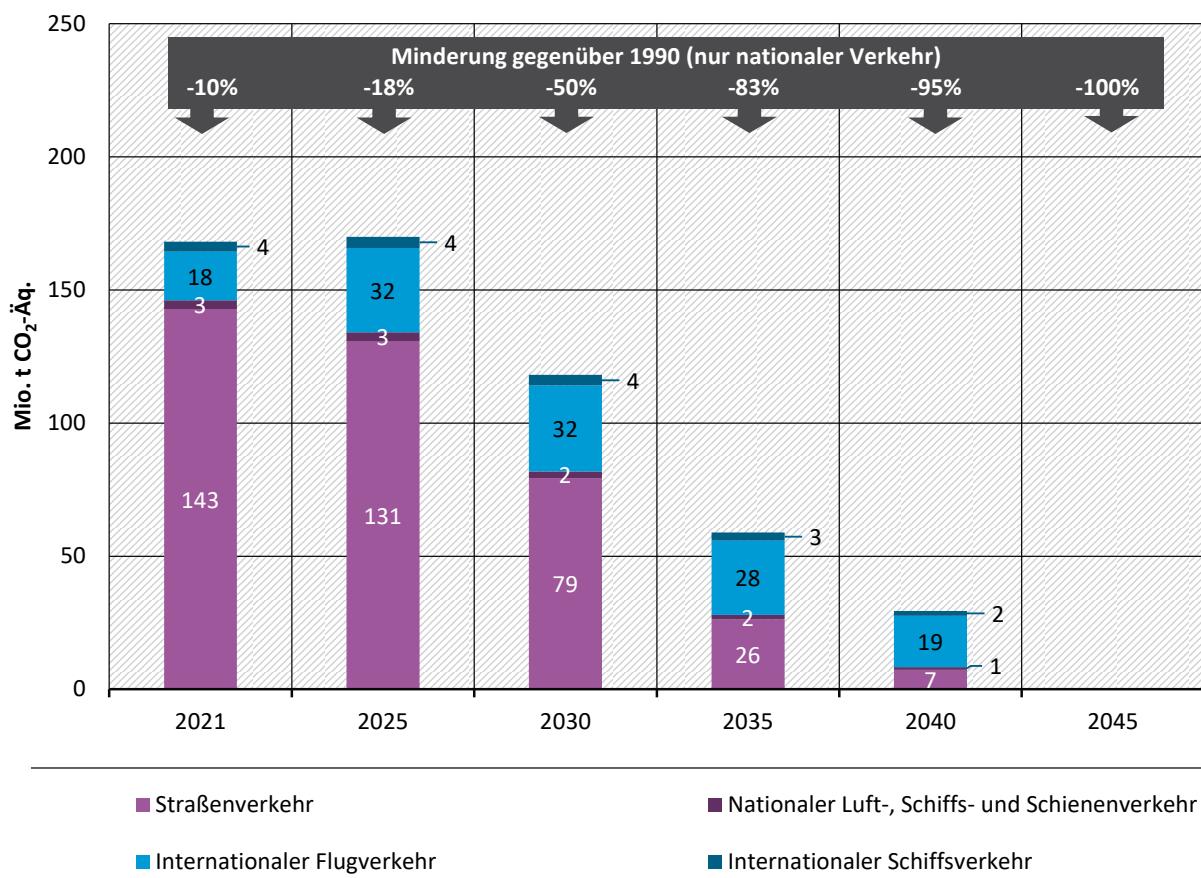
6.1.3 Zentrale Ergebnisse

Die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor sinken in CARESupreme bis 2030 auf 81,8 Mio. t CO₂-Äq., das KSG-Ziel für 2030 wird damit übertroffen. Wie in Abbildung 58 und Tabelle 26 dargestellt sinken die Treibhausgasemissionen bis 2035 auf 28 Mio. t CO₂-Äq., bis 2040 auf 8,4 Mio. t CO₂-Äq. Und bis 2045 auf 0,1 Mio. t CO₂-Äq.. Wesentliche Treiber für die schnelle Emissionsminderung vor 2030 im Bereich des Personenverkehrs ist der Malus auf die Neuzulassungen von CO₂ emittierenden Pkw und die Anpassung der Energiesteuer sowie der steigende CO₂-Preis. Zusätzliche Suffizienzwirkung im MIV entfalten die Maßnahmen zum Tempolimit ab 2024 sowie die fahrleistungsabhängige Pkw-Maut, welche ab 2029 eingephast wird und mit der Internalisierung externer Kosten im Jahr 2035 ihre volle Wirkung entfaltet. Im Straßengüterverkehr führt insbesondere die CO₂-abhängige Lkw-Maut und die ambitionierten EU CO₂-Flottenzielwerte sowie die steigenden fossilen Energiekosten (CO₂-Preis, Energiesteueranpassung) zu einer schnellen Elektrifizierung. Die in CARESupreme angenommene Stagnation des Wirtschaftswachstums ab 2035 und die zunehmende Regionalisierung der Güterverkehrsstrukturen wirken sich zudem mindernd auf die Güterverkehrsleistung aus.

Im Jahr 2045 ist der nationale Verkehr quasi treibhausgasneutral. Wie in der Darstellung des Endenergieverbrauchs in Abbildung 64 zu sehen sind fast alle Verkehrsträger auf der Straße und der Schiene vollständig elektrifiziert. Für verbleibende Verbrenner im Bestand sowie im Luftverkehr und der Schifffahrt kommen E-fuels oder fortschrittliche Biokraftstoffe zum Einsatz.

Im internationalen Verkehr wird in CARESupreme angenommen, dass der Umstieg auf erneuerbare Kraftstoffe bis 2045 quasi abgeschlossen ist. Die Erhöhung der Luftverkehrssteuer, die Berücksichtigung des ETS1 auf europäischer Ebene ab 2025 inklusive Nicht-CO₂-Effekte ab 2030 und die ab 2033 voll wirksame EU-weite Energiesteuer auf Kerosin wirken sich mindernd auf den internationalen Flugverkehr aus. Im gesamten internationalen Verkehr beträgt die Emissionsminderung im Jahr 2030 rund 50 % und im Jahr 2040 rund 95 % gegenüber 1990.

Abbildung 58: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr, CARESupreme 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

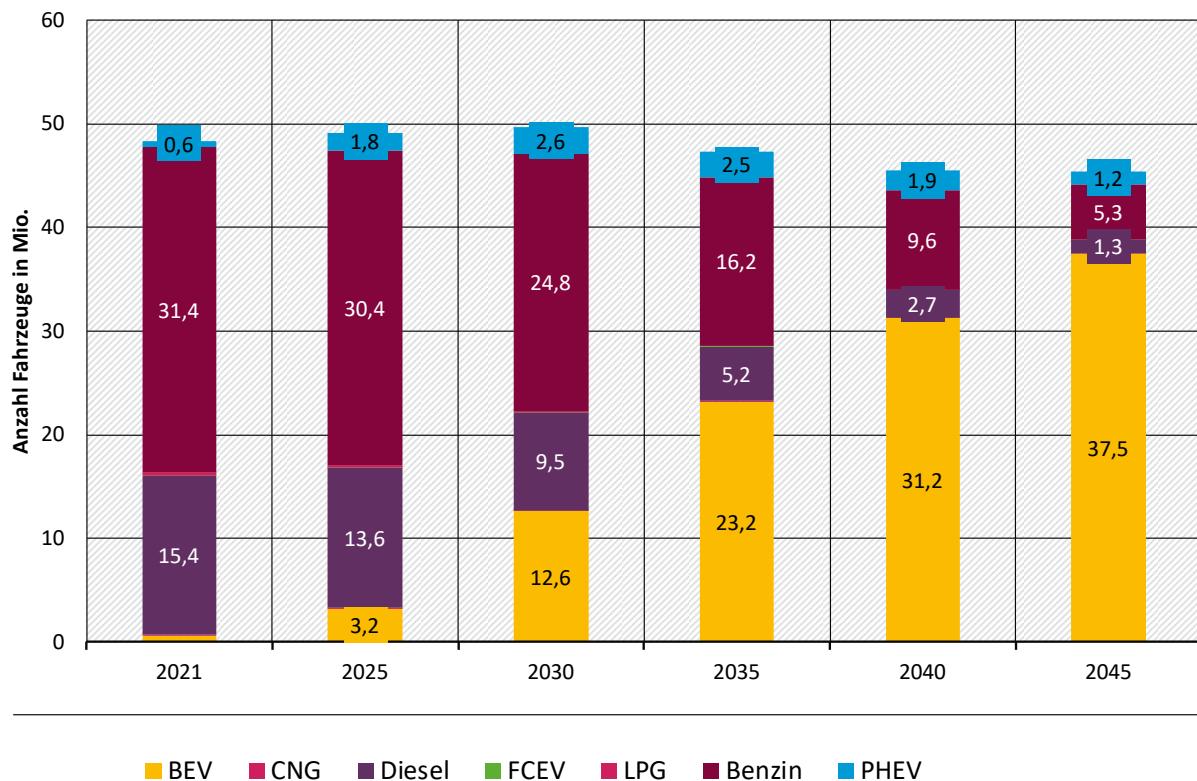
Tabelle 26: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Ziviler Luftverkehr	0,7	0,8	0,5	0,2	0,1	0,0
Straßenverkehr	142,9	130,8	79,4	26,3	7,4	0,1
Schienenverkehr	0,9	0,9	0,6	0,6	0,4	0,0
Schiffsverkehr	1,6	1,5	1,4	1,0	0,6	0,0
Gesamt	146,1	134,0	81,8	28,0	8,4	0,1
Minderung gegenüber 1990	-10,1 %	-17,8 %	-49,9 %	-82,8 %	-94,9 %	-99,9 %
Nachrichtlich:						
Internationaler Flugverkehr	18,3	31,7	32,3	27,8	19,3	0,3
Internationaler Schiffsverkehr	3,8	4,2	4,0	3,1	1,8	0,0
Gesamt inklusive nachrichtlich	168,1	169,9	118,1	58,9	29,4	0,4

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

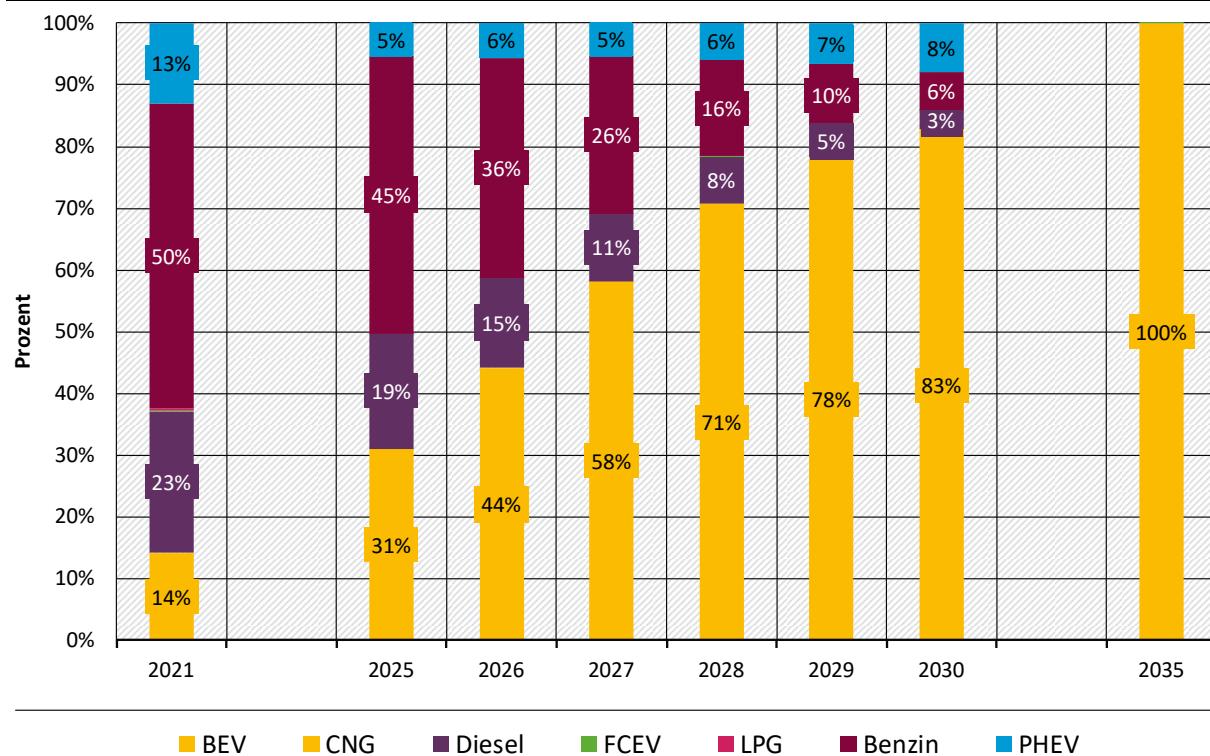
In Abbildung 59 ist die Entwicklung des Bestands für Pkw in CARESupreme abgebildet. Im Jahr 2030 befinden sich 12,6 Mio. rein batterieelektrische Fahrzeuge im Bestand. Im Jahr 2031 wird das von der Bundesregierung gesetzte Ziel von 15 Mio. rein batterieelektrischen Pkw fast erreicht. Treiber für die Transformation auf batterieelektrische Fahrzeuge ist insbesondere die ambitioniert ausgestaltete Klimaabgabe (Malus). Ein Blick auf die Pkw-Neuzulassungen (siehe Abbildung 60) zeigt, dass der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge bereits im Jahr 2030 83 % beträgt. Ab dem Jahr 2035 werden in Übereinstimmung mit den CO₂-Emissionsstandards für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ausschließlich emissionsfreie Fahrzeuge zugelassen. Die in CARESupreme steigenden Nutzungskosten bei Pkw führen insgesamt zu einem Rückgang des Pkw-Besitzes um 8 % im Jahr 2045 gegenüber 2030.

Abbildung 59: Pkw-Bestand nach Antriebstypen, CARESupreme, 2021-2045



Quelle: Modellierung Öko-Institut

Abbildung 60: Antriebsverteilung der Neuzulassungen bei Pkw, CARESupreme, 2021-2045



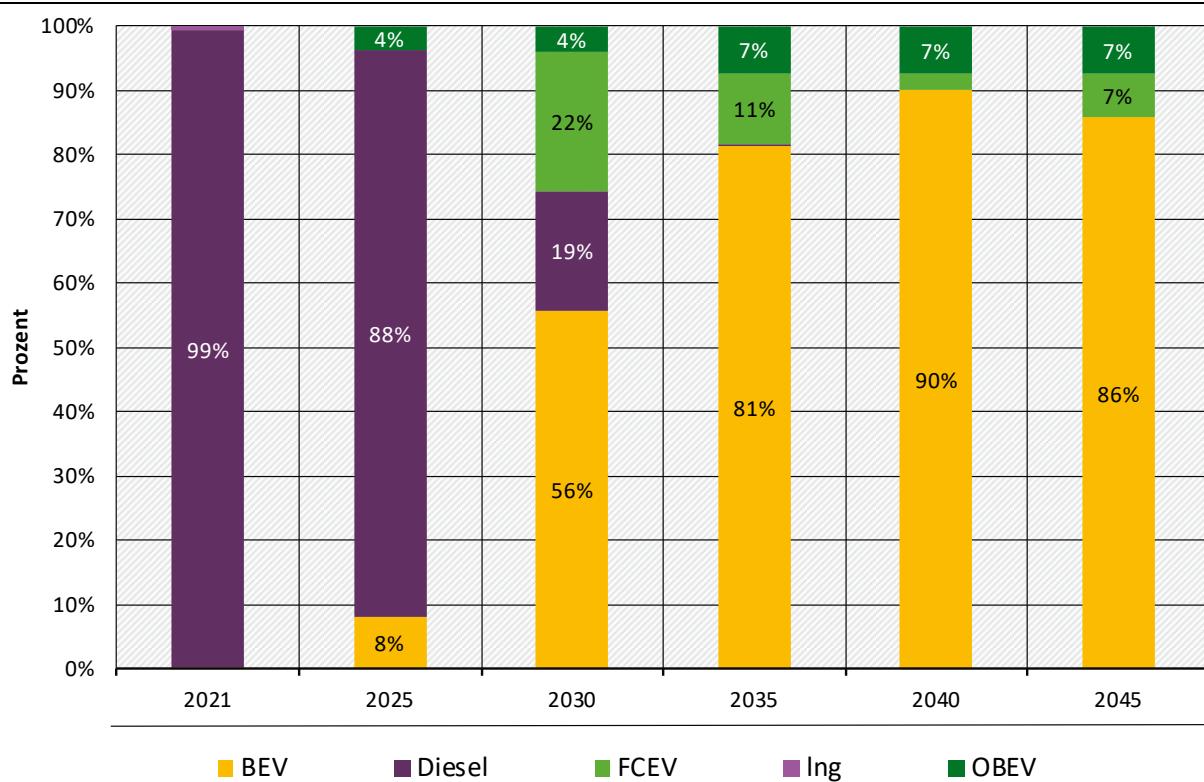
Quelle: Modellierung Öko-Institut

Auch bei den schweren Nutzfahrzeugen zeigt sich eine rapide Zunahme der Elektrifizierung bis 2030 (Abbildung 61). Die Neuzulassungsanteile batterieelektrischer Lkw > 12 Tonnen zGG liegen im Jahr 2030 bei 56 %. Treiber sind hier in erster Linie die Einführung der CO₂-Komponente der Lkw-Maut in Höhe von 200 €/t im Jahr 2024, die EU CO₂-Flottenzielwerte und die Kaufprämie mit 80 %iger Förderung der Investitionsmehrkosten.

Batterieelektrische Lkw benötigen eine gut ausgebauten Ladeinfrastruktur. Der Ausbaupfad in CARESupreme sieht vor, dass im Jahr 2040 eine flächendeckende Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge besteht. Einschränkungen bei der Ladeinfrastruktur führen dazu, dass Brennstoffzellenfahrzeuge ab dem Jahr 2027 trotz Kostennachteil gegenüber den rein batterieelektrischen Lkw stärker in den Markt kommen. Ihr Neuzulassungsanteil beträgt im Jahr 2030 22 % und im Jahr 2035 11 %. Mit dem vollständigen Ausbau der Ladeinfrastruktur im Jahr 2040 verlieren sie Marktanteile. Nach 2040 fällt der H₂-Preis des in wesentlichen Anteilen importierten Wasserstoffs schneller ab als der Strompreis, wodurch wieder leicht mehr Brennstoffzellenfahrzeuge in den Markt kommen.

Durch die zusätzliche Errichtung eines Oberleitungsnetzes von 4.000 km bis 2040 kommen auch Oberleitungs-Lkw in den Markt. Die Zahl der Touren, welche in Nah- und Fernverkehr mit Oberleitungs-Lkw gefahren werden können, ist durch Reichweitenrestriktionen der Lkw und dem Standort des Netzes beschränkt. Zudem entstehen bei Oberleitungs-Lkw zusätzliche Kosten, sodass batterieelektrische Lkw teilweise gegenüber den Oberleitungs-Lkw einen ökonomischen Vorteil haben. Insgesamt stellt sich so ein langfristig relativ konstanter Neuzulassungsanteil von 7 % ein.

Abbildung 61: Antriebsverteilung der Neuzulassungen bei Lkw > 12 Tonnen zGG, CARESupreme, 2021-2045

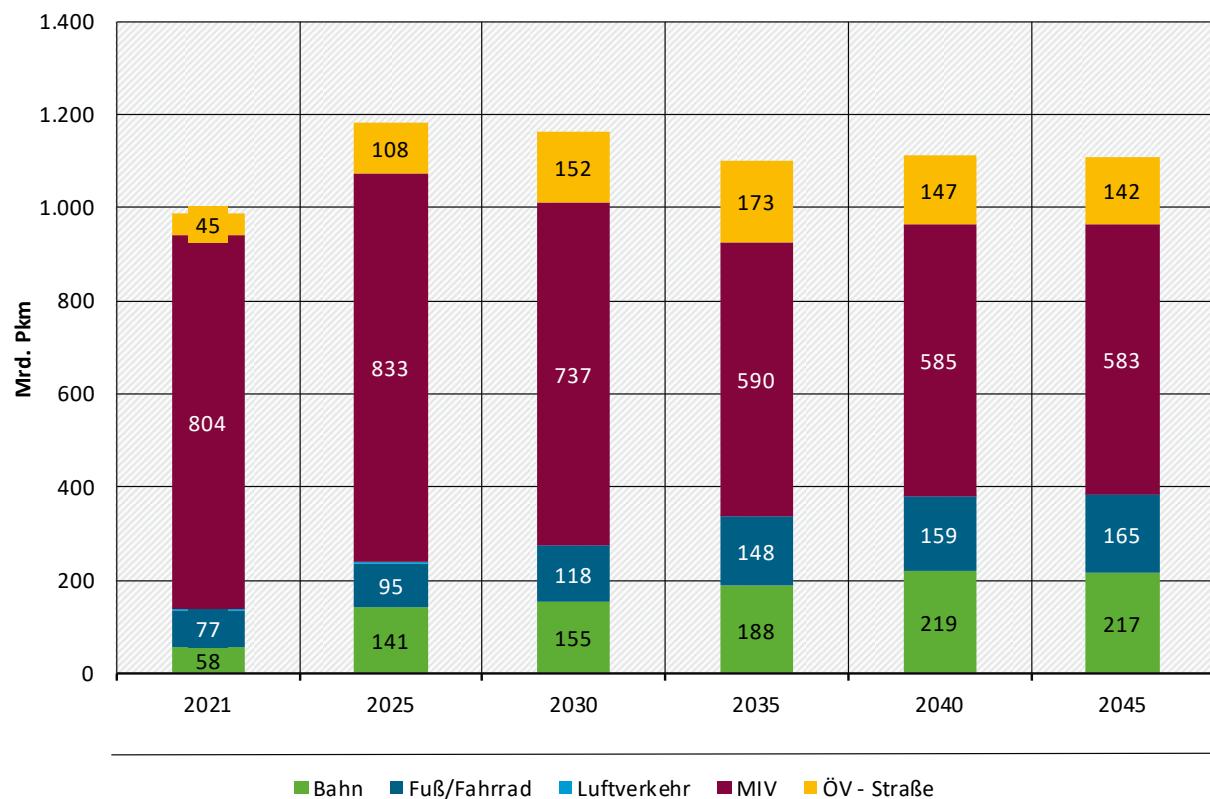


Quelle: Modellierung Öko-Institut

Bei der Personenverkehrsleistung (Abbildung 62) zeigt sich ein starker Rückgang im MIV auf 590 Mrd. Pkm im Jahr 2035. Treiber hierfür ist in erster Linie die fahrleistungsabhängige Pkw-Maut, die im Jahr 2035 mit der Internalisierung externer Kosten ihre volle Wirkung erreicht, die Energiesteueranpassung sowie der ambitionierte CO₂-Preis des BEHG/ETS 2, die auf fossile Kraftstoffe wirken. Gleichzeitig zeigt sich eine starke Verlagerung auf andere Verkehrsmittel, insbesondere die Schiene. Da die Angebotsausweitung der Bahn nur langsam erfolgt und großer Investitionen bedarf, werden in der Modellierung für die Schiene jahresabhängige Kapazitätsgrenzen hinterlegt. Bei ausgeschöpfter Kapazität im Schienenverkehr wird die über den Preis angereizte Verlagerung stärker auf den straßengebundenen ÖV verlagert, da hier von einer schnelleren Fähigkeit der Kapazitätssteigerung ausgegangen wird.

Der nationale Flugverkehr nimmt durch die Einführung der Kerosinsteuern, die Anpassung der Luftverkehrssteuer sowie die Wirkung des ETS1 bis 2040 um die Hälfte ab. Beim internationalen Flugverkehr bewirkt die Einführung der Kerosinsteuern, die Fortschreibung des ETS1 sowie die Luftverkehrssteuer eine Dämpfung der ansonsten noch schneller steigenden Verkehrsleistung. Anstatt rund 447 Mrd. Pkm im Projektionsbericht 2024 (Harthan et al. 2024) werden so im Jahr 2045 nur 320 Mrd. Pkm im internationalen Flugverkehr erreicht.

Abbildung 62: Personenverkehrsleistung, CARESupreme, 2021-2045



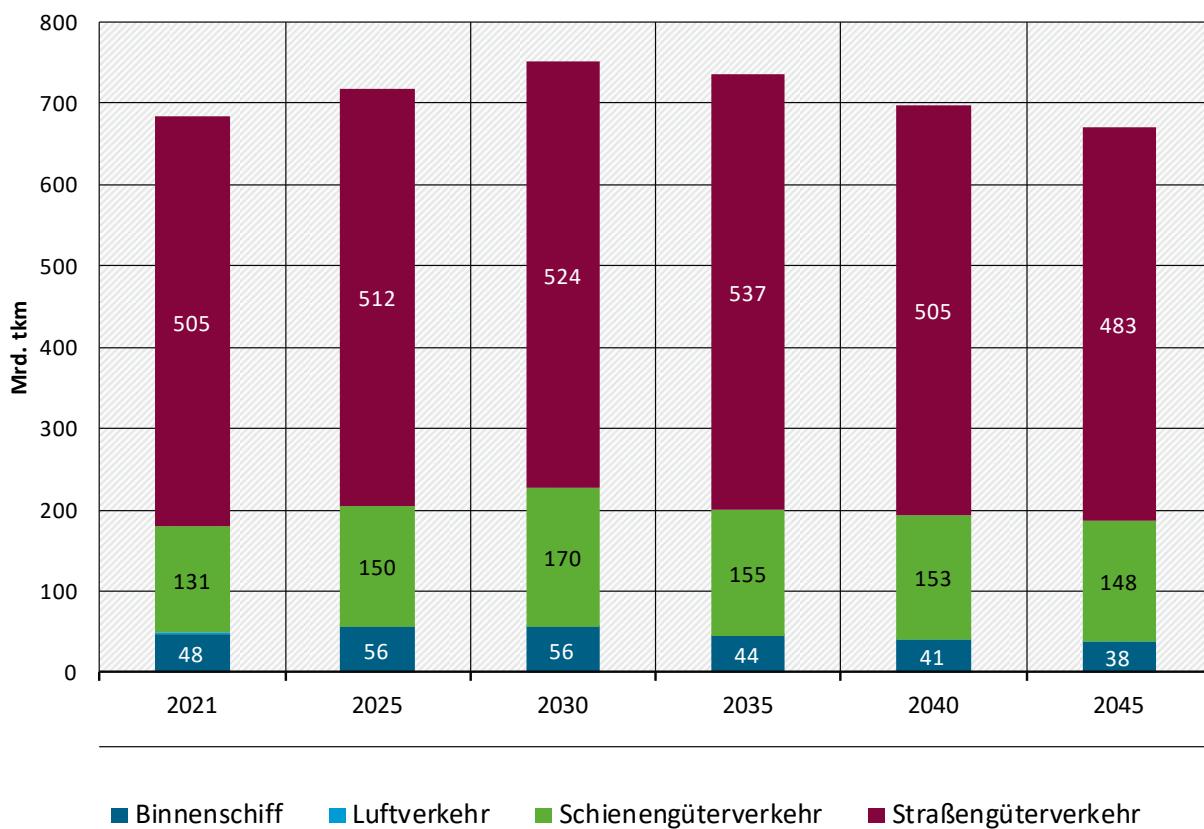
Quelle: Modellierung Öko-Institut

Das Nullwachstum des BIP ab 2035 in CARESupreme bewirkt ein im Vergleich zum Projektionsbericht 2024 (Harthan et al. 2024) zurückgehende Güterverkehrsleistung (siehe Abbildung 63). Zusätzlich ergeben sich durch Klimaschutzmaßnahmen in anderen Sektoren bereits zum Jahr 2030 Güterstruktureffekte, welche die Güterverkehrsleistung zusätzlich reduzieren (z. B. vorgezogener Kohleausstieg). In Summe führt die stetige Zunahme des BIP zunächst zu einem stetigen Wachstum der Güterverkehrsleistung bis zum Jahr 2030. Ab 2030 führen die Güterstruktureffekte zu einer Reduktion des Transportvolumens und zusammen mit dem Wirtschaftswachstumsstop ab 2035 zu einer langfristigen Abnahme der Güterverkehrsleistung, wie in Abbildung 63 zu sehen ist.

Im Jahr 2030 ist, verglichen mit dem Jahr 2025, eine durch den starken CO₂-Preis und die Lkw-Maut bedingte Verlagerung hin zur Schiene erkennbar. Durch die schnelle Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs und die damit verbundenen Kostenminderungen ist dieser Trend nach 2030 jedoch rückläufig.

Der internationale Seeverkehr reduziert sich im Jahr 2045 um rund 30 % gegenüber dem Projektionsberichts 2024 (Harthan et al. 2024).

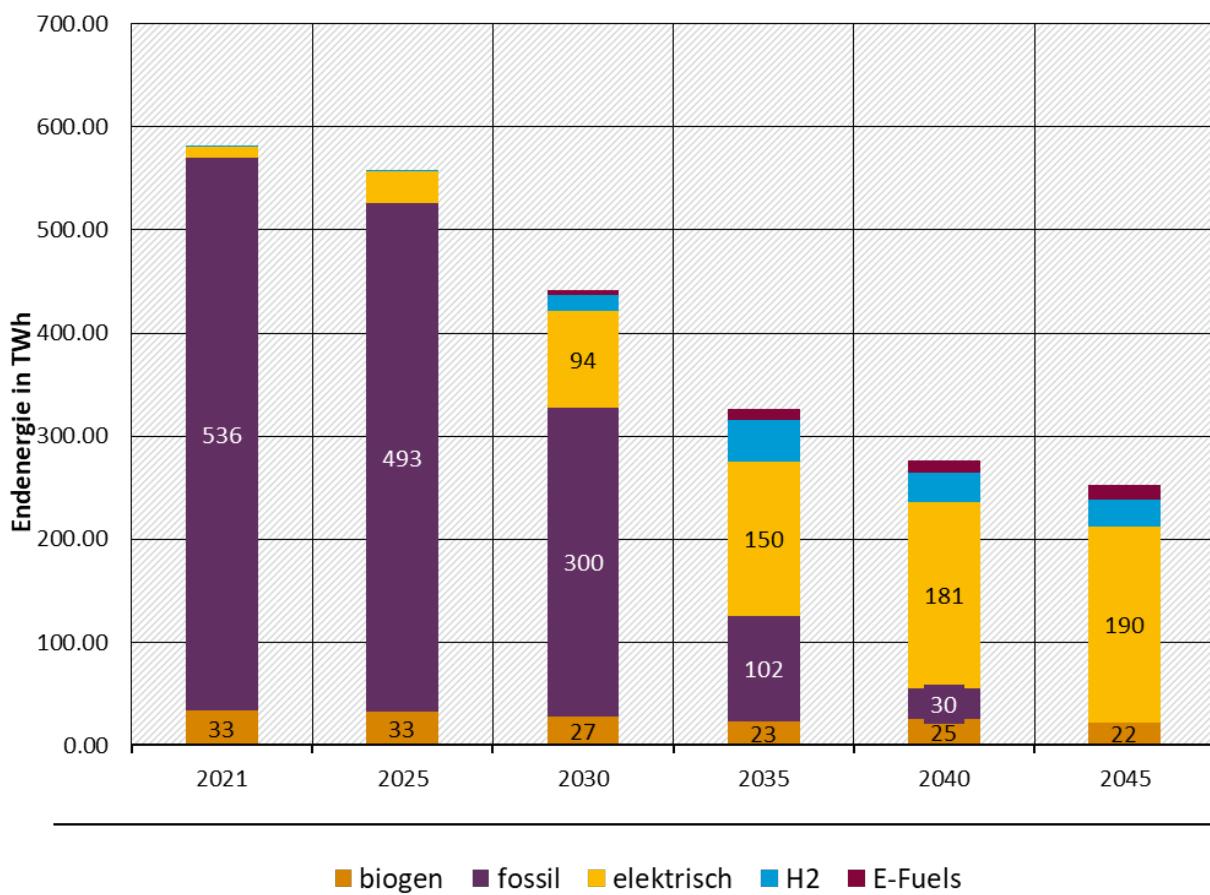
Abbildung 63: Güterverkehrsleistung (nationale Verkehre), CARESupreme, 2021-2045



Quelle: Modellierung Öko-Institut

In Abbildung 64 ist der Endenergiebedarf von CARESupreme im Verkehrssektor dargestellt. Die genannten Entwicklungen hin zu einem weitestgehend elektrifizierten Fahrzeugbestands und Suffizienzmaßnahmen tragen wesentlich zu einem Rückgang des Endenergiebedarfs bei. Der Strombedarf des Verkehrssektors steigt von 339 PJ im Jahr 2030 auf 684 PJ im Jahr 2045 an. Die THG-Quote entspricht bis zum Jahr 2030 der heute gültigen Ausgestaltung der THG-Quote. Nach 2030 wird die THG-Quote derart fortgeführt, dass bis zum Jahr 2040 ein vollständiger Umstieg der Biokraftstoffe auf fortschrittliche Biokraftstoffe stattfindet und der Anteil an erneuerbaren Kraftstoffen auf rund 25 % im Jahr 2035 bzw. rund 55 % im Jahr 2040 steigt. Bis zum Jahr 2045 steigt der Anteil der erneuerbaren Kraftstoffmenge zwar weiter bis auf 100 % an, die absolute Menge geht aber aufgrund des stark sinkenden Bedarfs an Flüssigkraftstoffen zurück.

Abbildung 64: Endenergiebedarf im Sektor Verkehr, CARESupreme, 2021-2045



Quelle: Modellierung Öko-Institut

6.2 CARETech

6.2.1 Narrativ

CARETech zeichnet ein Szenario, in dem Wirtschaftswachstum mit geringerem Fokus auf Suffizienz und Effizienz auftritt und das gleiche Treibhausgasemissionsminderungsniveau wie CARESupreme erreicht: im Jahr 2045 wird nationale Treibhausgasneutralität erreicht und die sektoralen Zwischenziele in den Jahren 2030 und 2040 werden eingehalten.

Entsprechend dieses Narrativs setzt sich die steigende BIP-Entwicklung in CARETech auch nach 2035 fort, eine Regionalisierung der Wirtschaftskreisläufe findet nicht statt. Damit bleibt, anders als in CARESupreme, die Reduktion der Güterverkehrsleistung durch Suffizienz aus und Güterstrukturreffekte fallen im Verkehrssektor geringer aus.

Instrumente im Verkehrssektor, welche Suffizienz und Effizienz adressieren, fallen gegenüber CARESupreme weg und werden zum Teil durch andere Instrumente ersetzt. Gleichzeitig werden Instrumente, welche Infrastruktur- und Angebotsstrukturen betreffen (z. B. Radwege, Ausbau des Schienennetzes, ÖPNV) gestrichen oder abgemildert.

Die Zielerreichung erfolgt damit insbesondere durch einen Technologiewechsel und eine Deckung des zusätzlich anfallenden Energiebedarfs mit erneuerbarer Energie. Der Ausbau der Energieinfrastruktur, wie beispielsweise Ladeinfrastruktur oder H₂-Infrastruktur, werden in CARETech weiterhin berücksichtigt.

Wie in CARESupreme wird angenommen, dass der internationale Verkehr im Jahr 2045 treibhausgasneutral wird. Dafür werden die Beimischungsquoten alternativer Kraftstoffe ab 2035 angepasst, bis 2045 100 % erneuerbare Kraftstoffe zum Einsatz kommen.

6.2.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

In CARETech werden Instrumente, welche Effizienz und Suffizienz sowie den Ausbau von Infrastruktur und Angebot (Schiene, ÖPNV) adressieren, teilweise gestrichen. Dies betrifft insbesondere die Angebotsausweitung des ÖPNV, die zusätzliche Förderung des Radverkehrs, die Ausweitung der Parkraumbewirtschaftung, die Änderung der Dienstwagenbesteuerung, die Erhöhung der Luftverkehrssteuer und die Anpassungen beim Tempolimit.

Bereits beschlossene Maßnahmen wie die EU CO₂-Flottenzielwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) sowie für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) und das Deutschlandticket bleiben auf dem Stand des MWMS des Projektionsberichts 2024 erhalten. Die CO₂-Spreizung der Lkw-Maut sowie der Ausbau der Lkw-Energieinfrastruktur wird wie in CARESupreme samt Ausweitung der Lkw-Maut auf alle Straßen angenommen.

Der ETS1 wird wie in CARESupreme im Flugverkehr berücksichtigt, allerdings ohne Nicht-CO₂-Effekte. Die Energiesteueranpassung wird, wie in den Rahmendaten abgestimmt, auch in CARETech übernommen, jedoch ohne die Einführung einer Kerosinsteuern.

Weitere Instrumente wie die Einführung der Klimaabgabe, die Kaufförderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben, die Pkw-Maut und die THG-Quote werden in CARETech gegenüber CARESupreme abgeändert:

- ▶ Bei der **Klimaabgabe** wird die Bemessungsgrenze ab 2028 auf 50 g/km festgelegt, sodass weite Teile der Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge vom Malus für neue Fahrzeuge ausgenommen sind. Für Fahrzeuge über der Bemessungsgrenze fällt die Klimaabgabe weiterhin an.
- ▶ Bei der **Kaufförderung** von leichten und schweren Nutzfahrzeugen wird die Förderung von batterieelektrischen Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen bis 2030 auf 3.000 € Prämie pro Fahrzeug, unabhängig vom Kaufpreis, festgelegt.
- ▶ Die **Pkw-Maut** wird wie in CARESupreme 2029 mit der Infrastrukturkomponente eingeführt, jedoch nur für Verbrennerfahrzeuge. Batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge sind ausgenommen. So wird die Transformation zusätzlich angeregt, während langfristige Verlagerungseffekte bei emissionsfreien Fahrzeugen ausbleiben. Eine Internalisierung externer Kosten findet, anders als in CARESupreme, nicht statt.
- ▶ Die **THG-Quote** wird bereits vor dem Jahr 2030 erhöht, um das Klimaschutzziel des Verkehrs im Jahr 2030 zu erreichen. Auch in Folge wird davon ausgegangen, dass der Anteil erneuerbarer Kraftstoffe höher ist als in CARESupreme. Der Anteil erneuerbarer Flüssigkraftstoffe steigt auf über 30 % im Jahr 2035 und über 60 % im Jahr 2040.

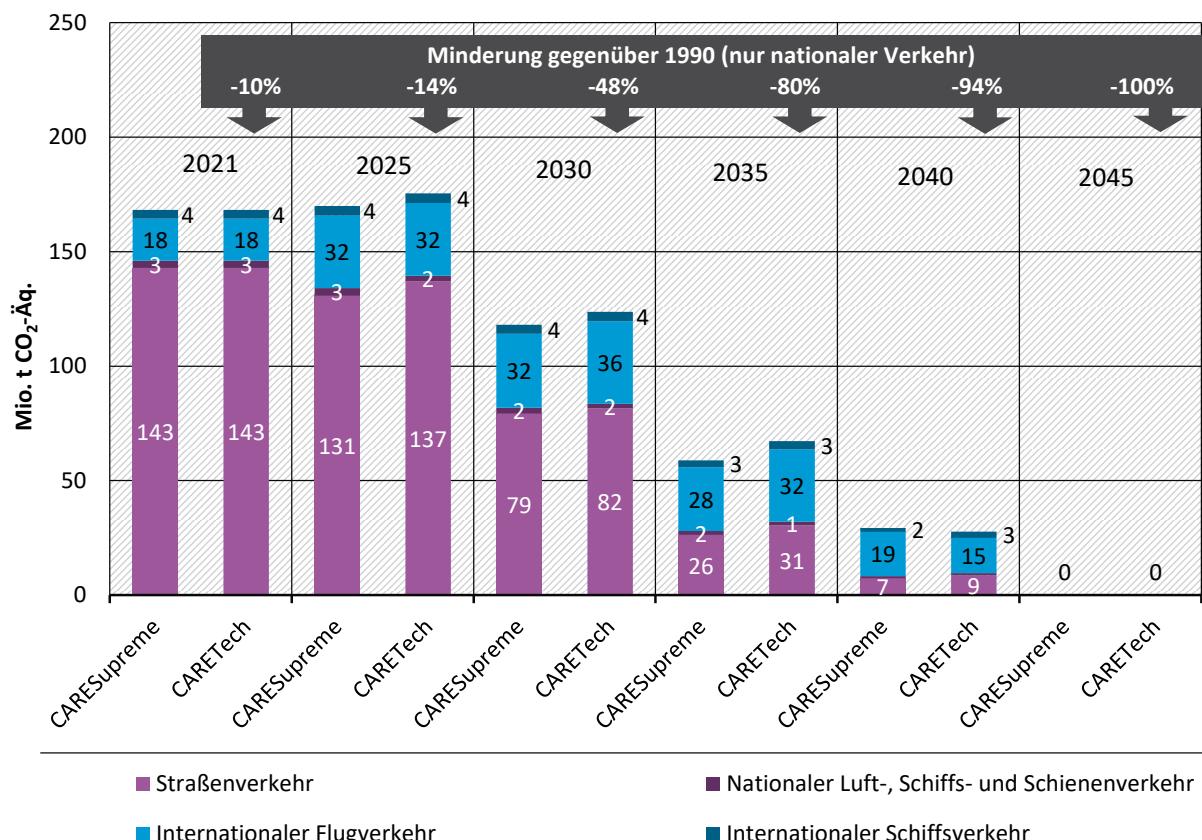
6.2.3 Zentrale Ergebnisse

In CARETech werden wie in CARESupreme die Klimaschutzziele der Jahre 2030, 2040 und 2045 eingehalten. Im Jahr 2030 weist der Verkehrssektor in CARETech noch 84,3 Mio. t CO₂-Äq. gegenüber 81,8 Mio. t CO₂-Äq. in CARESupreme auf. Die wichtigste Entwicklung zur Erreichung des Klimaschutzziel im Jahr 2030 ist die Transformation von Pkw und Nutzfahrzeugen auf alternative Antriebe. Bei den Pkw wird diese angereizt durch den Malus auf die Neuzulassungen von emittierenden Fahrzeugen in Verbindung mit der zusätzlichen Kaufförderung für alternative

Antriebe sowie die Einführung der fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut ab 2029, die für emissionsfreie Pkw nicht anfällt. Auch die Anpassung der THG-Quote vor 2030 und die ambitioniertere Fortschreibung nach 2030 führen zu einer höheren Treibhausgasemissionsminderung durch den Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe.

Wie in CARESupreme wird der internationale Verkehr im Jahr 2045 treibhausgasneutral.

Abbildung 65: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr, CARESupreme und CARETech, 2021–2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

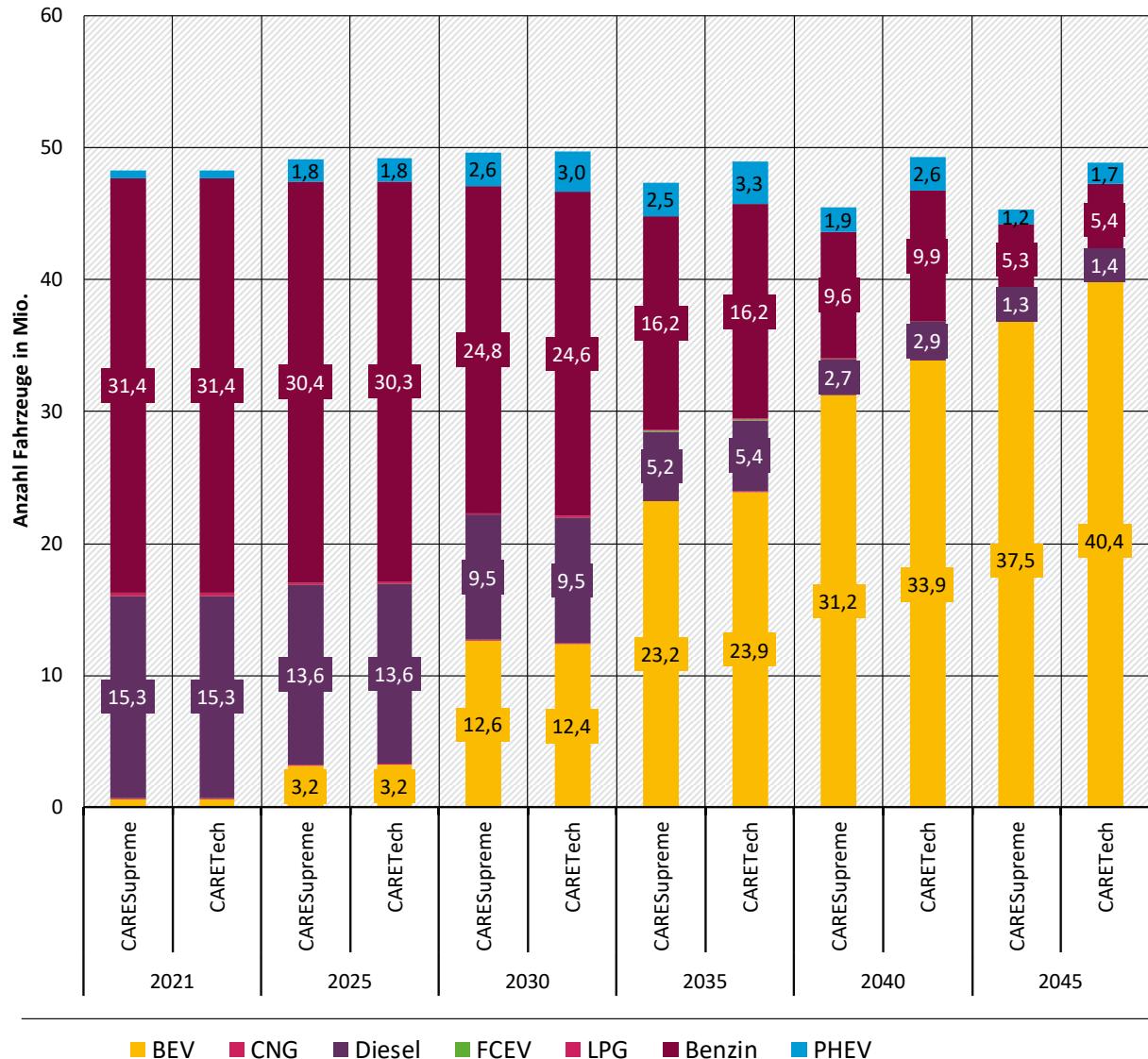
Tabelle 27: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Ziviler Luftverkehr	0,7	1,0	0,8	0,5	0,3	0,0
Straßenverkehr	142,9	137,0	81,5	30,5	8,6	0,1
Schienenverkehr	0,9	0,8	0,5	0,3	0,1	0,0
Schiffsverkehr	1,6	1,6	1,4	1,2	0,9	0,0
Gesamt	146,1	140,4	84,3	32,6	9,9	0,1
Minderung gegenüber 1990	-10,1 %	-13,9 %	-48,3 %	-80,0 %	-93,9 %	-99,9 %
Gesamt CARESupreme zum Vergleich	146,1	134,0	81,8	28,0	8,4	0,1

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Nachrichtlich:						
Internationaler Flugverkehr	18,3	31,8	36,2	31,7	15,4	0,3
Internationaler Schiffsverkehr	3,8	4,2	4,1	3,5	2,7	0,0
Gesamt inklusive nachrichtlich	168,1	176,4	124,6	67,7	28,0	0,5

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Abbildung 66: Pkw-Bestand nach Antriebstypen, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



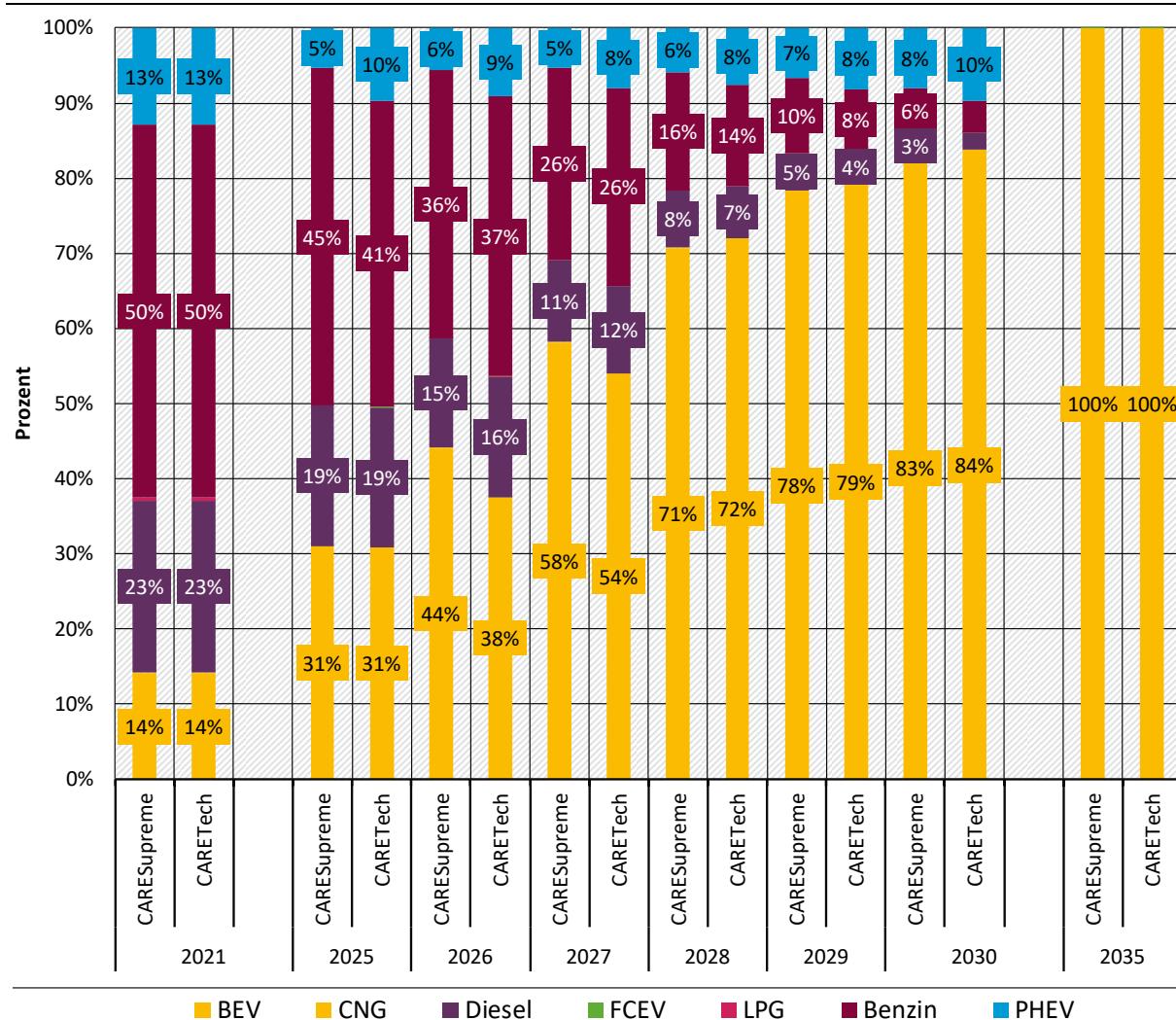
Quelle: Modellierung Öko-Institut

In Abbildung 66 und Abbildung 67 ist die Entwicklung des Pkw-Bestands und der Pkw-Neuzulassungen dargestellt. Gegenüber CARESupreme werden zwischen 2025 und 2027 weniger BEV-Fahrzeuge und mehr Plug-In-Hybride zugelassen, was sich auch im Fahrzeugbestand im Jahr 2030 zeigt. Begründet ist dies in der höheren Bemessungsgrenze der Klimaabbgabe, durch die PHEV-Fahrzeuge teilweise von der Klimaabbgabe ausgenommen werden. Außerdem werden PHEVs durch das Ausbleiben der Anpassung der Dienstwagensteuer bis 2030

in CARETech weiter bevorteilt. Durch den größeren Neuzulassungsanteil von PHEVs werden in CARETech zu Ende der 2020er Jahre gegenüber CARESupreme leicht mehr BEVs (Treiber: Einhaltung der CO₂-Flottenzielwerte) und weniger Diesel- und Benzinfahrzeuge (Treiber: Kostenvorteile ggü. CARESupreme von PHEV gegenüber ICEV) zugelassen, um die EU-Flottenzielwerte einzuhalten. Durch die EU-Flottenzielwerte werden im Jahr 2035 wie in CARESupreme nur noch batterieelektrische Fahrzeuge zugelassen.

Der Pkw-Bestand in CARETech sinkt bis 2045 nicht wie in CARESupreme ab, sondern bleibt annähernd konstant. In CARETech bleibt Autofahren durch die ausbleibende Pkw-Maut auf Elektrofahrzeuge mit zunehmender Elektrifizierung der Flotte gegenüber CARESupreme deutlich günstiger und damit attraktiver.

Abbildung 67: Antriebsverteilung der Neuzulassungen bei Pkw, CARESupreme und CARETech, 2021-2035

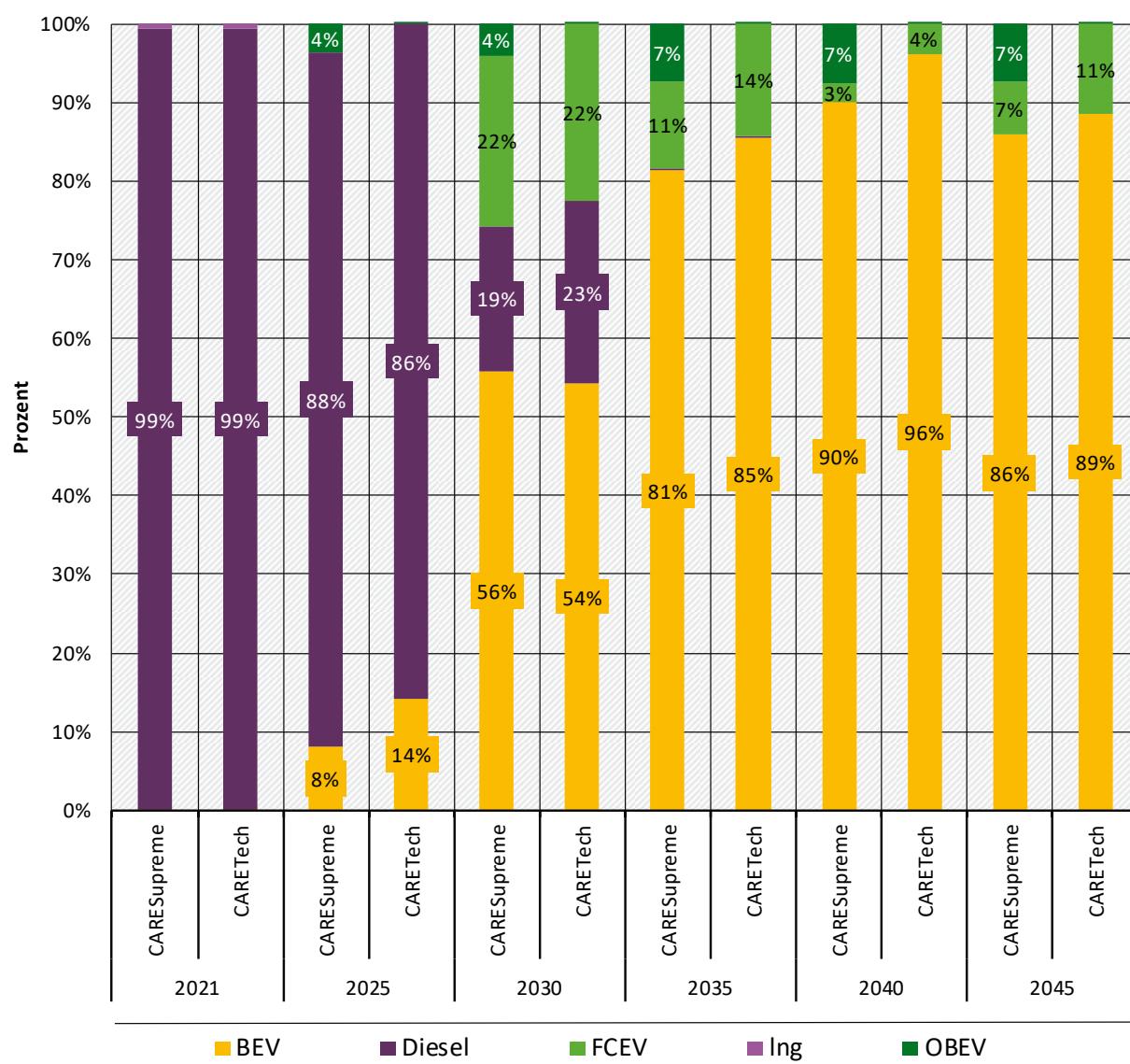


Quelle: Modellierung Öko-Institut

Bei den Neuzulassungen von schweren Nutzfahrzeugen > 12 Tonnen (siehe Abbildung 68) zeigt sich eine ähnliche Entwicklung in beiden Szenarien. Während in CARESupreme die Oberleitungstechnologie eingeführt wird, kommen in CARETech vermehrt Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) in den Markt. Wie in CARESupreme gehen die Neuzulassungen der FCEVs mit dem Ausbau der Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw

bis 2040 zurück, kommen danach durch den gegenüber dem H₂-Preis steigenden Strompreis wieder vermehrt in den Markt.

Abbildung 68: Antriebsverteilung der Neuzulassungen bei Lkw > 12 Tonnen zGG, CARESupreme und CARETech, 2021-2045

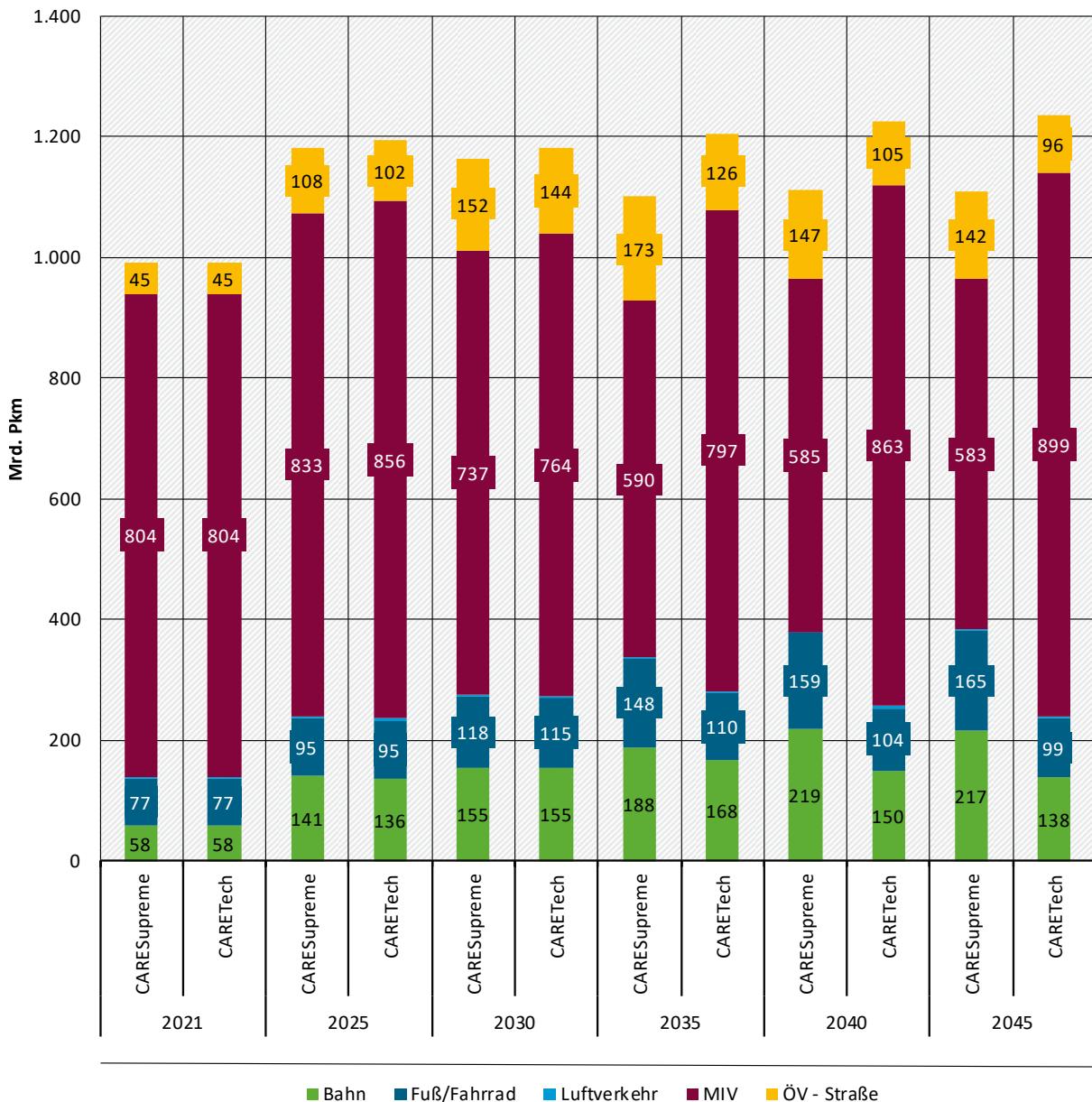


Quelle: Modellierung Öko-Institut

Bei der Personenverkehrsleistung (Abbildung 69) ist ein deutlicher Unterschied zwischen CARESupreme und CARETech sichtbar. Während in CARESupreme die Verkehrsleistung im MIV bis 2035 deutlich zurückgeht und danach weiterhin leicht sinkt, nimmt die Verkehrsleistung in CARETech bis 2030 leicht ab und steigt danach wieder stetig, sodass im Jahr 2045 mehr Verkehrsleistung im MIV vorliegt als heute. Während die kurzfristige Minderung der MIV-Verkehrsleistung bis 2030 auf der Verteuerung von fossilen Kraftstoffen (CO₂-Preis, Energiesteueranpassung) beruht, führt die langfristig zunehmende Elektrifizierung zu einer Senkung der Energiekosten im MIV. In CARESupreme wird diesem Trend hin zum Auto durch die fahrleistungsabhängige Pkw-Maut entgegengesteuert, sodass zunehmend Verkehr von der Straße auf die Schiene oder den ÖPNV verlagert wird. Diese Maßnahme bleibt in CARETech für emissionsfreie Pkw dagegen aus.

Durch diese Entwicklung wird die Schiene und der ÖPNV in CARETech weitaus weniger beansprucht als in CARESupreme. Die Verlagerung zum Schienenverkehr und dem ÖPNV fällt damit wesentlich geringer aus als in CARESupreme. Durch das Ausbleiben von zusätzlicher Radverkehrsförderung bleibt der starke Anstieg der aktiven Mobilität, wie er in CARESupreme ab 2030 zu beobachten ist, in CARETech ebenfalls aus.

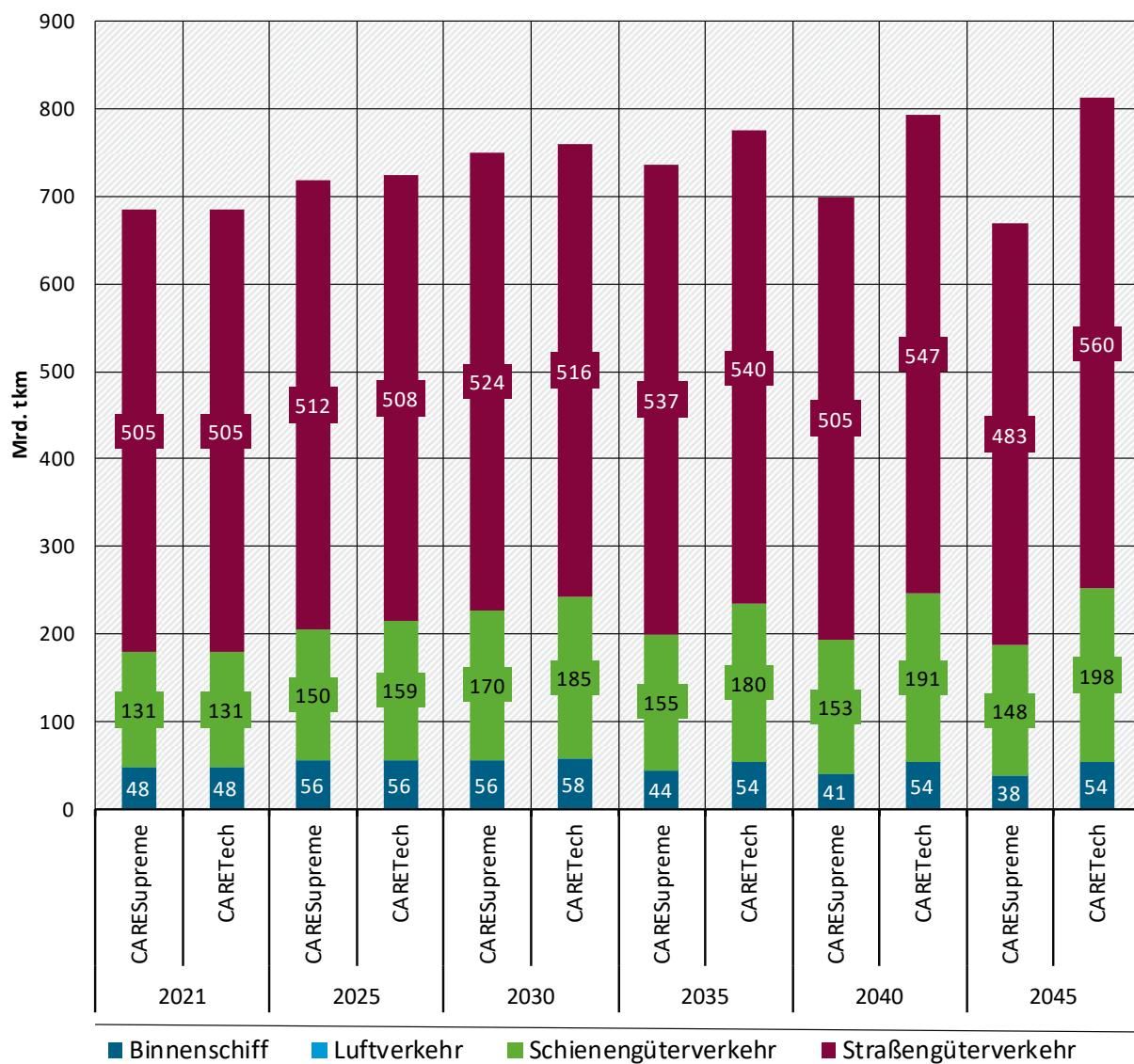
Abbildung 69: Personenverkehrsleistung, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: Modellierung Öko-Institut

Bei der Güterverkehrsleistung (Abbildung 70) zeigt sich ebenfalls ein großer Unterschied zwischen den Szenarien. Während in CARESupreme das Ausbleiben eines weiteren Wirtschaftswachstums im Jahr 2035, die Regionalisierung der Wirtschaftskreisläufe und die Veränderung von Güterstruktureffekten durch Suffizienzmaßnahmen anderer Sektoren zu einer starken Minderung der Güterverkehrs nachfrage ab 2030 führt, steigt die Verkehrsleistung in CARETech bis 2045 weiter an. Dabei wird sowohl mehr auf der Straße als auch auf der Schiene und durch die Binnenschifffahrt transportiert.

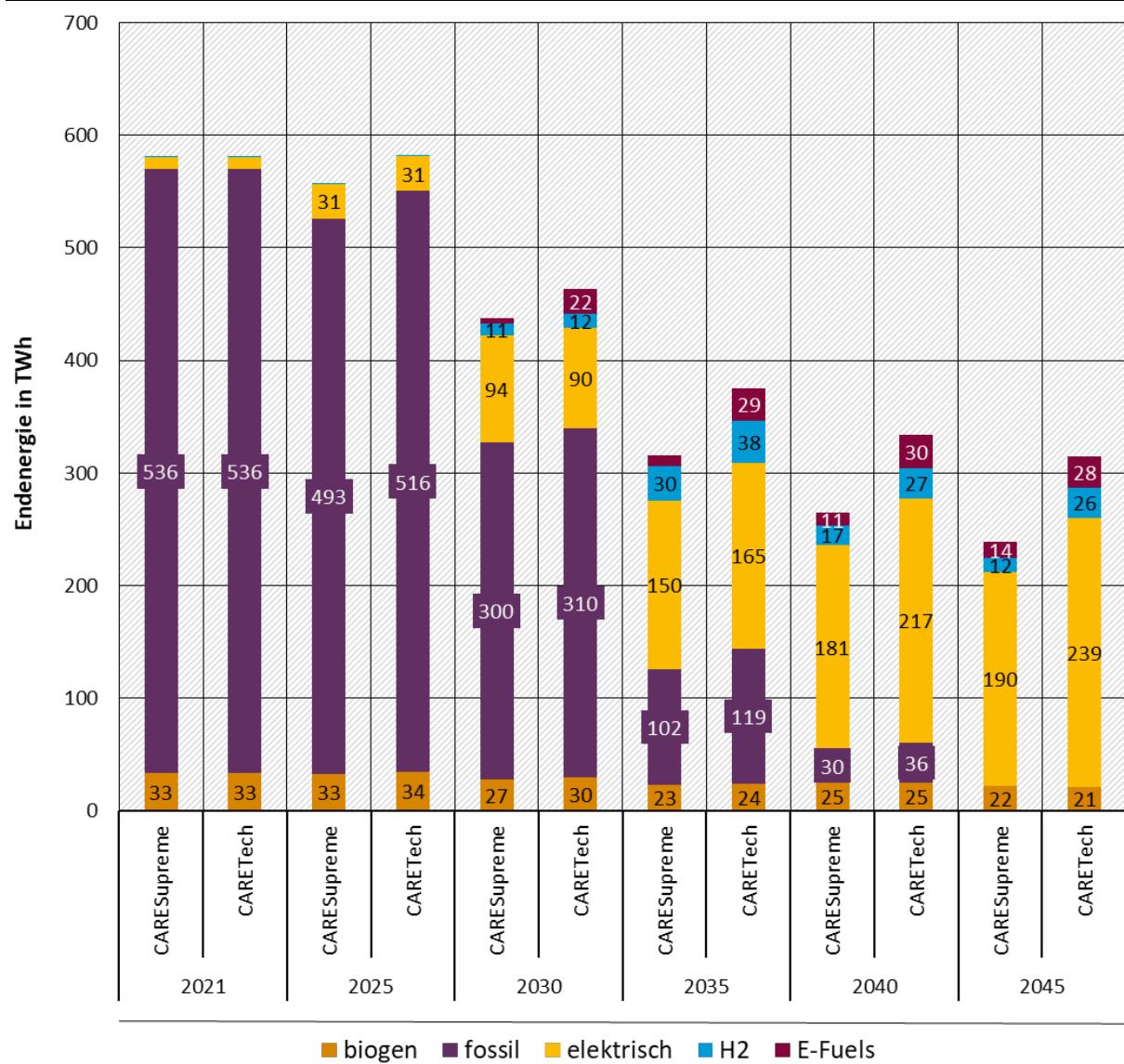
Abbildung 70: Güterverkehrsleistung (nationale Verkehre), CARESupreme und CARETech, 2021–2045



Quelle: Modellierung Öko-Institut

Insgesamt zeigt sich in beiden Szenarien ein starker Rückgang fossiler Energie, insbesondere zwischen 2025 und 2035. In diesem Zeitraum wird der Großteil der Pkw- und Lkw-Flotte elektrifiziert (Abbildung 71). In CARETech zeigt sich ein erhöhter Energiebedarf im gesamten Modellierungszeitraum im Vergleich zu CARESupreme. Bereits im Jahr 2030 kommt es durch die angepasste THG-Quote zu einem stark erhöhten Verbrauch an E-Fuels und einem leicht erhöhten Bedarf an Wasserstoff und Biokraftstoffen. Die starke Elektrifizierung des Fahrzeugbestands führt vor allem von 2025 bis 2035 zu einem starken Rückgang der benötigten Flüssiggiftstoffe und damit auch zu einem Rückgang der Nutzung fossiler Kraftstoffe. Ab 2035 zeigt sich durch das Fernbleiben von Suffizienzmaßnahmen der erhöhte Bedarf an Strom und fossilen Kraftstoffen. Während im Jahr 2045 in CARESupreme 190 TWh Strom für den Verkehrssektor benötigt werden, beträgt der Strombedarf in CARETech mit 239 TWh rund 49 TWh mehr.

Abbildung 71: Endenergiebedarf im Sektor Verkehr, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: Modellierung Öko-Institut

7 Landwirtschaft

7.1 CARESupreme

7.1.1 Narrativ

Im CARESupreme-Szenario wird ein hohes Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein der Bevölkerung zugrunde gelegt. Die Menschen ernähren sich nach dem Vorbild der Planetary Health Diet, d.h. sie essen ca. ¾ weniger Fleisch und Milchprodukte als heute und Gemüse, Hülsenfrüchte und Nüsse stehen verstärkt auf dem Speiseplan (Willett et al. 2019). Durch diese Änderung der Ernährungsgewohnheiten verändert sich auch die deutsche Landwirtschaft gegenüber heute grundlegend: eine zielgerichtete Reduktion der Tierbestände geht mit einer starken Reduktion der Anbauflächen für Futtermittel einher. Demgegenüber steht die Ausweitung des Gemüse- und Nussanbaus und der verstärkte Anbau von Hülsenfrüchten zur Deckung des Proteinbedarfs. Durch die freiwerdenden Futtermittelanbauflächen sinkt der Flächendruck und es können Umweltziele wie die großflächige Wiedervernässung von Moorstandorten, die Umsetzung der Biodiversitätsziele aber auch extensivere Produktionsweisen wie der Ökolandbau verstärkt werden. Außerdem werden weniger Eiweißfuttermittel importiert, da diese verstärkt heimisch angebaut werden. Der Aufwuchs des Grünlandes wird für die Tierhaltung verwendet. Diese Flächen stehen nicht in Konkurrenz zur menschlichen Ernährung, da Grünland bereits heute zu erhalten ist und nicht zu Ackerland umgebrochen werden darf. Allerdings sinkt die verfügbare Grünlandfläche auf Grund von Moorwiedervernässung, Extensivierung und der Etablierung von Agroforstsystmen. Das verfügbare Grünland wird weiterhin für die Wiederkäuerhaltung, insbesondere für die Fütterung von Milchkühen, genutzt. Die damit mögliche Milchproduktion ist höher als die Nachfrage – sofern diese nach dem Muster der Planetary Health Diet erfolgt – und die Selbstversorgungsgrade einzelner Produkte (z. B. Milch) erhöhen sich. Damit könnten größere Mengen exportiert oder inländisch konsumiert werden.

Für die Umsetzung dieser Veränderungen sind zielgerichtete und wirkungsvolle Instrumente auf der Nachfrage- und auf der Produktionsseite notwendig. Die Änderungen im Landwirtschaftssektor erfolgen in erster Linie über die Umsetzung von Instrumenten auf der Produktionsseite.

7.1.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

Instrumente zur Steuerung der Lebensmittelnachfrage

Eine **Ernährungsstrategie** zur Umsetzung der Planetary Health Diet erfordert verschiedene einzelne Instrumente mit unterschiedlichen Ansätzen:

- ▶ Steuerung über Preiselemente: kurzfristig kann eine Mehrwertsteueranhebung auf tierische Produkte realisiert werden sowie eine weitere Reduktion des Mehrwertsteuersatzes für pflanzliche Produkte. Langfristig führt die Einführung einer Treibhausgasbepreisung auf tierische Produkte zu einer verursachergerechteren Veränderung der Endverbraucherpreise und zu einer Verschiebung der Nachfrage zugunsten pflanzlicher Lebensmittel.
- ▶ Verpflichtende Vorgaben für Außer-Haus-Verpflegung in öffentlichen Einrichtungen und auf öffentlich geförderten Veranstaltungen sollen dafür sorgen, dass ein attraktives gesundes, sozial-, umwelt- und tierwohlverträgliches Angebot an Speisen gewährleistet ist und die Wahl für nachhaltigere Varianten erleichtert ist (WBAE 2020).

- ▶ Bildung/Schulung/Information/Aufklärung: Durch einen breiten Ansatz dieser informatorischen Instrumente sollen allen Akteuren die notwendigen Kenntnisse vermittelt werden können, beispielsweise durch die Anpassung der Inhalte bei der Kochausbildung, die Einführung eines Unterrichtsfachs Ernährung, die Bereitstellung von Informationen und Bewerbung von Vorteilen und Notwendigkeit der pflanzlichen Ernährung, sowie zur Verringerung von Lebensmittelabfällen.

Für die Landwirtschaft sind umfangreiche Instrumentenbündel im Bereich der Tierhaltung und des Pflanzenaus erforderlich, um eine klimafreundliche Produktion zu optimieren und gleichzeitig auch andere Ziele einer nachhaltigen Landwirtschaft einzulösen:

Zukunftsfähige-Tierhaltung-Gesetz

- ▶ Die Flächenbindung auf Betriebsebene und eine Erhöhung der Eigenfutterquote sind geeignete Instrumente, um den regional mitunter hohen Tierbesatz zu reduzieren und den Flächenbedarf im Ausland durch Futtermittelimporte zu reduzieren. Auf diese Weise werden Stickstoffüberschüsse und Risiken für die Verlagerung von CO₂-Emissionen ins Ausland (Carbon Leakage) verringert.
- ▶ Die Grünlandbindung für Wiederkäuer gehört ebenfalls zu diesem Aspekt und ist aus Klimasicht besonders relevant, da die Haltung von Rindern und Milchkühen mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden ist. Der Vorteil einer grünlandbasierten Rinderhaltung liegt darin, dass diese nicht in Konkurrenz zum Anbau von Ackerkulturen für die menschliche Ernährung steht.
- ▶ Moratorium für neue Tierhaltungsanlagen in Moorregionen: Heute ist der Großteil dieser Regionen Grünland für die Rinder- und Milchkuhhaltung⁵⁷. In Zukunft sollen sie großflächig wiedervernässt werden, um die hohen Treibhausgasemissionen aus der trockenen Nutzung abzustellen. Bei hohen Wasserständen⁵⁸ ist jedoch die herkömmliche Nutzung der Böden nicht möglich. Gleichzeitig ist die Wiedervernässung ein langwieriger Prozess. Daher ist das Moratorium wichtig, um Fehlinvestitionen (z.B. in Tierwohlställe oder Biogasanlagen) in der Zwischenzeit zu verhindern. Parallel zu einem Moratorium ist eine entsprechende Förderung in alternative Nutzungsformen sinnvoll - siehe nächster Punkt.
- ▶ Förderung von Ausstiegsprogrammen für die Tierhaltung auf Moorstandorten in Kombination mit Wiedervernässungsprämien und der Förderung der Nutzung nasser Moore durch Paludikulturen (s. weiter unten).
- ▶ Förderung von Ausstiegsprogramme bzw. Extensivierungsmaßnahmen für die Tierhaltung in Gebieten mit hohen Stickstoffüberschüssen - es gibt große Überschneidung mit den Moorstandorten.
- ▶ Förderung von Tierwohl in Verbindung mit reduziertem Tierbestand. Neben der Förderung von Ausstiegsprogrammen, die insbesondere für die gravierenden Veränderungen der Produktionen in den Moorregionen relevant ist, ist für die tierhaltenden Betriebe in den übrigen Regionen die Förderung von Tierwohl eine wichtige Zukunftsperspektive.

⁵⁷ Etwa ein Viertel der Milcherzeugung in Deutschland findet in diesen Regionen statt.

⁵⁸Aus Klimaschutzgesichtspunkten sind ganzjährig hohe Wasserstände (Wasserstufe 3 und höher) anzustreben.

Reduktion der Stickstoffemissionen

Der rückläufige Tierbestand und eine Verringerung der Besatzdichte hat bereits eine Verringerung der Stickstoffemissionen zur Folge. Weitere Impulse können durch Ordnungs- und Förderpolitik gesetzt werden:

- ▶ Weiterentwicklung des Ordnungsrechts durch die Vorgaben der Düngeverordnung und der Stoffstrombilanzverordnung zugunsten eines möglichst ausgewogenen betrieblichen Nährstoffkreislauf aus Nährstoffzufuhr und Nährstoffabfuhr.
- ▶ Die Zahlung von Fördergeldern im Rahmen der GAP kann über die Einführung eines Honorierungsansatzes positiv Einfluss auf die Stickstoffemissionen Einfluss nehmen. Beispielsweise, indem Direktzahlungen erhöht werden, wenn der Stickstoffüberschuss unterhalb eines betriebstypischen Orientierungswertes liegt – oder im umgekehrten Fall Kürzungen erfolgen.

Strukturelle Änderungen in der Landwirtschaft und Extensivierung

Die Veränderung der Produktion hat zum einen das Ziel den Stickstoffeinsatz weiter zu verringern und gleichzeitig Synergien zwischen Klimaschutz und insbesondere der Förderung der Biodiversität zu erreichen. Dazu sind verschiedene Förderinstrumente geeignet:

- ▶ Weiterer Ausbau des Ökolandbaus (Förderung) zur Umsetzung bestehender politischer Zielsetzungen auf nationaler und europäischer Ebene.
- ▶ Förderung von Agroforstsystemen – mit dieser bisher wenig verbreiteten Kulturform können verschiedene angestrebte Umweltwirkungen unterstützt werden: Bindung von Kohlenstoff auf der Fläche, Regulierung des Mikroklimas und Verringerung der Erosion als Anpassungsmaßnahme gegen den Klimawandel, die Anlage und Vernetzung von Habitateen und Erzeugung weiterer Produkte (Nüsse, Wert- und Energieholz).
- ▶ Förderung von Paludikulturen zur Nutzung wiedervernässter Moorflächen zur Gewinnung von Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung
- ▶ Förderung von Biodiversitätsflächen, hierzu gehören produktionsintegrierte Maßnahmen genauso wie nicht-produktive Flächen zur Umsetzung bestehender gesetzlicher Vorgaben für den Erhalt der biologischen Vielfalt.
- ▶ Ausweitung des Leguminosenanbaus in Folge erhöhter Nachfrage und Förderung (durch direkte Förderung sowie indirekt durch Förderung des Ökolandbaus)
- ▶ Ausweitung des Gemüseanbaus⁵⁹ in Folge erhöhter Nachfrage und durch Förderung (vergl. Instrumente der Nachfrageseite)

Reduktion der Emissionen durch technische Maßnahmen

Ergänzend zur Veränderung der Produktion kommen eine Reihe an technischen Maßnahmen hinzu, die eine Reduktion der Methan- und Lachgasemissionen sowie der energiebedingten CO₂-Emissionen zum Ziel haben:

- ▶ Ausbau der Güllevergärung in der Stallhaltung

⁵⁹ Zwar ist der Gemüseanbau oft mit höheren Stickstoffüberschüssen und Nitrateinträgen verbunden als herkömmliche Ackerkulturen, doch sind die Überschüsse geringer insgesamt geringer als in der Tierhaltung – die hierdurch zum Teil ersetzt werden soll.

- ▶ Stickstoffreduzierte Fütterung soweit möglich
- ▶ Flächendeckender Einsatz emissionsarmer Ausbringungstechnologie
- ▶ Steigerung der Energieeffizienz und des Einsatzes erneuerbarer Energien bzw. Elektrifizierung (Förderung)
- ▶ Zunehmende Verwendung alternativer Kraftstoffe bei schweren Landmaschinen, Elektrifizierung bei leichteren (Förderung)

Eine detaillierte Beschreibung sowie deren Parametrisierung aller berücksichtigten Instrumente kann Anhang A entnommen werden.

7.1.3 Zentrale Ergebnisse

7.1.3.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Im CARESupreme-Szenario sinken die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft kontinuierlich bis ins Jahr 2045 auf 23,2 Mio. t CO₂-Äq.. Die Ziele aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz für das Jahr 2030 unterschreitet der Sektor auf diesem Pfad deutlich mit 46,7 statt 56 Mio. t CO₂-Äq., denn hier steht ein ambitioniertes Szenario den wenig ambitionierten Zielen des Gesetzes gegenüber. Methodische Änderungen⁶⁰ haben zu einer Absenkung der Emissionen seit Festlegung der Sektorziele im Bundes-Klimaschutzgesetz geführt, ohne dass eine Zielanpassung erfolgt ist⁶¹.

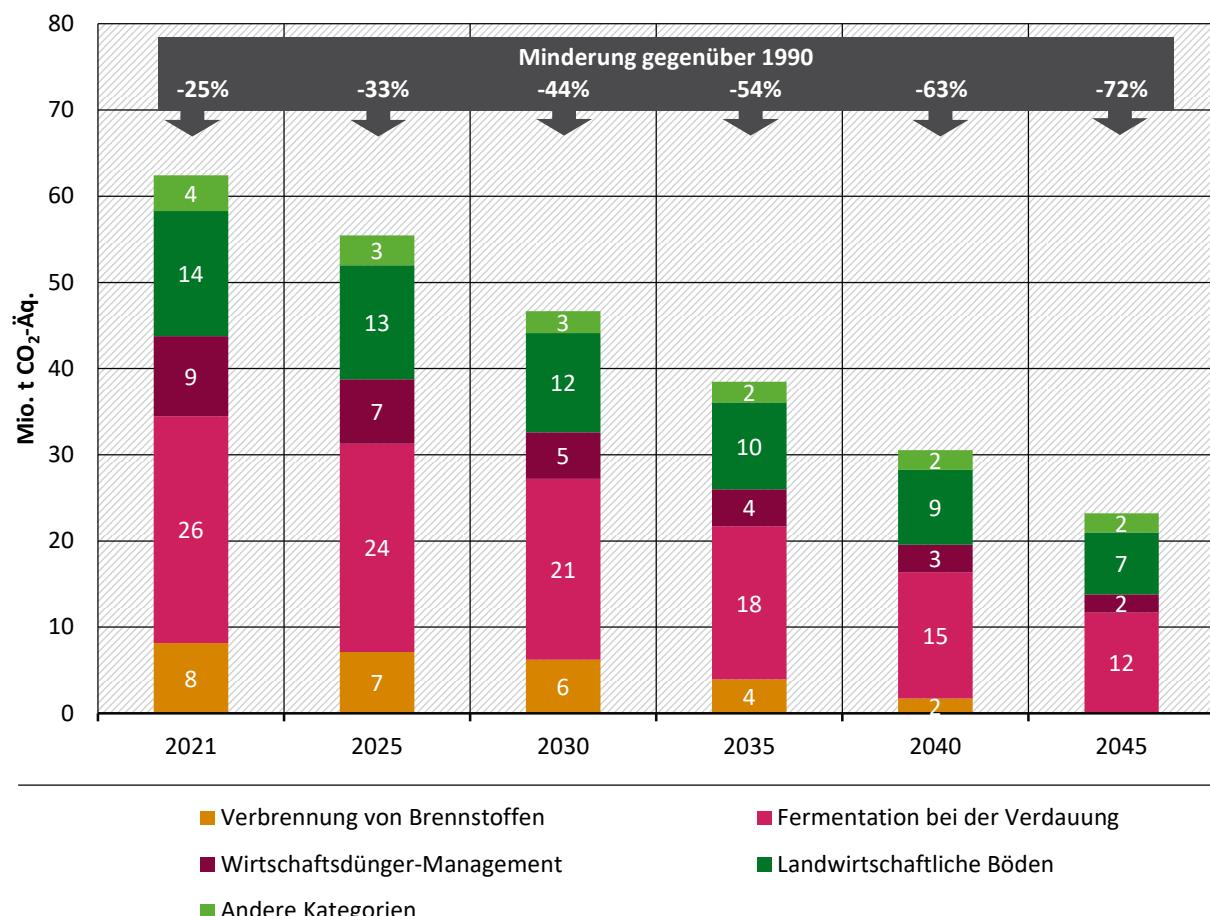
Abbildung 72 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen bis 2045. Gegenüber 1990 sinken die Emissionen bis zum Jahr 2045 um 72 %. Die Entwicklung nach 2021 resultiert aus einem Set an politischen Instrumenten, das vor allem die Begrenzung von Stickstoffemissionen, die Wiedervernässung von Moorstandorten und eine Flächenbindung der Tierhaltung inklusive einer Grünlandbindung für Wiederkäuer vorsieht. Diese drei Strategien setzen eine deutliche Verringerung des Nutztierbestands in Gang. Dies wird in den sinkenden Emissionen aus der Fermentation bei der Verdauung und im Wirtschafts-Düngermanagement sichtbar. Durch geringere regionale Tierkonzentrationen sinken auch die Stickstoffüberschüsse. In Kombination mit einer Förderung extensiver Bewirtschaftungsformen (Ökolandbau, Gehölzstrukturen, Biodiversitätsflächen) sowie emissionsarme Ausbringung des Stickstoffs verringern sich die Stickstoffemissionen in die Umwelt und mit diesen die direkten und indirekten Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden.

Der vierte Minderungsbaustein betrifft den Einsatz erneuerbarer Energien sowie eine effiziente Energieverwendung in der Landwirtschaft. Hierdurch werden in CARESupreme bis 2045 sämtliche fossilen CO₂-Emissionen der Landmaschinen, der stationären Nutzungen und für den Gebäudeenergiebedarf eingespart.

⁶⁰ In der Landwirtschaft dominieren Methan- und Lachgasemissionen aus der Tierhaltung (Verdauung und Wirtschaftsdünger-Management) sowie aus den landwirtschaftlichen Böden. Beide Gase sind von der Umstellung der Treibhauspotenziale (Global Warming Potential) auf die Werte des 5. IPCC-Sachstandsberichts betroffen. Zusätzlich hat eine detailliertere Berechnung der Lachgasemissionen aus Böden zu einer deutlichen Verringerung der rechnerischen Emissionen dieser Quellgruppe im Inventar geführt.

⁶¹ Vergleiche: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klimaschutzgesetz-sektorziele-prozentual-festlegen>

Abbildung 72: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft, CARESupreme, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 28 stellt die Emissionen noch etwas detaillierter dar. Unter der Emissionskategorie „Andere“ werden die Emissionen aus Biogas-Gärresten berichtet, die ebenfalls sinken. Grund dafür ist der starke Rückgang des Energiepflanzeneinsatzes in der Biogasproduktion, was zu geringeren Methanemissionen aus der Biogasproduktion und der Gärrestlagerung führt, allerdings werden weiterhin Reststoffe vergoren.

Tabelle 28: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
	Mio. t CO ₂ -Äq.					
Stationäre und mobile Feuerung	8,1	7,1	6,2	3,9	1,7	0,1
Fermentation bei der Verdauung	26,3	24,2	21,0	17,8	14,7	11,5
Wirtschaftsdünger-Lagerung ("Düngerwirtschaft")	9,3	7,5	5,4	4,3	3,2	2,1
Landwirtschaftliche Böden	14,5	13,2	11,5	10,1	8,7	7,2
Kalkung	2,0	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7
Harnstoffanwendung	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Andere kohlenstoffhaltige Dünger	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Andere (Emissionen aus Biogas-Gärresten)	1,6	1,1	0,3	0,2	0,1	0,1
Gesamt	62,4	55,4	46,7	38,5	30,5	23,2
Minderung gegenüber 1990	-25,0 %	-33,4 %	-43,9 %	-53,8 %	-63,3 %	-72,1 %

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

7.1.3.2 Entwicklung der Flächennutzung

Tabelle 29 zeigt die Entwicklung der Flächennutzung für die extensiven Bewirtschaftungsformen in CARESupreme. Insgesamt nimmt die Fläche, die extensiv bewirtschaftet wird, stark zu. Bis zum Jahr 2030 wird das Ziel des Koalitionsvertrags 2021 (SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP 2021) erfüllt und es werden 30 % der Fläche nach den Vorgaben des Ökolandbaus bewirtschaftet. Zudem erfolgt eine Ausweitung der Flächen mit einem hohen Biodiversitätswert (Gehölzstrukturen, wiedervernässte Moorstandorte⁶² und Brachflächen), sodass die Ziele der Biodiversitätsstrategie, bis zum Jahr 2030 10 % des Agrarlands mit hohen Biodiversitätsstandards erreicht werden können. Bis zum Jahr 2045 steigt die Fläche mit hohen Biodiversitätsstandards weiter an und nimmt insgesamt 20 % der LF ein. Damit können die Forderungen von Biodiversitätsexperten in CARESupreme eingelöst werden (z. B. Wirth et al. 2024; Oppermann et al. 2020).

Tabelle 29: Entwicklung der Flächennutzung in CARESupreme, 2020-2045

	2020	2030	2040	2045
Mio. ha				
Landwirtschaftliche Nutzfläche	16,6	16,6	16,5	16,5
Ökolandbau	1,6	4,9	4,7	4,6
Agroforst	0,01	0,32	0,7	0,9
Wiedervernässte Moore	0	0,2	0,8	1,0
Brachfläche etc.	0,4	1,1	1,3	1,5

Da sich durch die Moorvernässung die herkömmlich bewirtschaftete Fläche verringert, nimmt die absolute Fläche der ökologischen Landwirtschaft geringfügig ab. Dies ist insgesamt eher als ein Artefakt der Modellierung anzusehen.

Quelle: (destatis 2021), Modellrechnungen Öko-Institut

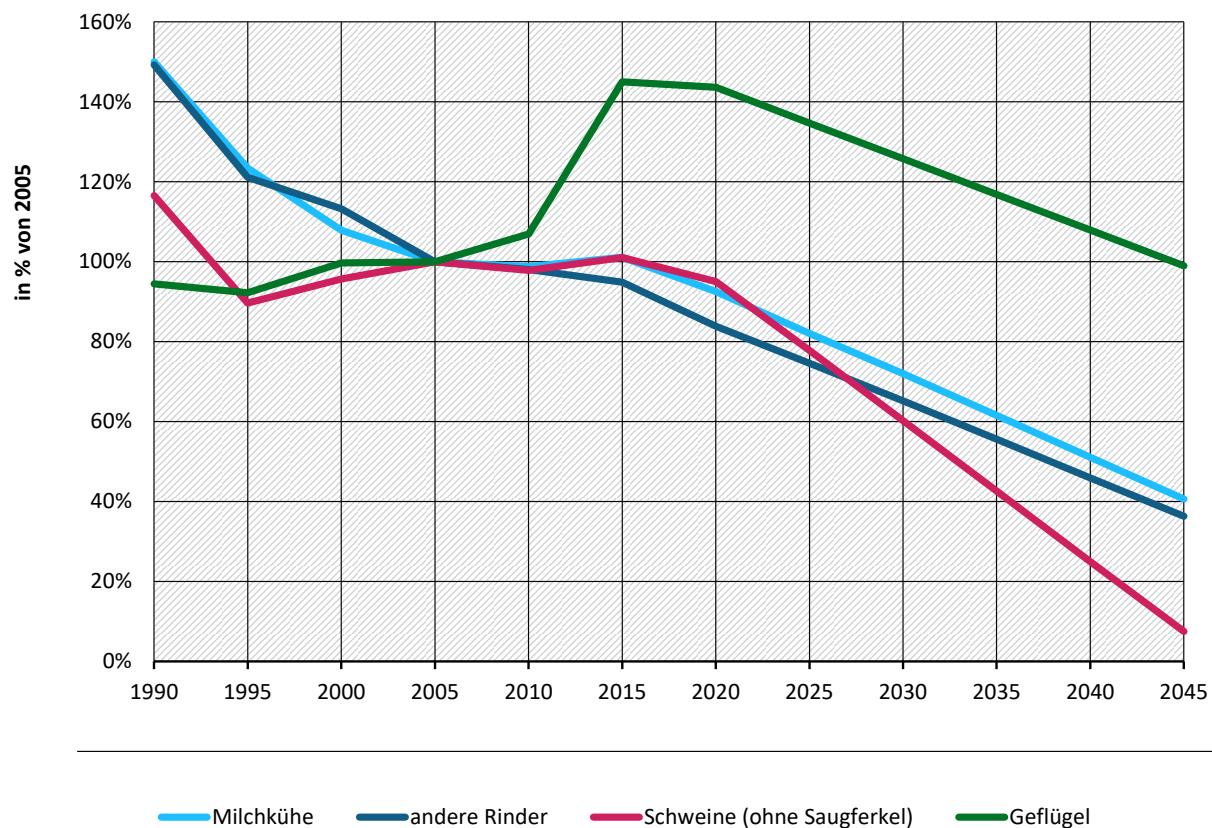
7.1.3.3 Entwicklung der Nutztierbestände und der Produktion tierischer Produkte

Abbildung 73 zeigt die Entwicklung der Tierbestände differenziert nach den einzelnen Tierarten. Die Zahlen verdeutlichen das Ausmaß der Transformation des Sektors in diesem Szenario. Rinder, Schweine und Geflügel sind über zwei Dekaden in einem hohen Tempo rückläufig. Dies wurde in der Vergangenheit lediglich direkt nach der Grenzöffnung 1990 leicht übertroffen.

⁶² Es ist noch unklar, ob zukünftig nur die Paludikulturen zur landwirtschaftlichen Nutzfläche gezählt werden und die übrige Wiedervernässungsfläche aus dieser herausfällt. Um die Veränderungen einfacher als Prozententwicklungen erläutern zu können, werden die Moorböden, die heute unter landwirtschaftlicher Nutzung sind, in dieser Studie auch weiterhin der landwirtschaftlichen Nutzfläche hinzugezählt.

Begründet liegt diese Entwicklung vor allem an der stark sinkenden Nachfrage nach Fleisch und Milchprodukten. Im Inland beruht dieser Rückgang auf einem stark gestiegenen Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein und auf verbrauchssteuernden Maßnahmen seitens der Politik, um Umwelt- und Klimaziele zu erfüllen (vgl. Abschnitt 7.1.2). Der Außenhandel kann diese Entwicklung nicht kompensieren, da davon auszugehen ist, dass entsprechende Nachfragetrends zulasten tierischer Produkte auch innerhalb der EU wirksam werden. Durch die gestiegenen Anforderungen an Umwelt- und Tierschutz steigen zudem die Produktionskosten, so dass Milch und Fleisch aus Deutschland auf dem internationalen Markt nur in einem kleinen Premiumsegment konkurrenzfähig ist.

Abbildung 73: Entwicklung der Tierbestände gegenüber dem Jahr 2005, 1990-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut; Prozentwerte sind auf Basis von Tierzahlen ermittelt

Die Ausweitung der ökologischen Landwirtschaft auf 30 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche bis 2030 führt auch zu einer Zunahme der ökologisch gehaltenen Tiere, insbesondere von Rindern und Milchkühen. Um die im Ökolandbau geltenden Kriterien an Eigenfutter und Flächenausstattung zu erfüllen, kommt es durch die Umstellung daher zu einer moderaten Abstockung dieser Tiergruppe. Ein weiterer Rückgang resultiert aus einer strengereren Ausbringungsobergrenze für Wirtschaftsdünger. Bis 2030 wird diese auf 120 kg Stickstoff pro Hektar begrenzt. Um langfristig möglichst viel Grünland in der Nutzung zu halten und die Konkurrenz um die Ackerfläche gering zu halten, wird in CARESupreme bis 2045 außerdem eine Grünlandbindung mit maximal 1,4 Großvieheinheiten pro Hektar für Wiederkäuer eingeführt.

Ein weiterer wichtiger Treiber ist die Moorwiedervernässung. In Deutschland wirtschaftet eine große Zahl spezialisierter Milchviehbetriebe auf trocken gelegten Moorböden. Diese verursachen hohe Emissionen aus der Torfzersetzung (vgl. Kapitel 9). Mit der

Wiedervernässung dieser hochproduktiven Grünlandstandorte geht für diese Betriebe ihre kostengünstige Futterbasis verloren und eine Abstockung der Herden ist unumgänglich.

Durch die Treibhausgasbepreisung auf der Verbraucherseite und den hohen Stellenwert, den Treibhausgaseinsparungen und Tierwohl in der Gesellschaft in CARESupreme einnehmen, wird die Tiergesundheit verbessert, so dass die Lebensleistung pro Kuh steigt und insgesamt weniger Nachzucht nötig ist. Auch dies führt zu einer weiteren Verringerung der Rinderzahl.

Bei Schweinen und Geflügel sind die Instrumente weniger stark differenziert worden und es wirkt vor allem die geringere Nachfrage und hoher Kostendruck auf die Produktion. Letzterer resultiert u.a. aus der Konkurrenz um Ackerfläche, da die weltweite Nachfrage nach biogenen Rohstoffen, Nahrungsmitteln und Kohlenstoffsenken steigt.

Tabelle 30 zeigt die Entwicklung der Produktionsmengen tierischer Produkte. Mit dem Rückgang der Tierbestände sinkt auch die Produktionsmenge von Fleisch und Milch drastisch. Da gleichzeitig durch das veränderte Ernährungsverhalten der Planetary Health Diet die Nachfrage nach tierischen Produkten abnimmt, bleibt der Selbstversorgungsgrad für Fleisch und Milch weiterhin hoch (Tabelle 31). Im Resultat liegt der Selbstversorgungsgrad im Jahr 2045 für Schwein und Geflügelfleisch bei 100 %. Für Rindfleisch und Milch steigt der Selbstversorgungsgrad sogar auf 132 % bzw. 162 %, da das fortbestehende Grünland⁶³ weiterhin für die Produktion von tierischen Produkten genutzt wird.

Tabelle 30: Entwicklung der Tierproduktion in Deutschland in CARESupreme, 2020-2045

Produkt	Einheit	2020	2030	2045
Milchprodukte	kt Milchäquivalente	31.960	24.471	12.809
Rindfleisch*	kt Schlachtgewicht	1.062	773	379
Schweinefleisch*	kt Schlachtgewicht	5.117	3.243	321
Geflügel*	kt Schlachtgewicht	1.637	1.433	1.331

Milchprodukte umgerechnet in die erforderliche Menge Milch = Milchäquivalente

Quelle: Modellergebnisse Öko-Institut

Tabelle 31: Entwicklung der Selbstversorgungsgrade in Deutschland für verschiedene Ernährungsweisen in CARESupreme, 2020-2045

Produkt	Einheit	Nachfrage PHD (2045 erreicht)	2020 (bezogen auf Verbrauch)	2030 (bezogen auf Verbrauch)	2045 (bezogen auf PHD)
Milchprodukte	kt Milchäquivalente	7.898	97,2 %	102,6 %	162 %
Rindfleisch*	kt Schlachtgewicht	287	93,5 %	92,7 %	132 %
Schweinefleisch*	kt Schlachtgewicht	321	127,2 %	125,6 %	100 %
Geflügel*	kt Schlachtgewicht	1.331	97,4 %	92,9 %	100 %

PHD = Ernährung gemäß der Planetary Health Diet – wird in CARESupreme im Jahr 2045 für Deutschland zugrunde gelegt.

Im Jahr 2030 liegt der Verbrauch von Milch und Fleisch dem von 2020 näher als der PHD.

Milchprodukte umgerechnet in die erforderliche Menge Milch = Milchäquivalente

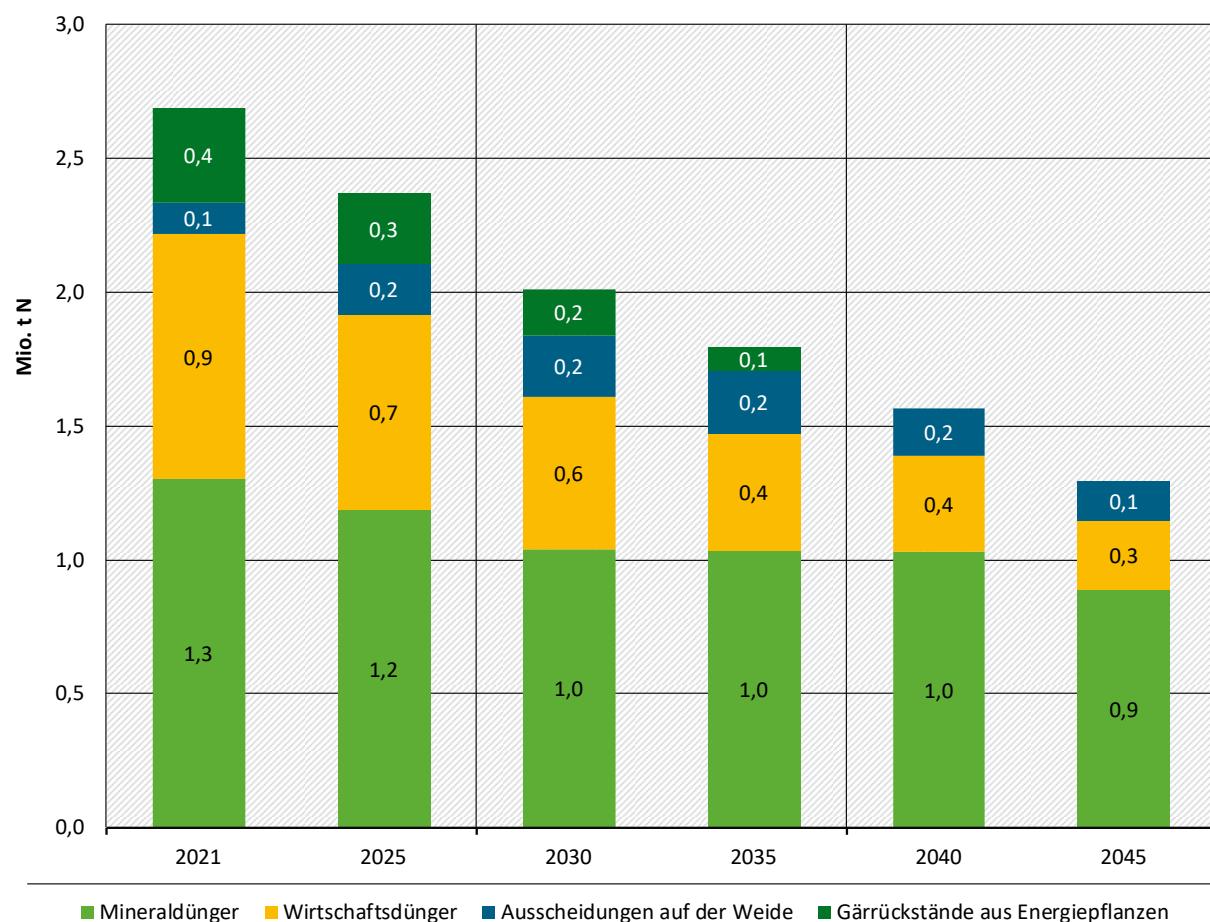
Quelle: Modellergebnisse Öko-Institut, für das Jahr 2020 Selbstversorgungsgrade der BLE (BLE 2022; 2024)

⁶³ D.h. ohne das Grünland in den Moorgebieten

7.1.3.4 Entwicklung der Stickstoffeinsätze

Abbildung 74 zeigt die Entwicklung der Stickstoffausbringung. Der absolute Rückgang der N-Ausbringungsmengen wird zum einen durch erhöhte Anforderungen im Düngerecht ausgelöst. Weiterhin tragen aber auch der Ausbau des Ökolandbaus sowie zunehmende Gehölzstrukturen- und Biodiversitätsflächen zur Verminderung der N-Ausbringungsmengen bei. Dabei steigt die Ausbringungsmenge an N-Mineraldünger im Verhältnis zur gesamten N-Düngung an, weil die Düngung mit Wirtschaftsdüngern mit der Reduktion des Tierbestand rückläufig ist. Dies wird nur zum Teil durch die Vorfruchtwirkung der stickstoffbindenden Leguminosen ausgeglichen, obwohl diese in der Fruchfolge von heute 4 % auf 20 % bis 2045 zunehmen. Der Anteil der Ausscheidungen auf der Weide steigt bis 2045 gegenüber heute um 16 %, während sich der Milchkuh- und Rinderbestand (in Großvieheinheiten) zeitgleich insgesamt um 61 % verringert. Daraus lässt sich ablesen, dass die Weidehaltung an Bedeutung zurückgewinnt. Von den im Stall anfallenden Wirtschaftsdüngern werden bis 2045 70 % vergoren. In dieser Höhe liegt das derzeitige Ausbauziel der Bundesregierung im Bundes-Klimaschutzgesetz, das allerdings bereits bis ins Jahr 2030 erreicht werden soll (BMU 2019). Dieses Ausbauziel bis zum Jahr 2030 wird hier nicht eingehalten, um Fehlinvestitionen zu vermeiden, da das Szenario der Verringerung der Tierhaltung den klaren Vorrang gibt. Die Förderung der Biogasgewinnung aus Energiepflanzen geht stark zurück. Mittelfristig werden diese nur noch als Ko-Substrat für die Vergärung von Wirtschaftsdüngern eingesetzt.

Abbildung 74: Entwicklung der Stickstoffausbringung, CARESupreme, 2021-2045

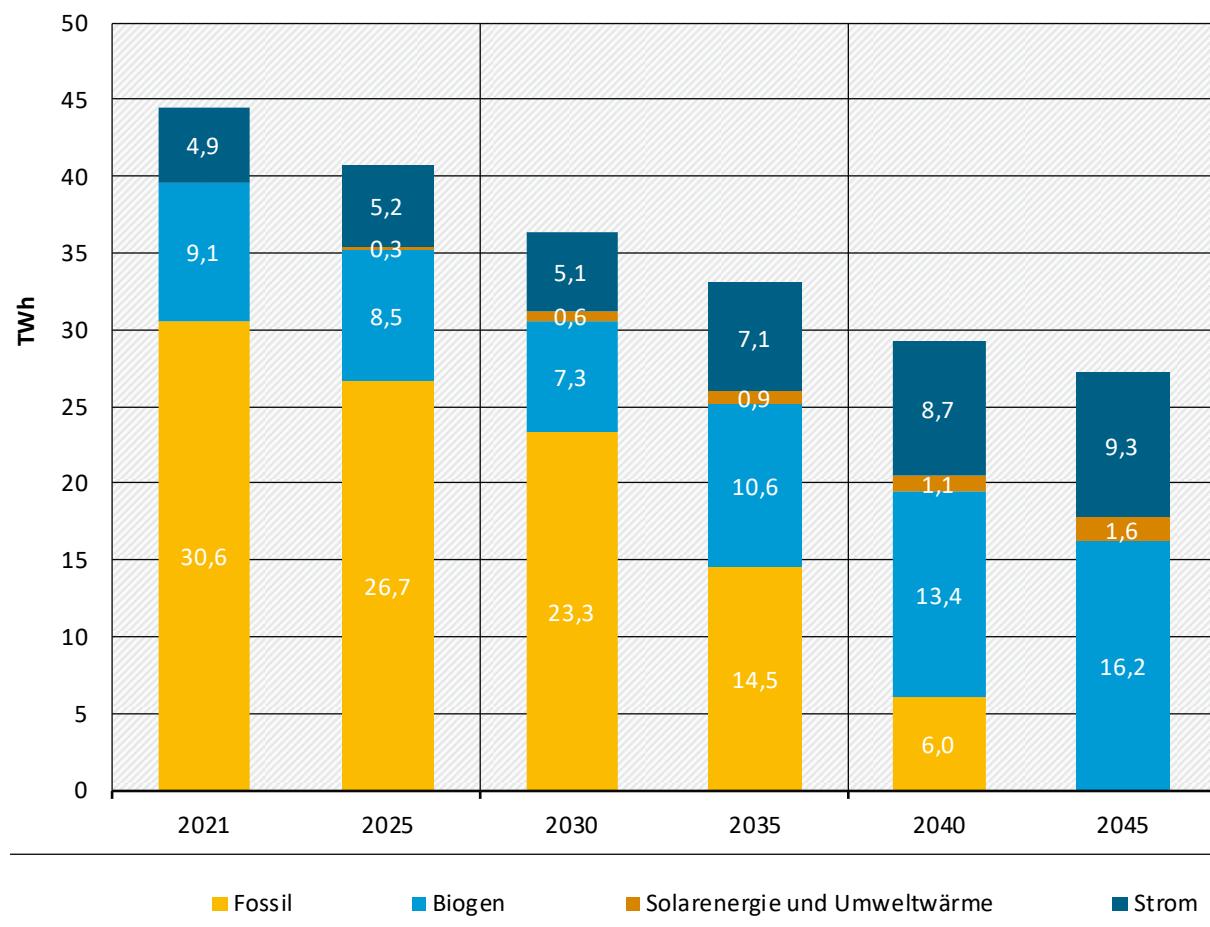


Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

7.1.3.5 Entwicklung des landwirtschaftlichen Energieverbrauchs

Bis zum Jahr 2045 sinkt der Endenergieverbrauch im Landwirtschaftssektor inklusive Strom von 44 TWh im Jahr 2021 auf 27 TWh. Die Ausweitung der Energieeffizienz in allen Bereichen der stationären Anwendungen (Stallheizung, Gewächshäuser, Getreidetrocknung, etc.) aber auch im Bereich der mobilen Nutzung führt zu einem rückläufigen Energiebedarf. Darüber hinaus sinkt der Energiebedarf vor allem durch den starken Rückgang der Tierbestände und die Verringerung der bewirtschafteten Fläche durch Extensivierungsmaßnahmen. Bis zum Jahr 2045 wird die komplette Energieversorgung im Landwirtschaftssektor auf erneuerbare Energien umgestellt.

Abbildung 75: Entwicklung des landwirtschaftlichen Energieverbrauchs in CARESupreme, 2021–2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

7.2 CARETech

7.2.1 Narrativ

Im Gegensatz zu CARESupreme wird in CARETech keine Ernährungsänderung hinterlegt. Die Tierbestände entwickeln sich wie im Referenzszenario⁶⁴ (Projektionsbericht 2024, MMS) (Harthan et al. 2024). Es wird also für Milchkühe, Rinder und Schweine eine moderate Bestandsverringerung angenommen, die bis ins Jahr 2045 in der Größenordnung von 10 % liegt

⁶⁴ Details siehe im Datenanhang zum Projektionsbericht 2024 siehe:
<https://www.umweltbundesamt.de/dokument/datenanhang-kernindikatoren-projektionsbericht-2024>

und bei Geflügel konstant bleibt. Dieser Entwicklungspfad ist unter anderem daher möglich, da nur knapp 35 % der Moorflächen wiedervernässt werden statt über 80 % in CARESupreme. Somit gehen weniger Futterflächen verloren.

Wie im Referenzszenario erfährt der Ökolandbau eine Zunahme auf 15 % bis ins Jahr 2030 und auf 18 % bis 2045. Die Biodiversitätsflächen bleiben etwa auf heutigem Niveau. Die Gehölzstreifenflächen steigen gegenüber heute deutlich auf 400.000 ha an, erreichen aber nicht das Niveau von CARESupreme (ca. 920.000 ha). Stattdessen werden die technischen Minderungsmaßnahmen ausgeweitet. Die Vergärung von Wirtschaftsdünger wird auf 70 % bzw. 80 % des gesamten anfallenden Wirtschaftsdüngers gesteigert, da die Weidehaltung eine geringere Rolle spielt als in CARESupreme. Gleichzeitig werden Zusatzstoffe in CARETech eingesetzt, die aufgrund von Unsicherheiten in Bezug auf ihre Wirkung auf Umwelt, Tierwohl und Gesundheit in CARESupreme nicht eingesetzt wurden. Dazu zählt die Gabe von Futterzusatzstoffen zur Reduktion der CH₄-Emissionen aus der Verdauung und der großflächige Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren zur Reduktion der N₂O-Emissionen aus der Stickstoffdüngung. Zudem wird angenommen, dass über eine Verbesserung in der Züchtung die CH₄-Emissionen aus der Verdauung weiter reduziert werden können.

7.2.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

7.2.2.1 Instrumente zur Steuerung der Lebensmittelnachfrage

Es werden in diesem Szenario keine besonderen Annahmen für die Nachfrageseite getroffen. Der Fokus dieses Szenarios liegt auf der Erzeugungsseite und spiegelt das Produktionsniveau des Referenzszenarios wider (siehe zuvor dargelegte Ausführung zum Narrativ)

7.2.2.2 Instrumente für die Landwirtschaft

Da das Szenario CARETech stärker auf die technischen Minderungsoptionen in der Landwirtschaft ausgerichtet ist, wird vor allem auf diejenigen Maßnahmen des CARESupreme verzichtet, die eine veränderte Produktion zum Ziel haben. Um die Unterschiede zum CARESupreme direkt sichtbar zu machen, sind diese Maßnahmen hier als „gestrichen gegenüber dem CARESupreme“ gekennzeichnet. Maßnahmen, die in das Narrativ beider Szenarien passen und zur Anwendung kommen, werden hier als „beibehalten“ markiert.

Insgesamt sind die bereits in CARESupreme geschilderten Maßnahmen hier nur noch mit ihrem Titel aufgelistet, lediglich zusätzliche Maßnahmen des Szenarios CARETech gegenüber CARESupreme werden näher erläutert.

Zukunftsfähiges Tierhaltungs-Gesetz

- ▶ Gestrichen: die Tierbestände bleiben auf dem Niveau des Referenzszenarios (= MMS des Projektionsberichts 2024)

Reduktion der Stickstoffemissionen

- ▶ Beibehalten mit gleichem Ambitionsgrad: Weiterentwicklung des Ordnungsrechts durch die Vorgaben der Düngeverordnung und der Stoffstrombilanzverordnung: Weiterentwicklung der Stoffstrombilanzverordnung
- ▶ Beibehalten mit gleichem Ambitionsgrad: Die Zahlung von Fördergeldern im Rahmen der GAP kann über die Einführung eines Honorierungsansatzes positiv Einfluss auf die Stickstoffemissionen Einfluss nehmen: Weiterentwicklung der Düngeverordnung

Strukturelle Änderungen in der Landwirtschaft und Extensivierung

- ▶ Gestrichen: Ausbau des Ökolandbaus (Förderung) – Ökolandbau bleibt auf dem Niveau des Referenzszenarios (= MMS des Projektionsberichts 2024)
- ▶ Beibehalten aber abgeschwächt: Förderung von Agroforstsystemen
- ▶ Gestrichen: Förderung von Biodiversitätsflächen – Biodiversitätsflächen bleiben auf dem Niveau des Referenzszenarios (= MMS des Projektionsberichts 2024)
- ▶ Gestrichen: Ausweitung des Leguminosenanbaus infolge erhöhter Nachfrage und Förderung (durch direkte Förderung sowie indirekt durch Förderung des Ökolandbaus) – Flächen bleiben auf dem Niveau des Referenzszenarios (= MMS des Projektionsberichts 2024)
- ▶ Gestrichen: Ausweitung des Gemüseanbaus in Folge erhöhter Nachfrage und durch Förderung (vergl. Instrumente der Nachfrageseite) – Flächen bleiben auf dem Niveau des Referenzszenarios (= MMS des Projektionsberichts 2024)

Reduktion der Emissionen durch technische Maßnahmen

- ▶ Beibehalten und intensiviert: Ausbau der Güllevergärung in der Stallhaltung, Steigerung auf 80 % bei Schweinen und 70 % bei Milchkühen
- ▶ Beibehalten und konstant: Stickstoffreduzierte Fütterung soweit möglich
- ▶ Beibehalten mit gleichem Ambitionsgrad: Flächendeckender Einsatz emissionsarmer Ausbringungstechnologie
- ▶ Neu: Futterzusatzstoffe und Weiterentwicklung von Züchtungen zur Reduktion der CH₄-Emissionen aus der Verdauung
- ▶ Neu: Nitrifikationsinhibitoren zur Reduktion der N₂O-Emissionen bei der Stickstoffdüngerausbringung von Mineral- und Wirtschaftsdüngern
- ▶ Beibehalten mit gleichem Ambitionsgrad: Steigerung der Energieeffizienz und des Einsatzes erneuerbarer Energien bzw. Elektrifizierung (Förderung)
- ▶ Beibehalten mit gleichem Ambitionsgrad: Zunehmende Verwendung alternativer Kraftstoffe bei schweren Landmaschinen, Elektrifizierung bei leichteren (Förderung)

7.2.3 Zentrale Ergebnisse

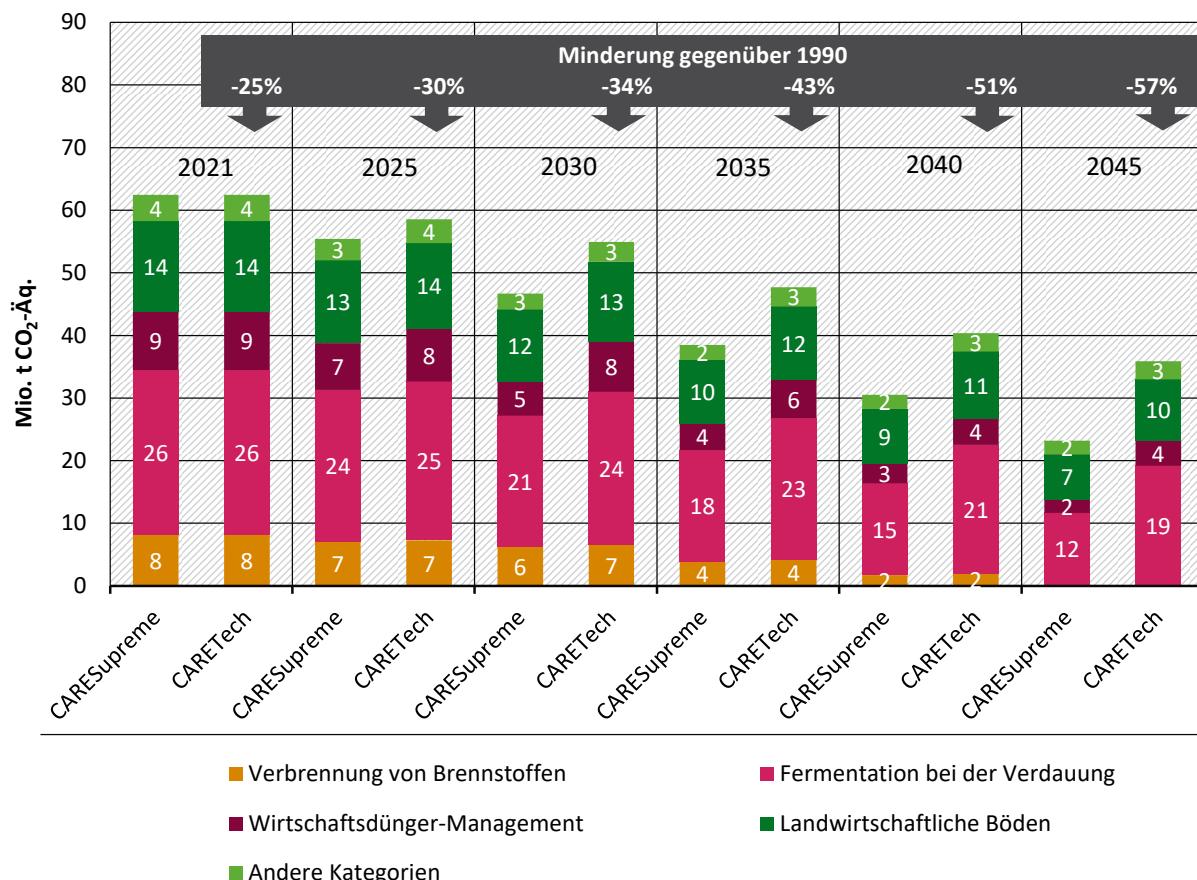
7.2.3.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

In CARETech sinken die Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft von 62,4 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2021 auf 35,8 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045 (Abbildung 76). Das entspricht einem Rückgang von -43 % ggü. 2021. Im Gegensatz dazu können die Emissionen in CARESupreme um -63 % gesenkt werden. Absolut gesehen liegen die Emissionen von CARETech um 12,6 Mio. t CO₂-Äq. über denen von CARESupreme. Der Unterschied ist auf das wesentlich geringere Produktionsniveau von tierischen Produkten in CARESupreme zurückzuführen. Durch den Einsatz zusätzlicher Minderungstechnologien wie Zusatzstoffen im Tierfutter und in Düngemitteln könnten die Treibhausgasemissionen in CARESupreme sogar noch weiter gesenkt werden. Auf Grund von Unsicherheiten wurden diese aber nicht berücksichtigt.

Die Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2030 werden in beiden Szenarien übererfüllt. In CARETech liegen die Emissionen mit 54,9 Mio. t CO₂-Äq. 2 % unterhalb des

Zielwertes von 56 Mio. t CO₂-Äq.. In CARESupreme sinken die Emissionen bis zum Jahr 2030 auf 46,7 Mio. t CO₂-Äq. und liegen damit 17 % unterhalb des Zielwerts.

Abbildung 76: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 32 zeigt eine detaillierte Entwicklung der Emissionen für CARETech. Den stärksten Rückgang verzeichnen die direkten Emissionen aus der Tierhaltung (Verdauung und Düngewirtschaft). Bis zum Jahr 2045 sinken diese Emissionen um 12,5 Mio. t. CO₂-Äq. vor allem durch den Rückgang der Tierbestände sowie durch den Einsatz der technischen Minderungen wie der Wirtschaftsdüngervergärung und der Gabe von Zusatzstoffen. Die Emissionen aus den landwirtschaftlichen Böden sinken um -4,7 Mio. t. CO₂-Äq. bis 2045 vor allem durch den geringeren Düngemitteleinsatz in Folge einer verbesserten Stickstoffeffizienz und des Einsatzes von Nitrifikationsinhibitoren zur Reduktion der N₂O-Emissionen. Gleichzeitig verringert sich die Nachfrage nach Stickstoffdünger durch extensivere Bewirtschaftungsformen wie Ökolandbau, Gehölzstreifen und andere Biodiversitätsflächen. Wie in CARESupreme wird auch in CARETech die komplette Energieversorgung im Landwirtschaftssektor auf erneuerbare Energien umgestellt und entsprechend sinken die Treibhausgasemissionen aus stationärer und mobiler Feuerung.

Tabelle 32: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO2-Äq.						
Stationäre und mobile Feuerung	8,1	7,3	6,5	4,3	1,9	0,1
Fermentation bei der Verdauung	26,3	25,4	24,5	22,5	20,6	19,0
Wirtschaftsdünger-Lagerung ("Düngerwirtschaft")	9,3	8,4	8,0	6,1	4,1	4,1
Landwirtschaftliche Böden	14,5	13,7	12,7	11,7	10,7	9,7
Kalkung	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9
Harnstoffanwendung	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Andere kohlenstoffhaltige Dünger	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Andere (Emissionen aus Biogas-Gärresten)	1,6	1,3	0,7	0,7	0,6	0,6
Gesamt	62,4	58,6	54,9	47,7	40,3	35,8
Minderung gegenüber 1990	-25,0 %	-29,7 %	-34,0 %	-42,7 %	-51,5 %	-56,9 %

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

7.2.3.2 Entwicklung der Flächennutzung

Tabelle 33 zeigt die Entwicklung der Flächennutzung für die extensiven Bewirtschaftungsformen in CARETech. Auch in CARETech verändert sich die Flächennutzung zugunsten von Gehölzstreifen, Brachflächen oder der Wiedervernässung von Moorstandorten. Auch der Anteil des Ökolandbaus steigt weiter an und erreicht bis zum Jahr 2040 einen Anteil von 18 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche (LF). Dies entspricht dem Referenzszenarios, wie im Narrativ erläutert. Im Jahr 2045 sind insgesamt 10 % der LF in Form von wiedervernässten Mooren⁶⁵, Gehölzstrukturen und Brachflächen belegt und tragen damit zur Förderung der Biodiversität bei. Das Ziel der Biodiversitätsstrategie, auf 10 % des Agrarlands hohe Biodiversitätsstandards zu etablieren, wird hier erst im Jahr 2045 erreicht. In CARESupreme beträgt der Flächenanteil mit einer hohen Biodiversitätswirkung dagegen 20 % der LF.

Tabelle 33: Entwicklung der Flächennutzung im CARETech, 2020-2045

	2020	2030	2040	2045
Mio. ha				
Landwirtschaftliche Nutzfläche	16,6	16,5	16,4	16,4
Ökolandbau	1,6	2,7	2,9	2,9
Gehölzstreifen	0,01	0,15	0,3	0,4

⁶⁵ Es ist noch unklar, ob zukünftig nur die Paludikulturen zur landwirtschaftlichen Nutzfläche gezählt werden und die übrige Wiedervernässungsfläche aus dieser herausfällt. Um die Veränderungen einfacher als Prozententwicklungen erläutern zu können, werden die Moorböden, die heute unter landwirtschaftlicher Nutzung sind in dieser Studie auch weiterhin der landwirtschaftlichen Nutzfläche hinzugezählt.

	2020	2030	2040	2045
Wiedervernässte Moore	0	0,2	0,4	0,5
Brachfläche etc.	0,35	0,7	0,7	0,7

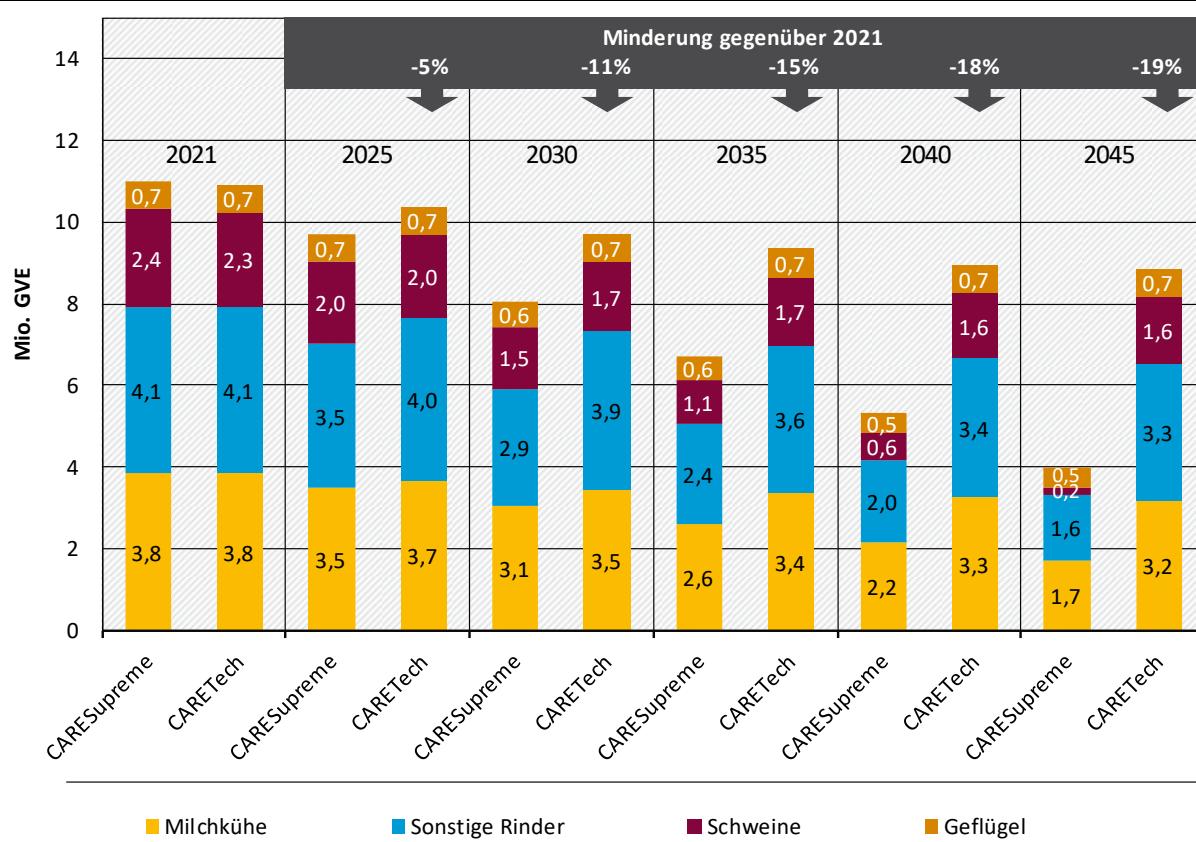
Quelle: (destatis 2021), Modellrechnungen Öko-Institut

7.2.3.3 Entwicklung der Nutztierbestände und der Produktion tierischer Produkte

Die Tierbestände sinken in CARETech moderat (ebenfalls analog zum Referenzszenario): Bis zum Jahr 2045 sinken die Nutztierbestände (gemessen in Großvieheinheiten (GVE)) um -19 % ggü. 2021. Der Großteil der Tierbestandsreduktion erfolgt ungesteuert und wird durch eine Reihe unterschiedlicher Faktoren wie Marktentwicklungen, fehlende Hofnachfolge, steigende Umweltanforderungen, Entwicklungen auf dem Weltmarkt und Klimawandel ausgelöst. Ein weiterer Teil der Abstockungen erfolgt gezielt durch die Reduktion der Tierbestände auf wiedervernässten Moorstandorten in Abhängigkeit von den Annahmen im LULUCF-Sektor. In CARETech sinken vor allem die Schweinebestände um knapp 30 % und die Bestände der sonstigen Rinder um 19 % ggü. 2021, während die Geflügelbestände auf dem heutigen Niveau verbleiben und die Milchkuhbestände sich um 16 % verringern.

Damit unterscheidet sich CARETech deutlich von CARESupreme Szenario. In CARESupreme sinken die Tierbestände durch die Ernährungsveränderung im Sinne der Planetary Health Diet um -64 % ggü. 2021. Vor allem die Schweinebestände verringern sich drastisch um -92 %, während die Milchkuhbestände einen Rückgang von -55 % verzeichnen und auch die Geflügelbestände um ca. ein Drittel zurückgehen.

Abbildung 77: Entwicklung der Tierbestände Landwirtschaft, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Der mit dem Rückgang der Tierbestände verbundene Produktionsrückgang in CARETech fällt für die Milch aufgrund der Milchleistungssteigerung relativ moderat aus. Bis 2045 sinkt die Milchproduktion um -14 % ggü. 2020. Die Fleischproduktion sinkt um -25 % (Tabelle 34). Das ist deutlich weniger als in CARESupreme. Dort sinkt die Produktion wesentlich stärker. Die Milchproduktion wird um -60 % verringert und die Fleischproduktion sinkt um -73 % ggü. 2020.

Tabelle 34: Entwicklung der Produktion tierischer Produkte in Deutschland in CARETech, 2020-2045

Produkt	Einheit	2020	2030	2045
Milch	Mio. t Milchäquivalent	31,96	29,8	27,4
Rindfleisch*	Mio. t Schlachtgewicht	1,1	1,0	0,9
Schweinefleisch*	Mio. t Schlachtgewicht	4,7	3,3	3,2
Geflügel*	Mio. t Schlachtgewicht	1,7	1,7	1,6

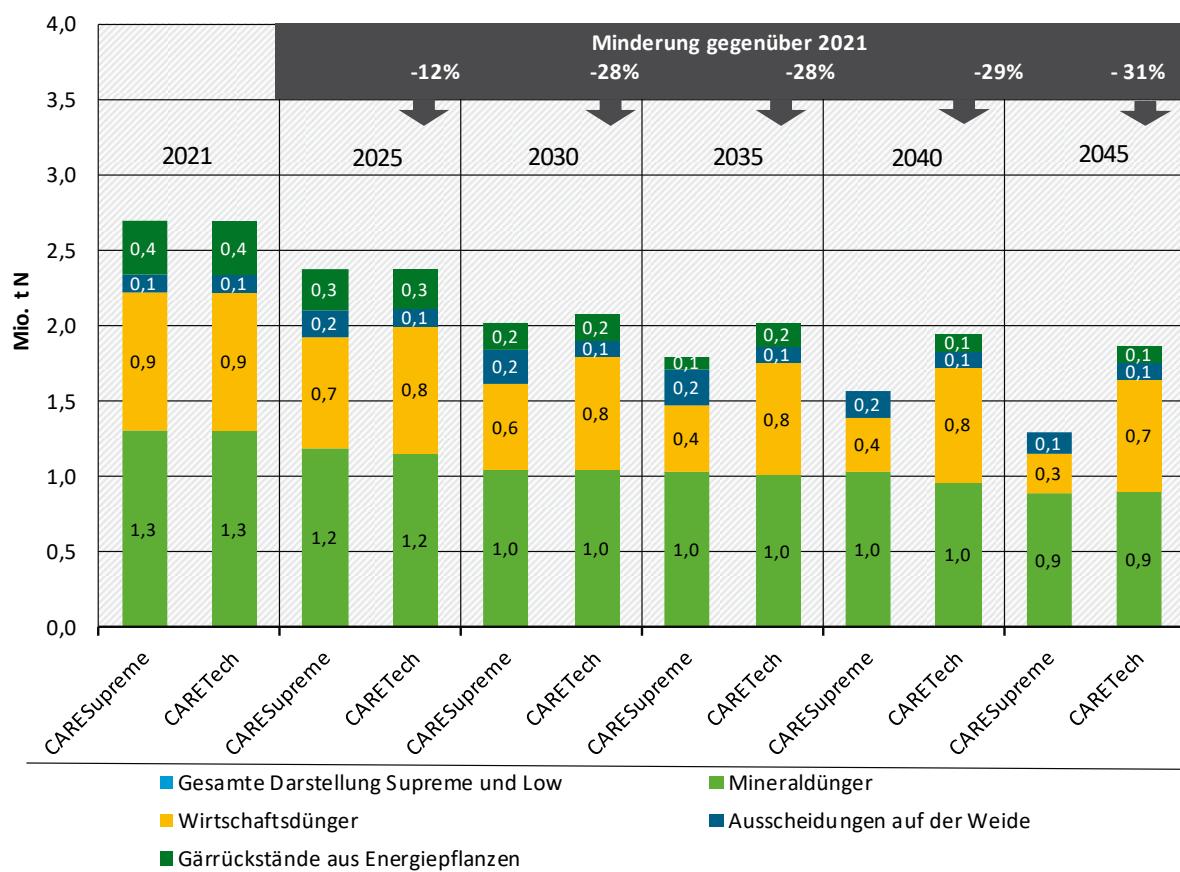
Quelle: Modellergebnisse Öko-Institut, Abgleich für das Jahr 2020 mit Selbstversorgungsgraden der BLE (BLE 2022; 2024)

7.2.3.4 Entwicklung der Stickstoffeinsätze

In CARETech sinken die Stickstoffeinsätze bis zum Jahr 2045 um -32 % ggü. 2021. Gründe für den Rückgang sind die Verbesserung der Stickstoffeffizienz, die Reduktion der Tierbestände und des Gärresteinsatzes aus Energiepflanzen sowie aufgrund von Extensivierungsmaßnahmen wie die Ausweitung des Ökolandbaus, der Brachflächen, der Gehölzstrukturen und der Wiedervernässung von Moorstandorten. Bis 2030 können die Stickstoffeinsätze um -28 % reduziert werden.

Eine stärkere Minderung des Stickstoffbedarfs ist in CARESupreme zu beobachten. Der Mineraldüngerbedarf bewegt sich auf dem gleichen Niveau wie in CARETech. Allerdings führt der starke Rückgang der Tierbestände zur Verringerung des Wirtschaftsdüngereinsatzes. Durch den geringen Bedarf an Anbauflächen für Futtermittel kann in CARESupreme die ungedüngte Fläche vergrößert werden, wodurch der eine Halbierung des Stickstoffeinsatzes erreicht wird.

Abbildung 78: Entwicklung der Stickstoffeinsätze, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



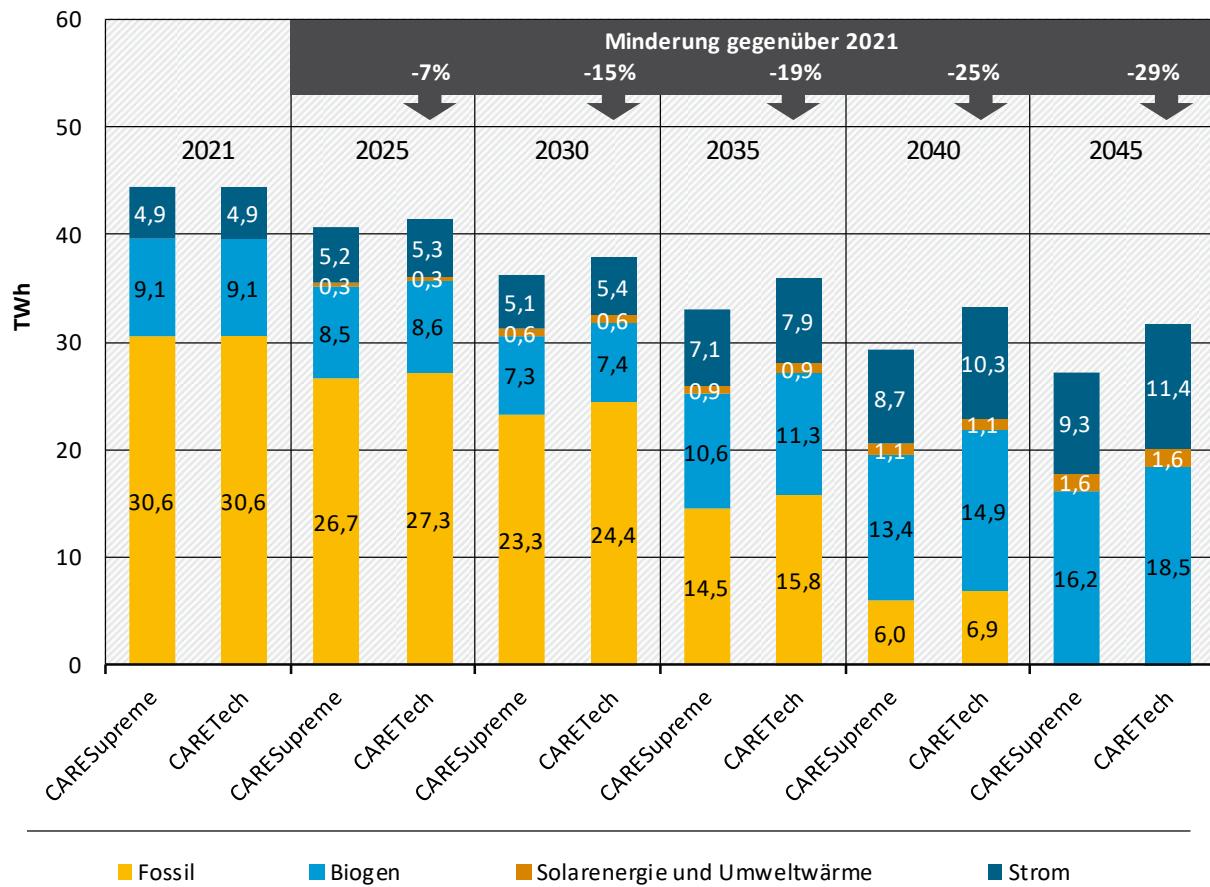
Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

7.2.3.5 Entwicklung des landwirtschaftlichen Energieverbrauchs

Im CARETech sinkt der Energieverbrauch bis zum Jahr 2045 um 29 % ggü. 2021. Gleichzeitig findet ein Brennstoffwechsel auf erneuerbare Energien statt, sodass der Energieverbrauch der Landwirtschaft bis zum Jahr 2045 dekarbonisiert wird (Abbildung 79). Die Reduktion des Energieverbrauchs erfolgt durch die Ausweitung der Energieeffizienz, aber auch durch eine Verringerung des Bedarfs, z. B. weniger Stallheizungen und Milchkühlung durch Verringerung der Tierbestände und die Ausweitung von Biodiversitätsflächen, was weniger Einsatz von Landmaschinen erfordert.

Demgegenüber kann der Energieverbrauch in CARESupreme bis zum Jahr 2045 um knapp 40 % ggü. 2021 gesenkt werden. Dort wirken die gleichen Faktoren, nur ausgeprägter.

Abbildung 79: Entwicklung des Energieverbrauchs in der Landwirtschaft, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

8 Abfallwirtschaft und Sonstiges

8.1 CARESupreme

8.1.1 Narrativ

Im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges werden entsprechend der Systematik des Nationalen Treibhausgasinventars nur die nicht energiebedingten Treibhausgasemissionen der Abfallwirtschaft adressiert (CRF-Kategorie 5)⁶⁶. Dazu zählen die Methanemissionen aus der Ablagerung von Abfällen (insbesondere auf sog. Altdeponien), Methan- und Lachgasemissionen aus der biologischen Abfallbehandlung, sowie aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen. Zudem werden Methan- und Lachgasemissionen aus der Abwasserbehandlung berücksichtigt. Emissionen aus der Stromerzeugung durch Müllverbrennung werden der Energiewirtschaft bzw. der Industrie zugerechnet und dort bilanziert, Maßnahmen mit Bezug auf Recycling von nicht-organischen Stoffen werden im Sektor Industrie bilanziert.

Einige Aktivitäten im Abfallbereich, wie der Betrieb von Müllverbrennungsanlagen oder Recyclingmaßnahmen führen i.d.R. zu Emissionen oder Einsparungen in anderen Sektoren. Emissions-reduktionen durch die Steigerung des Recycling-Anteils beispielsweise wirken sich nicht auf die Treibhausgasemissionen im Sektor Abfall (CRF-Kategorie 5) aus, sondern in den Sektoren Energie und Industrie, wenn z. B. aufgrund zunehmender Anteile beim Recycling weniger dieser Abfälle verbrannt werden. Maßnahmen wie das Verpackungsgesetz oder auch die Gewerbeabfallverordnung werden daher nicht im Bereich der Abfallwirtschaft (CRF-Kategorie 5) analysiert, sondern werden in den Sektoren Energie und Industrie mitbilanziert.

8.1.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

► Deponieverordnung und Kreislaufwirtschaftsgesetz:

- Durch Umsetzung der Deponieverordnung und der EU-Abfallrahmenrichtlinie wird dem Recycling eine höhere Bedeutung als der energetischen Verwertung beigemessen. Dies führt zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen in anderen Sektoren wie dem Industrie- und im Energiesektor.
- Bioabfälle werden schrittweise stärker getrennt gesammelt und verwertet. Der Anteil der Vergärung der Bioabfälle steigt bis zum Jahr 2040 schrittweise auf 70 %, während der Anteil der Kompostierung entsprechend sinkt.
- Durch die stärkere Getrenntsammlung aller Abfallfraktionen sinkt der Anteil der Verwertung in der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA).

► Ausweitung der Deponiebelüftung und Optimierung der Gaserfassung: Schrittweise Ausweitung der Belüftung von geeigneten Deponien bis zum Erreichen der maximalen Anzahl.

► Vermeidung von Lebensmittelabfällen: Erreichung des Ziels der Nationalen Strategie zur Reduktion der Lebensmittelabfälle um 50 % bis zum Jahr 2030.

⁶⁶ Der Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges umfasst im Bundes-Klimaschutzgesetz neben der Quellgruppe CRF 5 auch CRF 6 (Sonstige). Aktuell werden in Deutschland jedoch keine Emissionen in der CRF-Kategorie 6 berichtet.

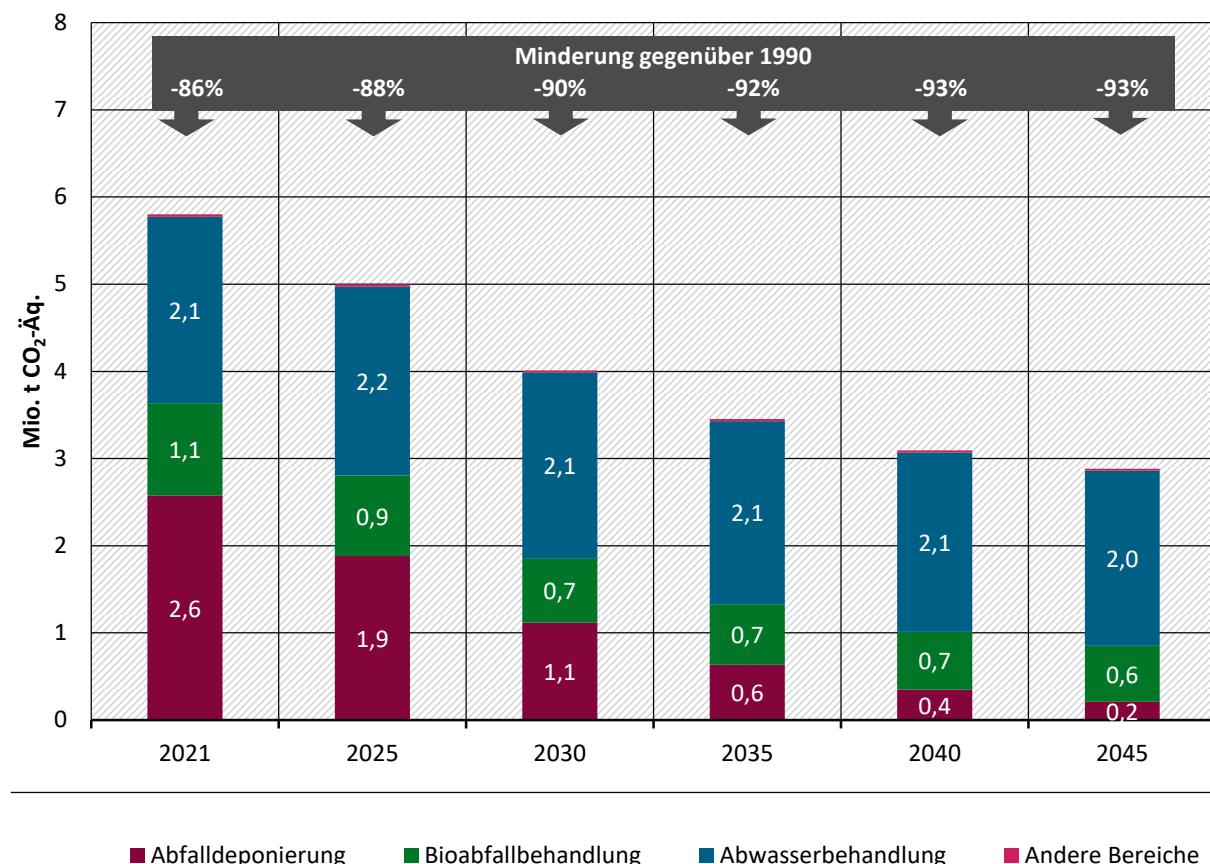
- **Reduktion der Proteingehalte im Abwasser:** Konsum tierischer Produkte entsprechend den Empfehlungen der Planetary Health Diet der EAT Lancet Kommission (The EAT-Lancet Commission on Food, Planet, Health 2019). Dabei sinkt die Proteinaufnahme um 20 % gegenüber heute, was zu einer Reduktion der Proteingehalte im Abwasser und damit zu einer Reduktion der Lachgasemissionen führt.

Eine detaillierte Beschreibung sowie deren Parametrisierung aller berücksichtigten Instrumente kann Anhang A entnommen werden.

8.1.3 Zentrale Ergebnisse

Abbildung 80 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft im Szenario CARESupreme für die Jahre 2025 bis 2045 im Vergleich zum Basisjahr 2021. Die Emissionen sinken bis zum Jahr 2045 um 50 % gegenüber 2021, was einer Minderung um 93 % gegenüber 1990 entspricht.

Abbildung 80: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, CARESupreme, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Haupttreiber der Emissionsreduktion im Abfallsektor ist die Verringerung der Methanemissionen aus der Deponierung. Das Ablagerungsverbot von unbehandelten organischen Abfällen seit 2005 wird durch die Ausweitung der Deponiebelüftung und eine optimierte Gaserfassung ergänzt. Dies führt insgesamt zu einer Verringerung der Emissionen dieses Teilbereiches um fast 92 % gegenüber dem Jahr 2021 und um ca. 99 % gegenüber 1990.

Ergänzend ist die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 35: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, CARESupreme, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Abfalldeponierung	2,6	1,9	1,1	0,6	0,4	0,2
Bioabfallbehandlung	1,1	0,9	0,7	0,7	0,7	0,6
Abwasserbehandlung	2,1	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0
Andere Bereiche	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt	5,8	5,0	4,0	3,5	3,1	2,9
Minderung gegenüber 1990	-86,0 %	-88,0 %	-90,3 %	-91,7 %	-92,6 %	-93,1 %

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

Die Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung werden durch die Bevölkerungsentwicklung, die Ausweitung der separaten Bioabfallsammlung, der Reduktion der Lebensmittelabfälle und den Wechsel von der Kompostierung zur Abfallvergärung beeinflusst. Während die Ausweitung der separaten Bioabfallsammlung zu einer Erhöhung der Emissionen führt, wirken die anderen Faktoren emissionsmindernd, so dass die Emissionen bis zum Jahr 2045 um 39 % gegenüber 2021 absinken.

Durch hohe Anschlussraten an die öffentliche Kanalisation und effiziente Kläranlagen wurden im Bereich der Abwasserbehandlung wesentliche Minderungspotenziale bereits seit 1990 erschlossen, so dass hier nur noch kleine Reduktionen möglich sind. Gemeinsam mit der Reduktion der Proteingehalte im Abwasser durch einen geringeren Konsum tierischer Produkte führt dies dazu, dass sich die Emissionen im Teilbereich Abwasserbehandlung bis zum Jahr 2045 um ca. 6 % gegenüber 2021 reduzieren.

Insgesamt wird somit im Jahr 2045 eine Minderung der Treibhausgasemissionen von ca. 93 % gegenüber 1990 erreicht. Es ist jedoch nicht möglich, die Emissionen des Abfallsektors komplett zu eliminieren, da einerseits natürliche Prozesse mit einer langen Wirkdauer eine große Rolle in der Erstehung der Emissionen spielen und es andererseits nicht möglich ist, alle verbleibenden Emissionen durch technische Lösungen auf null zu vermindern.

8.2 CARETech

8.2.1 Narrativ

Wie in Kapitel 1 beschrieben, werden im Szenarien CARETech Instrumente in Bezug auf Effizienz und Suffizienz auf das Niveau des Projektionsberichts 2024 (Harthan et al. 2024) abgesenkt. Da im Sektor Abfallwirtschaft nur die nicht-energiebedingten Emissionen betrachtet werden, sind keine Instrumente in Bezug auf Effizienz in diesem Sektor enthalten. Im Bereich Suffizienz wird davon ausgegangen, dass die Lebensmittelverschwendungen weniger stark reduziert werden als im Szenario CARESupreme. Darüber hinaus hat die Modellierung der Ernährung im Bereich Landwirtschaft (siehe auch Abschnitt 7.2.1) eine Auswirkung auf die Proteingehalte im Abwasser und damit auf die Emissionsentwicklung des Teilsektors Abwasserbehandlung. Die konkrete Implementierung dieser beiden Aspekte wird im folgenden Abschnitt erläutert.

8.2.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

Die Instrumente im Sektor Abfallwirtschaft entsprechen im Szenario CARETech weitestgehend denen des CARESupreme-Szenarios. Diese werden im Abschnitt 8.1.2 beschrieben.

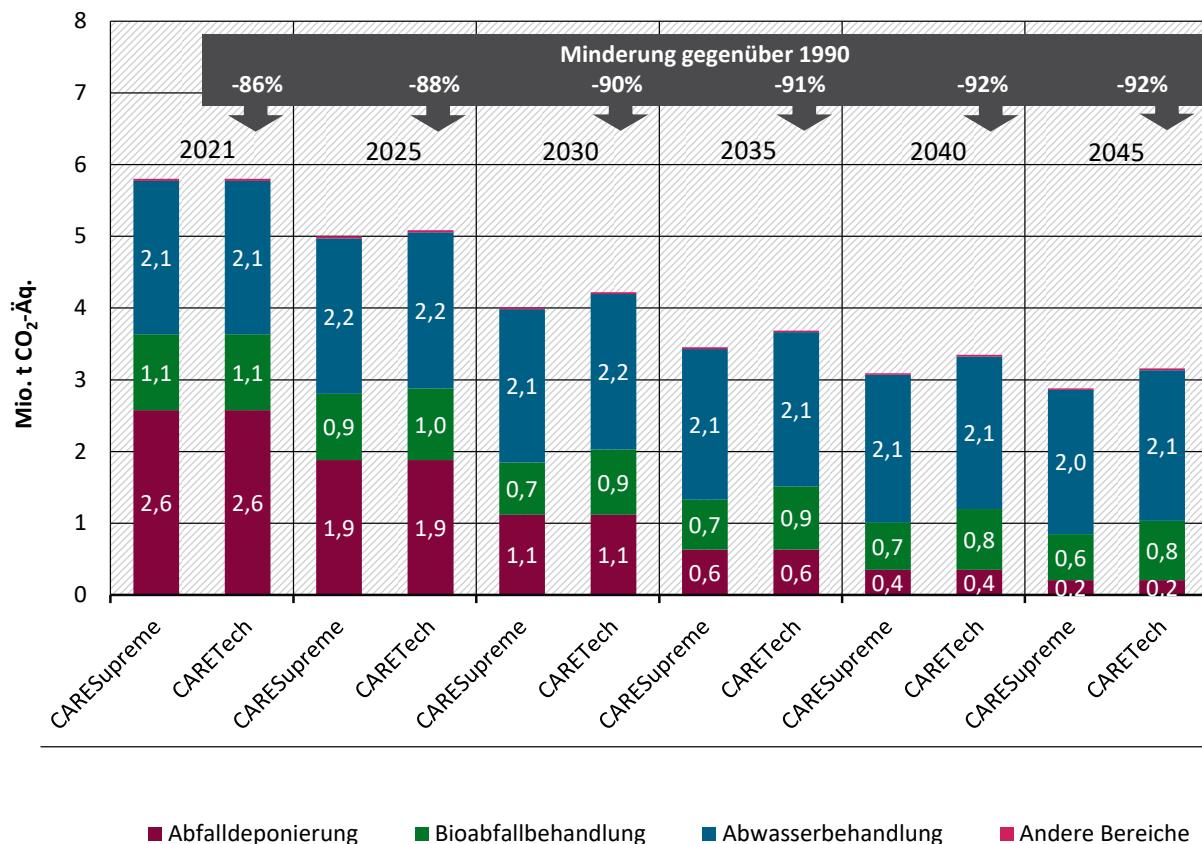
Abweichend dazu wird für die **Reduzierung der Lebensmittelverschwendungen** angenommen, dass wie im MMS⁶⁷ des Projektionsberichts 2024 (Harthan et al. 2024) bis zum Jahr 2030 nur eine Minderung von 20 % gegenüber heute erreicht werden kann.

Im Szenario CARETech erfolgt keine Umstellung der Ernährung auf die Planetary Health Diet und somit auch keine größere Reduktion des Konsums tierischer Produkte (siehe auch Abschnitt 7.2.2). Dementsprechend wird der **Proteingehalt im Abwasser** analog zum Projektionsbericht 2024 (Harthan et al. 2024) als gleichbleibend angenommen.

8.2.3 Zentrale Ergebnisse

Abbildung 81 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen für den Zeitraum 2021 bis 2045 im Vergleich der beiden Szenarien. Da es nur geringe Unterschiede in den zugrunde gelegten Instrumenten zwischen CARETech und CARESupreme gibt, sind auch die sich ergebenden Emissionen im Abfallsektor vergleichbar.

Abbildung 81: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

⁶⁷Für den Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges wurde in für den Projektionsbericht 2024 nur ein Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) gerechnet. Daher wird hier abweichend zu den anderen Sektoren das MMS als Basis für die Instrumentierung von CARELow zugrunde gelegt.

Während im Szenario CARESupreme gut 93 % Minderung im Jahr 2045 gegenüber 1990 erreicht werden, sind es im Szenario CARETech 92 %. Die geringere Reduktion der Lebensmittelabfälle führt zu höheren Mengen an Bioabfällen und damit zu 0,2 Mio t CO₂-Äq. höheren Emissionen im Bereich Bioabfallbehandlung in CARETech gegenüber CARESupreme. Der höhere Anteil an Proteinen im Abwasser durch den Konsum tierischer Produkte führt zu 0,1 Mio t CO₂-Äq. Mehremissionen im Jahr 2045 in CARETech gegenüber CARESupreme. Tabelle 36 zeigt die Entwicklung der Emissionen im Sektor Abfallwirtschaft im Szenario CARETech für alle Teilsektoren über die Zeit.

Tabelle 36: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges, CARETech, in ausgewählten Jahren zwischen 2021 und 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Abfalldeponierung	2,6	1,9	1,1	0,6	0,4	0,2
Bioabfallbehandlung	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8
Abwasserbehandlung	2,1	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1
Andere Bereiche	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt	5,8	5,1	4,2	3,7	3,3	3,2
Minderung gegenüber 1990	-86,0%	-87,8 %	-89,8 %	-91,1 %	-91,9 %	-92,4 %

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut

9 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

9.1 CARESupreme

9.1.1 Narrativ

Der Sektor LULUCF umfasst Kohlenstoffsenken und Treibhausgasemissionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderungen sowie aus der Forstwirtschaft einschließlich Holzprodukten. Anders als in anderen Sektoren kann es sowohl zur Freisetzung von Treibhausgasen (Quellen) als auch zur Festlegung von CO₂ (Senken) kommen. Im Szenario CARESupreme werden bestehende Quellen stark verringert und mögliche Senken stark ausgebaut. Als Quellen sind insbesondere Emissionen aus der trockenen Nutzung von organischen Böden in der Landwirtschaft zu nennen. Hier werden durch eine ambitionierte Wiedervernässung die Treibhausgasemissionen stark verringert. Hinzu kommen die Einstellung des Torfabbaus, die Optimierung der Wasserstände in bestehenden Feuchtgebieten und der Erhalt von Dauergrünland auf mineralischen Böden. Als größte Senke sind die Waldfächen zu nennen. Hier wird durch eine Verringerung des Holzeinschlags bzw. durch Nutzungsaufgabe vor allem von Laubbaumbeständen der Holzvorrat der Waldfächen erhöht und damit eine Senkenleistung erzeugt. Dies berücksichtigt insbesondere Anforderungen an die Umsetzung der EU-Verordnung zur Wiederherstellung der Natur (EU Nature Restoration Law) in nationales Recht. Parallel wird verstärkt Holz in langlebigen Produkten und gleichzeitig weniger Holz energetisch genutzt. Dies betrifft auch Holz aus Rest- und Abfallstoffen. So wird der Holzproduktspeicher kontinuierlich erhöht. Weitere Senken werden durch die Anlage von Gehölzstrukturen als Agroforstelemente (kurz: Agroforst)⁶⁸ und die Umstellung auf ökologischen Landbau erreicht. Hinzu kommt, dass ein genereller Nutzungsdruck auf Flächen dadurch verringert wird, dass die Netto-Flächenneuinanspruchnahme für Siedlungen deutlich abnimmt und im Jahr 2050 null erreicht. Für die Waldentwicklung und die Wiedervernässung von organischen Böden werden Risikoabschätzungen berücksichtigt, beim Wald mögliche natürliche Störungen und bei der Wiedervernässung Wassermangel.

9.1.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

Die im LULUCF-Sektor herangezogenen Instrumente können danach gruppiert werden, ob sie zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen aus einer Quelle führen (Abschnitt 9.1.2.1) oder ob sie die Einspeicherung in Senken erreichen (Abschnitt 9.1.2.2).

9.1.2.1 Instrumente zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen (Quellen)

- ▶ Der Moorböden Schutz auf drainierten landwirtschaftlich genutzten Moorböden⁶⁹ in erster Linie durch die Wiedervernässung der Flächen. Bis zum Jahr 2045 sind 82,5 % der Moorböden wiedervernässt. Die Vernässungsintensität je Fläche steigt kontinuierlich an, und der Anteil an vollständig vernässten Flächen beträgt im Jahr 2045 80 % der wiedervernässten Flächen. Ackerflächen, auf denen eine Vernässung nicht möglich ist, werden zu Grünland umgenutzt.

⁶⁸ Holzige Dauerkulturen als Teil von Agroforst-Systemen, Hecken und Kurzumtriebsplantagen. Der Anteil an Gehölzstrukturen kann zwischen Agroforst-Systemen stark variieren. In der vorliegenden Modellierung wird daher das „Agroforstelement Gehölze“ (kurz: Agroforst) separat modelliert. Angaben zu Fläche und Emissionen für Agroforst beziehen sich auf diese Gehölzstrukturen. Acker- und Grünlandflächen, die Agroforstsystmen zuzuordnen sind, verbleiben in den Flächenkategorien Ackerland und Grünland.

⁶⁹ Synonym verwendet zu „organische Böden“. Sie umfassen Moorböden, Moorfolgeböden und Anmoore.

- ▶ Mit der Optimierung des Wassermanagements bestehender Feuchtgebiete (Moorbodenschutz) wird sichergestellt, dass diese Flächen nicht trockenfallen. Die Optimierung ist im Jahr 2030 zu 80 % und im Jahr 2045 zu 100 % abgeschlossen.
- ▶ Der Torfabbau als Rohstoff für Kultursubstrate im gewerblichen Pflanzenbau und im Hobbybereich wird bis zum Jahr 2040 eingestellt (Moorbodenschutz). Dies erfolgt dadurch, dass bestehende Abbaukonzessionen auslaufen und keine neuen vergeben werden.
- ▶ Die Torfnutzung wird bis zum Jahr 2040 vollständig eingestellt und auf die Nutzung von Torfersatzstoffen umgestellt, um Torfimporte zu verringern (Moorbodenschutz).
- ▶ Im Rahmen der Greening-Auflagen der GAP bis zum Jahr 2028 wird Dauergrünland auf mineralischen Böden erhalten. Dies wird bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben.
- ▶ Die Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke (Netto-Flächenverbrauch) wird bis 2030 auf 20 Hektar pro Tag, bis 2045 auf 4,2 Hektar pro Tag und bis 2050 auf null Hektar pro Tag reduziert.⁷⁰ Ein wichtiger Umsetzungsansatz ist die Zuweisung von Flächenkontingenten an Kommunen und – wenn Kommunen ihre Flächenkontingente nicht ausschöpfen – der Handel mit Flächenzertifikaten.

9.1.2.2 Instrumente zur Förderung der CO₂-Einbindung (Senken)

- ▶ Die Waldbewirtschaftung wird verstärkt an Klimaschutzzielen ausgerichtet. Dazu werden labile Bestände hin zu ökologisch stabilen, klimaresilienten Beständen umgebaut, Schad- und Mortalitätsholz wird zu hohen Anteilen einer Nutzung zugeführt, und es erfolgt ein Vorratsaufbau in bestehenden, ökologisch stabilen Beständen durch die Verringerung der Holzentnahme bzw. durch Nutzungsaufgabe. Als Synergie zur Senkenleistung werden so die Anforderungen aus der EU-Verordnung zur Wiederherstellung der Natur (EU Nature Restoration Law) unterstützt.
- ▶ Im Sinne des Kaskadenprinzips wird die Nutzung von Holz als langlebige Holzprodukte gesteigert und gleichzeitige die energetische Holznutzung verringert.⁷¹
- ▶ Auf landwirtschaftlichen Flächen wird durch Anlage von Agroforst⁶⁸ anstelle von einjährigen Kulturen und durch Umstellung der Ackernutzung von konventionellem Landbau auf ökologischen Landbau Humus aufgebaut.⁷²

Eine detaillierte Beschreibung sowie die Parametrisierung aller berücksichtigten Instrumente kann Anhang A entnommen werden.

9.1.3 Zentrale Ergebnisse

Im LULUCF-Sektor wird eine Emissionsbilanz für die Landfläche erstellt. Im Jahr 2021 war der LULUCF-Sektor mit einer Nettobilanz von 2,5 Mio. t CO₂-Äq. eine Quelle (Abbildung 82). Mit den in Abschnitt 9.1.2 beschriebenen Instrumenten wird im Szenario CARESupreme mit -23,3 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 und -55,9 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045 eine deutliche Verbesserung im LULUCF-Sektor erreicht (Abbildung 82).

⁷⁰ Der modellierte Zubau an PV-Freiflächenanlagen wird nicht auf diese Quote angerechnet, da angenommen wird, dass die Anlage von PV-Freiflächenanlagen so ausgestaltet werden, dass unter den PV-Modulen Grünland-ähnlicher Bewuchs und Pflege vorliegen. So sind die ökologischen Verhältnisse vergleichbarer zu Grünland als zu Siedlungsflächen.

⁷¹ Berücksichtigt wird Waldholz (Erstnutzung) und Holz aus Rest- und Abfallströmen.

⁷² Aufgrund hoher Unsicherheit wird die Kohlenstoffeinbindung auf neuen ökologischen Anbauflächen nicht in die Treibhausgasbilanz des LULUCF-Sektors aufgenommen.

Zu diesem Ergebnis trägt vor allem der Moorbödenenschutz bei, der sich aus mehreren Entwicklungen zusammensetzt:

- ▶ Ackerland und Grünland auf organischen Böden werden bis zum Jahr 2045 zu 82,5 %⁷³ vernässt und gehen in die Quellgruppe Feuchtgebiete⁷⁴ über. Dies ist der vorrangige Grund für die starke Abnahme der Treibhausgasemissionen beim Acker- und Grünland (siehe Flächenentwicklung in Abbildung 83). Aus Sicht der Treibhausgasemissionen liegt der optimale Wasserstand bei -5 cm unter Flur. Um mögliche Wasserknappheit zu berücksichtigen, wird im Jahr 2045 für 30 % der wiedervernässsten Flächen ein Wasserstand zwischen -10 bis -20 cm angenommen.
- ▶ Ackerland, das aufgrund der räumlichen Gegebenheit nicht vernässt werden kann (z. B. Siedlungsnähe), wird in Grünland umgewandelt und es verbleiben Emissionen aus dem trocken genutzten, nicht vernässbaren Grünland auf organischen Böden.
- ▶ Auf mineralischen Böden wird der Grünlandanteil in der Nettobilanz erhalten. Wird Ackerland zu Grünland umgebrochen, fallen Emissionen an. In gleichem Umfang wird Ackerland zu Grünland und CO₂ wird in neu angelegtem Grünland eingebunden.
- ▶ Der Torfabbau wird bis zum Jahr 2040 komplett eingestellt und die ehemaligen Abbauflächen werden wiedervernässt. Die Treibhausgasminderung beträgt -2,1 Mio.t CO₂-Äq. Torfersatzstoffe stammen z.T. auch aus dem Torfmoosanbau auf vernässten Flächen (Paludikultur).
- ▶ In bestehenden Feuchtgebieten ohne Wiedervernässung wird durch die Optimierung der Wasserstände eine weitere Treibhausgasminderung von -2,5 Mio. t CO₂-Äq. bis zum Jahr 2045 erreicht.
- ▶ Bis zum Jahr 2045 steigt die Flächenkulisse der Feuchtgebiete von 0,7 Mio. ha auf 1,8 Mio. ha an. Parallel nimmt die Acker- und Grünlandfläche ab. Dies liegt vor allem an der Wiedervernässung von gut 1 Mio. ha Acker- und Grünland. Wiedervernässste Flächen weisen je nach Wasserstand noch Emissionen von ca. 5 bis 28 t CO₂-Äq. je ha auf, die in der Modellierung weiter ausgewiesen werden (z. B. Hennenberg und Böttcher (2023)). Die Einstellung des Torfabbaus und der Optimierung von Wasserständen in Feuchtgebieten führt zu einer Treibhausgasminderung, parallel werden aber Emissionen auf wiedervernässsten Flächen unter der Kategorie Feuchtgebiete berücksichtigt, so dass die Emissionen der Feuchtgebiete in Summe von 9,9 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2021 auf 16,1 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045 ansteigen.

Neben den bereits genannten Emissionen aus Feuchtgebiete treten im Jahr 2045 noch Emissionen aus Siedlungsflächen⁷⁵ auf, die durch die Maßnahmen zur Reduktion des Flächenverbrauchs ab dem Jahr 2035 aber nicht weiter ansteigen (Abbildung 82).

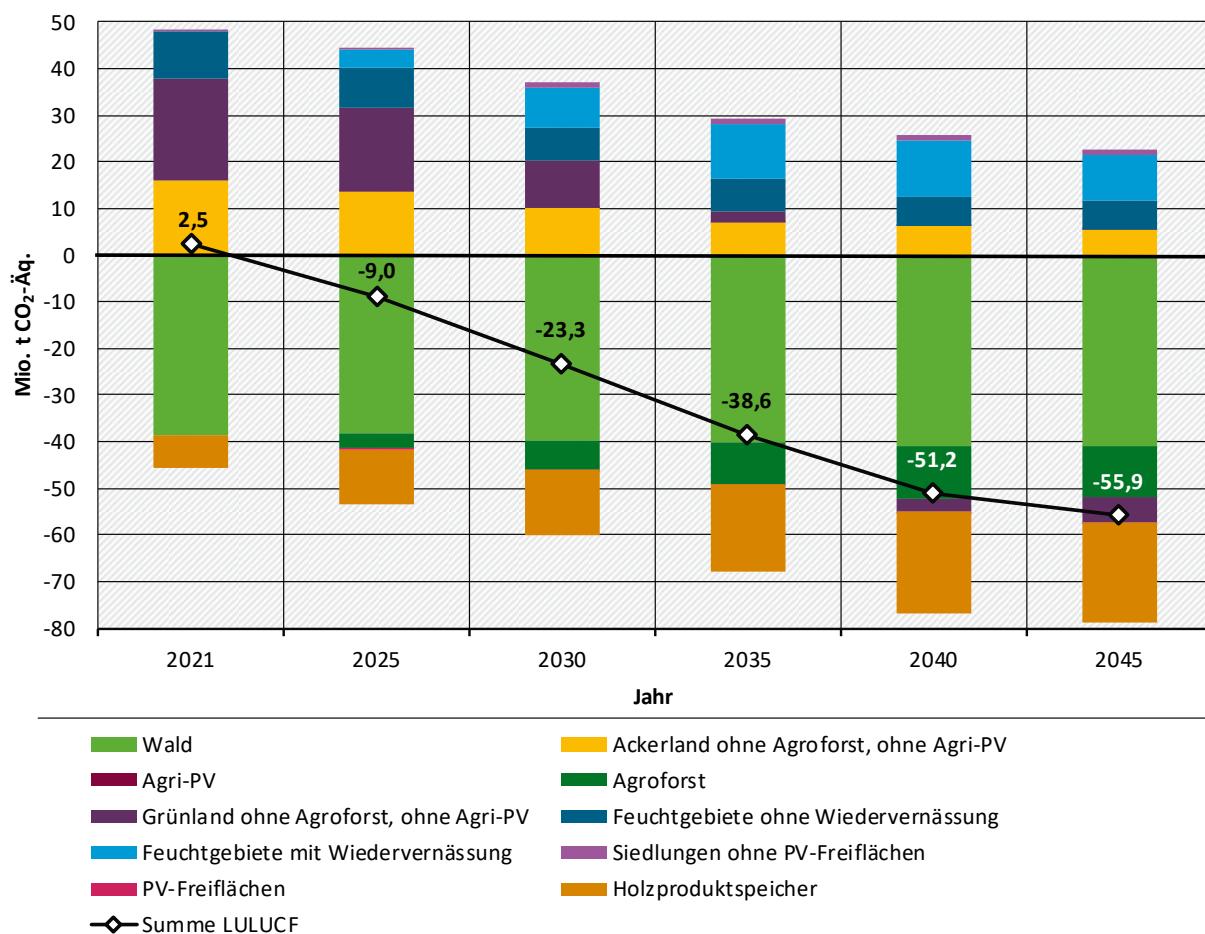
Die Summe der Maßnahmen, insbesondere zum Moorbödenenschutz, führt zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen aus Quellen von 48,4 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2021 auf 22,7 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045. Die Minderungsrate für die Quellen im LULUCF-Sektor beträgt 53 % gegenüber dem Jahr 2021 und 58 % gegenüber dem Jahr 1990.

⁷³ Vergleichswert aus dem Jahr 2021 beträgt 1,285 Mio. ha (0,327 Mio. ha Acker-, 0,969 Mio. ha Grünland)

⁷⁴ Ab einem Wassertand von -20 cm unter Flur werden ehemalige Acker- und Grünlandflächen als Feuchtgebiete mit Wiedervernässung (siehe Abbildung 83) gewertet.

⁷⁵ Siedlungsflächen umfassen z.B. Gebäude und Verkehrswege sowie Begleitgrünflächen und Grünflächen im Siedlungsbereich.

Abbildung 82: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Aufnahme durch Senken im Sektor LULUCF, CARESupreme, 2021-2045



Quelle: UBA (2024), Modellrechnungen Öko-Institut

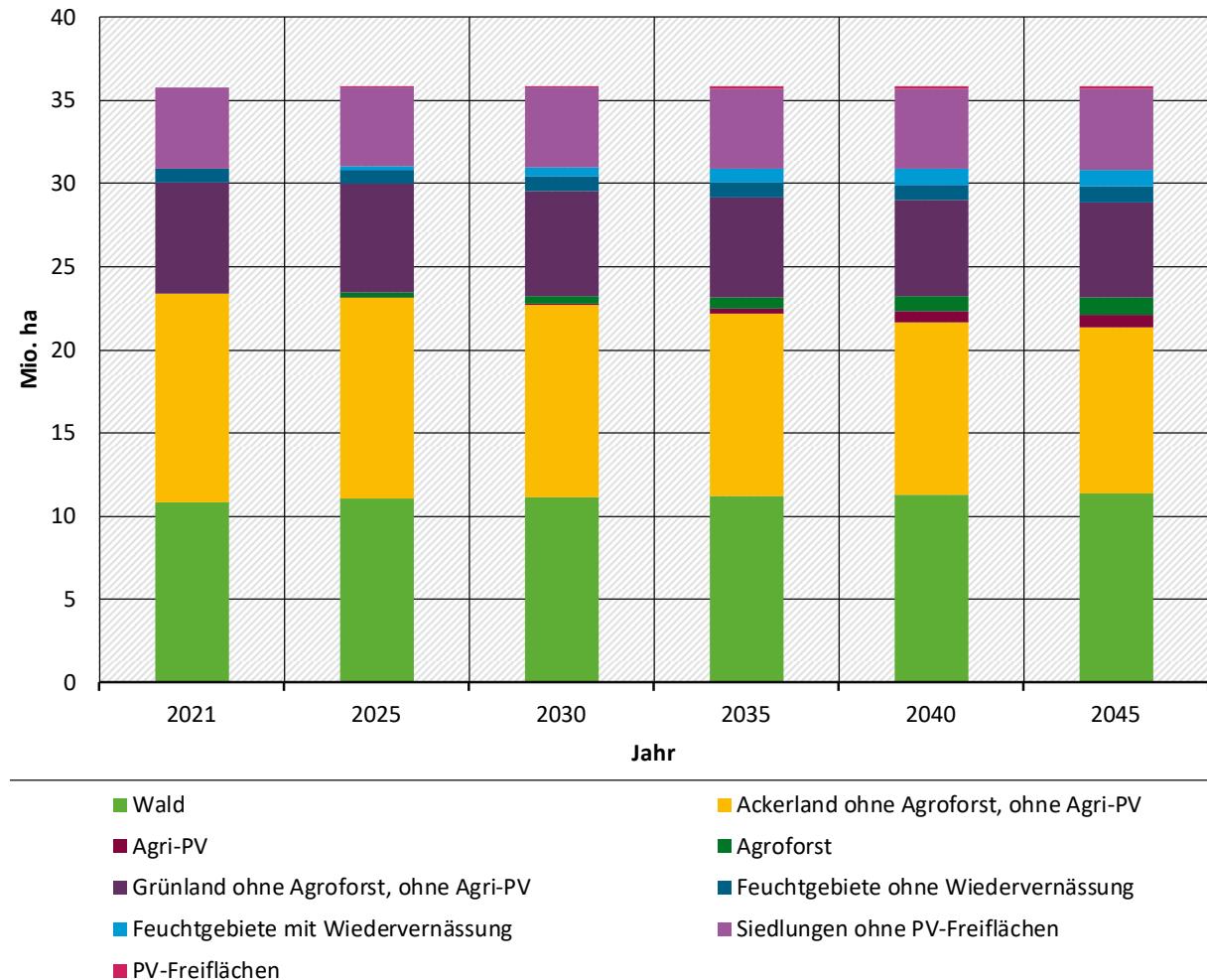
Tabelle 37: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Aufnahme durch Senken im Sektor LULUCF in ausgewählten Jahren, CARESupreme, 2021 bis 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
	Mio. t CO ₂ -Äq.					
Wald (mittlere natürliche Störungen)	-38,7	-38,1	-39,8	-40,3	-40,9	-41,0
Ackerland ohne Agroforst, ohne Agri-PV	15,8	13,5	10,0	7,0	6,2	5,5
Agri-PV auf Acker- und Grünland	--	>0,001	>0,001	0,002	0,004	0,004
Agroforst auf Acker- und Grünland	--	-3,4	-6,1	-8,8	-11,5	-10,9
Grünland ohne Agroforst, ohne Agri-PV	22,1	18,2	10,3	2,5	-2,4	-5,5
Feuchtgebiete ohne Wiedervernässung	9,9	8,4	7,2	6,7	6,3	6,0
Feuchtgebiete mit Wiedervernässung	--	4,1	8,6	11,8	12,0	10,1
Siedlungen ohne PV-Freiflächen	0,4	0,4	0,8	1,1	1,1	1,1
PV-Freiflächen	--	-0,03	-0,11	-0,15	-0,15	-0,11

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Holzproduktspeicher ⁷⁶	-7,2	-12,1	-14,2	-18,5	-22,0	-21,2
Sonstiges	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt	2,5	-9,0	-23,3	-38,6	-51,2	-55,9

Quelle: UBA (2024), Modellrechnungen Öko-Institut

Abbildung 83: Entwicklung der Flächenkulisse im LULUCF-Sektor, CARESupreme, 2021 bis 2045



Quelle: UBA (2024), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 38: Entwicklung der Flächenkulisse im LULUCF-Sektor in ausgewählten Jahren, CARESupreme, 2021 bis 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. ha						
Wald	10,88	11,04	11,14	11,21	11,28	11,36

⁷⁶ Die Höhe der Zuflüsse in und Abflüsse aus dem Holzproduktspeicher bestimmen seine jährliche Netto-Bilanz. Da der Zufluss von 2040 bis 2045 beginnt in eine Sättigung zu gehen und die Abflüsse durch eine verwendete Halbwertzeitfunktion davon unberührt bleiben, nimmt die Netto-Bilanz im Jahr 2045 leicht ab. Der Holzproduktspeicher erhöht sich also weiter, aber mit einer leicht abnehmenden Tendenz.

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Ackerland ohne Agroforst, ohne Agri-PV	12,48	12,09	11,54	10,94	10,33	9,94
Agri-PV auf Ackerland	0,00	0,00	0,05	0,20	0,44	0,47
Agroforst auf Ackerland	0,00	0,18	0,32	0,46	0,60	0,74
Grünland ohne Agroforst, ohne Grünland-PV	6,71	6,58	6,29	6,01	5,79	5,72
Agri-PV auf Grünland	0,00	0,00	0,03	0,12	0,27	0,29
Agroforst auf Grünland	0,00	0,07	0,13	0,19	0,25	0,31
Feuchtgebiete ohne Wiedervernässung	0,81	0,83	0,86	0,88	0,90	0,92
Feuchtgebiete mit Wiedervernässung	0,00	0,19	0,53	0,83	0,96	1,05
Siedlungen ohne PV-Freiflächen	4,87	4,75	4,80	4,83	4,85	4,87
PV-Freiflächen	0,00	0,02	0,06	0,08	0,08	0,08
Sonstige Flächen	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Gesamt	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79

Quelle: UBA (2024), Modellrechnungen Öko-Institut

Die Senkenleistung im LULUCF-Sektor wird stark von der Waldfläche dominiert. Im Jahr 2021 wird sie mit -38,7 t CO₂-Äq. angegeben (UBA (2024), Abbildung 82 und Tabelle 37). Es ist aber zu berücksichtigen, dass die letzte Waldinventur, die so genannte Kohlenstoffinventur (Thünen-Institut 2017), im Jahr 2017 lag. Daher sind die Auswirkungen der Trockenperiode 2018-2022 noch nicht in die deutsche Treibhausgasberichterstattung eingeflossen, da die Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur (BWI-4, veröffentlicht am 8. Oktober 2024) und damit für Jahre 2018-2022, noch ausstanden. Lediglich die gestiegene Holzentnahme ist berücksichtigt, nicht aber steigende Mortalitätsraten oder sinkende Zuwachsrate der Bäume. Dies führt dazu, dass nur eine moderate Abnahme der Senkenleistung der lebenden Bäume der Waldfläche in den Jahren 2018-2020 im Treibhausgasinventar abgebildet wird.

In den CARE-Szenarien wurde die Waldentwicklung mit dem Waldmodell FABio-Forest⁷⁷ abgebildet. In FABio-Forest wurden für die Jahre 2018 bis 2021 zusätzlich zu den berichteten Holzentnahmen Annahmen zur Mortalität aus der jährlichen Waldzustandserhebung abgeleitet und Schätzungen zur Abnahme der Wuchsleistung getroffen (Laubbäume 25 % Abnahme, Nadelbäume 50 % Abnahme; siehe Details in Pfeiffer et al. (2023) und Hennenberg et al. (2024b)). Diese Annahmen führen zu einer starken Abnahme der Senkenleistung der lebenden Bäume der Waldfläche, so dass die lebenden Bäume in diesen Jahren zu einer Quelle von 19 bis 43 Mio. t CO₂-Äq. werden (Abbildung 84). Die Auswertung der nun vorliegenden Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur ergeben für die Jahre 2018 bis 2022 mittlere CO₂-Emissionen von 26,4 Mio. t CO₂-Äq.. Mit FABio-Forest – und damit bereits in den CARE-Szenarien – wurde für diese Jahre ein vergleichbarer Mittelwert von 25,6 Mio. t CO₂-Äq. modelliert.⁷⁸ **Mit FABio-Forest wurde also bereits verlässlich die historische Emissionsbilanz für den Wald abgebildet. In den hier dargestellten Szenarien und Sensitivitäten sind somit die Auswirkungen der**

⁷⁷ FABio = Forestry and Agricultural Biomass Model. FABio-Forest ist ein distanzunabhängiges Einzelbaummodell, dass auf Basis der Bundeswaldinventuren BWI-2 und BWI-3 die Entwicklung des Waldes simuliert (siehe Details in Böttcher et al. 2018 und Pfeiffer et al. 2023).

⁷⁸ Siehe Hennenberg et al. (2024b) und Blog-Beitrag unter <https://www.oeko.de/blog/entwicklungen-der-co2-speicherleistung-des-waldes-fruehzeitiger-abschaeten-einordnung-der-ergebnisse-der-bundeswaldinventur/>.

extremen Jahren 2018 bis 2020 berücksichtigt, und die Ergebnisse sind als richtungssicher anzusehen.

Aufgrund der hohen Unsicherheiten im Wald wurden für die Jahr 2022 bis 2045 in FABio-Forest sechs Szenarien berechnet:

- ▶ **Szenario PB-2024_gS (FABio):** Als Startpunkt wurden die Annahmen zur Waldentwicklung aus dem Projektionsbericht 2024 (Harthan et al. 2024) in FABio-Forest nachgestellt. Holzernte, Mortalität und Zuwachs werden für die Zukunft konstant wie im Mittel 2013-2017 angenommen (Periode mit geringen natürlichen Störungen, gS).
- ▶ **Szenario PB-2024_mS (FABio):** Dem gegenübergestellt wird ein Szenario mit mittleren natürlichen Störungen (mS; Holzernte wie im Mittel 2013-2017, Mortalität und Zuwachs wie im Mittel der Jahre 2002-2017).
- ▶ **Szenario PB-2024_sS (FABio):** Dieses Szenario nimmt starke natürliche Störungen an (sS; Holzernte wie im Mittel der Jahre 2013-2017, Mortalität wie im Mittel der Jahre 2002-2021, Zuwachs 90 % des Mittels in den Jahren 2002-2017).
- ▶ **Szenario CARESupreme_gS:** Ausgehend vom Szenario PB-2024_gS (FABio) wird die Laubholzernte bis zum Jahr 2030 um 10 % und bis zum Jahr 2050 um 30 % verringert. Zudem wird die Effizienz der Bergung von eingeschlagenem Holz verbessert.
- ▶ **Szenario CARESupreme_mS und Szenario CARESupreme_sS:** Ausgehend vom Szenario CARESupreme_gS werden in diesen beiden Szenarien mittlere (mS) bzw. starke natürliche Störungen (sS) angenommen (s.o.).

In Szenario PB-2024_gS (FABio) mit nur geringen natürlichen Störungen beträgt die Senkenleistung der lebenden Bäume im Jahr 2045 -45,8 Mio. t CO₂-Äq. (Abbildung 84). Mit den Maßnahmen zur Extensivierung der Laubholzentnahme wird erreicht, dass die Senkenleistung der lebenden Bäume kontinuierlich zunimmt und im Jahr 2045 -51,5 Mio. t CO₂-Äq. beträgt. Unter der Annahme, dass der Wald sich bei mittleren natürlichen Störungen entwickelt, werden in den Szenarien PB-2024_mS (FABio) und CARESupreme_mS jeweils ca. 18 Mio. t CO₂-Äq./Jahr weniger an CO₂ in den lebenden Bäumen eingespeichert (Abbildung 84). Eine weitere Erhöhung auf starke natürliche Störungen ergibt eine weitere Verringerung der Senkenleistung von etwa 16 Mio. t CO₂-Äq./Jahr in den Szenarien 2024_ss (FABio) und CARESupreme_ss (Abbildung 84). Für die Abbildung der lebenden Biomasse der Waldfläche im LULUCF-Sektor (Abbildung 82) wird das Szenario CARESupreme_mS verwendet.

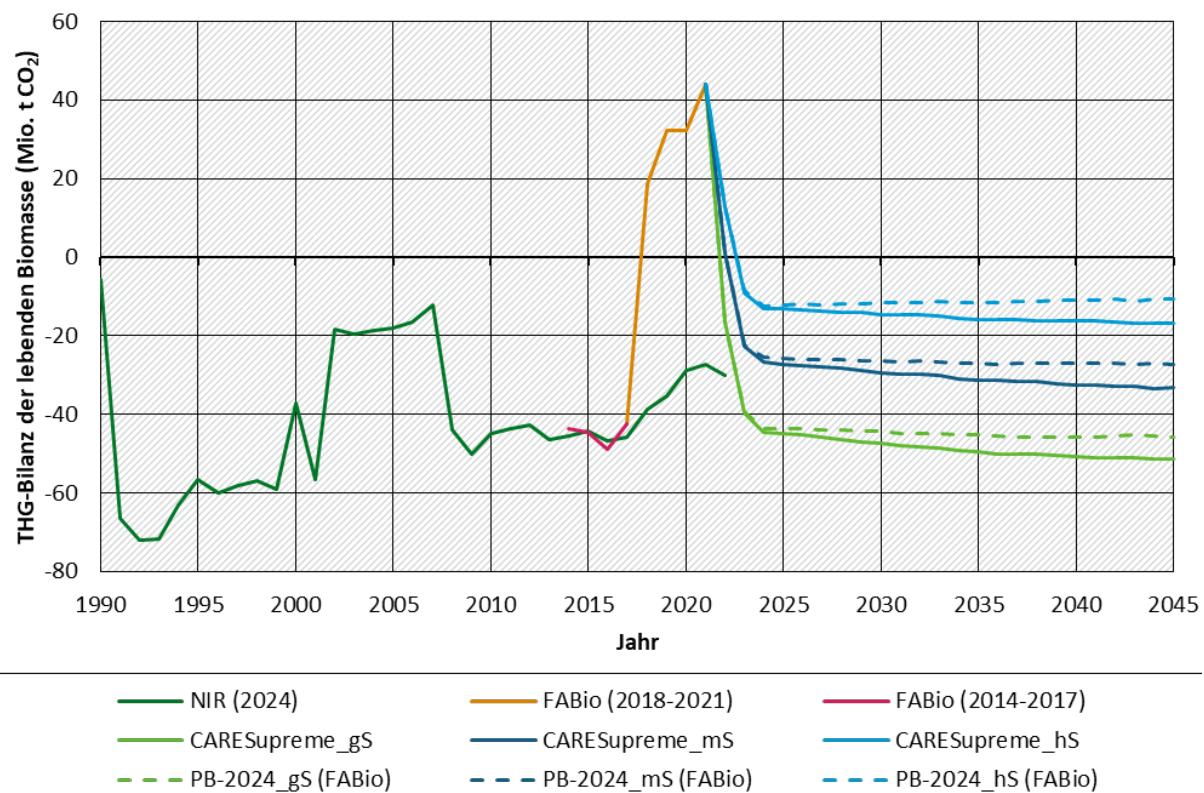
Mit der Steigerung der stofflichen Holznutzung erreicht der Holzproduktspeicher im Jahr 2045 eine Senkenleistung von -21,2 Mio. t CO₂/Jahr. Gegenüber dem Ausgangswert im Jahr 2021 entspricht dies mehr als einer Verdreifachung der Senkenleistung (Abbildung 82, Tabelle 37).

Die Höhe des Holzproduktspeicher ergibt sich aus „Abflüssen“ an Holzprodukten, die aus der Nutzung gehen, und „Zuflüssen“ an Holzprodukten, die neu genutzt werden. Abflüsse an Holzprodukten erfolgt anhand von Halbwertszeiten. Im Szenario CARESupreme wird – ausgehend von dem mittleren Zufluss an langlebigen Holzprodukten⁷⁹ der Jahre 2012-2021 – bis zum Jahr 2030 der Zufluss um 6 Mio. m³/Jahr und bis zum Jahr 2045 um 19,5 Mio. m³/Jahr erhöht (Abbildung 85). Der angenommene zusätzliche Zufluss an langlebigen Holzprodukten im Jahr 2045 zusammen mit der verringerten Holzernte (s.o.) entspricht etwa 50 % der heutigen Energieholznutzung aus dem Wald und aus Rest- und Abfallstoffen. Diese Veränderung der

⁷⁹ Unter langlebigen Holzprodukten werden Schnittholz mit einer Halbwertszeit von 35 Jahren und Holzwerkstoffe mit einer Halbwertszeit von 25 Jahren verstanden.

Holznutzung ist mit den Narrativen und Modellannahmen in den anderen Sektoren abgestimmt. In den energieverbrauchenden Sektoren steht entsprechend weniger Energieholz zur Verfügung. Langlebige Holzprodukte werden vor allem vermehrt im Gebäudesektor eingesetzt, was in der Industrie zu einer Abnahme der Produktion von nicht-biogenen Baustoffen führt.

Abbildung 84: Sensitivitätsanalyse zur Treibhausgasbilanz der Waldfäche für geringe, mittlere und starke natürliche Störungen, CARESupreme, 1990 bis 2045



Quelle: UBA (2024), Modellrechnungen Öko-Institut. Die lebende Biomasse ist ein Kohlenstoffpool der Waldfäche. Hinzu kommen die Kohlenstoffpools Boden, Totholz und Streu. FABio (2014-2017) = Kalibrierungsphase zu den Ergebnissen der Kohlenstoffinventur aus dem Jahr 2017 (CI-2017)⁸⁰, FABio (2018-2021) = Modellierung der Extremjahre 2018-2021 (siehe Details in Pfeiffer et al. (2023)). gS = geringe Schäden, mS = mittlere Schäden, sS = starke Schäden. PB-2024 (FABio) = Waldmodellierung in FABio-Forest unter Annahme vergleichbarer Annahmen wie im Projektionsbericht der Bundesregierung aus dem Jahr 2024 (Harthan et al. 2024).

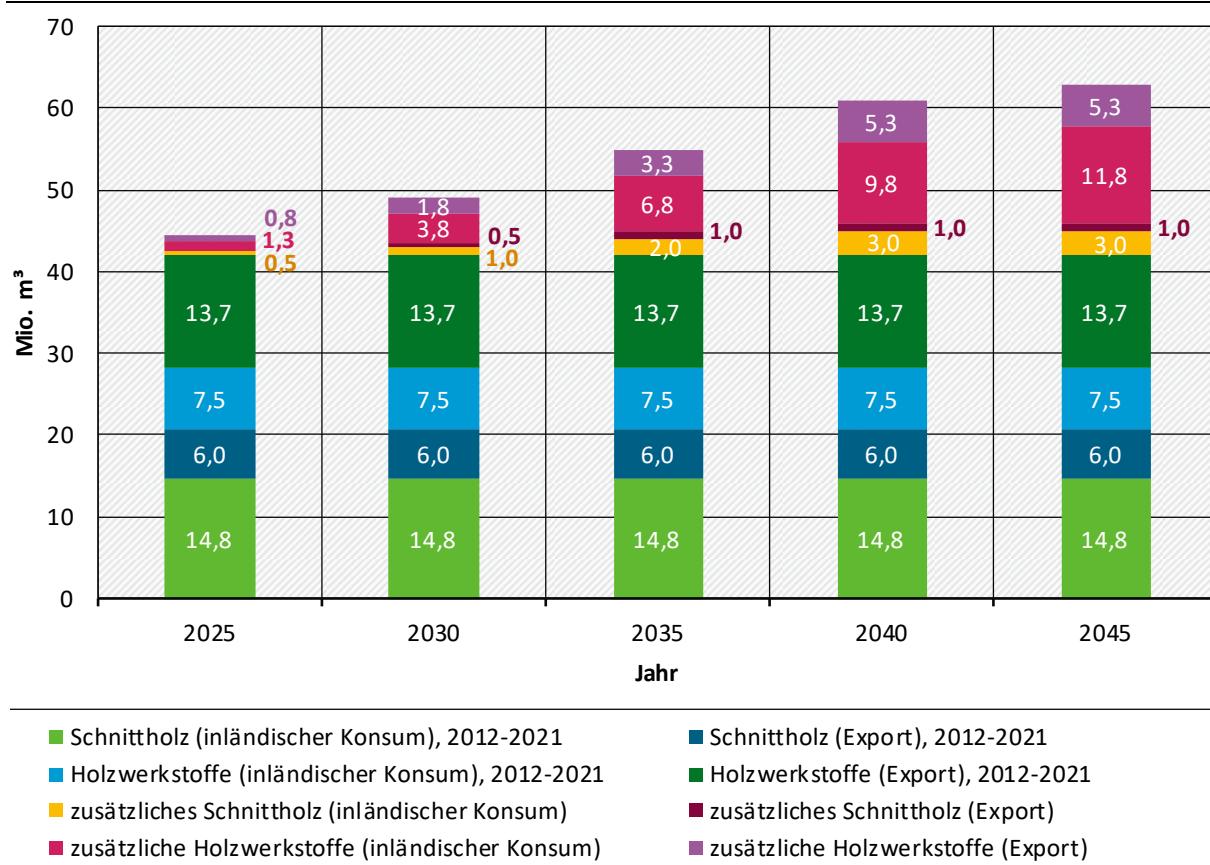
Die Anlage von Agroforstsystmen auf Acker- und Grünlandflächen als Maßnahme zur CO₂-Einbindung auf mineralischen Böden erfolgt bis 2030 auf 450.000 und bis 2045 auf weiteren 600.000 ha (Summe bis 2045: 1.050.000 ha). Im Sinne des Narrativs von CARESupreme liegt der Fokus auf der Einbindung von CO₂ und weniger auf der Energieholzproduktion für andere Sektoren. Durch die niedrige Holzentnahme erreicht die angenommene CO₂-Einbindung 13,6 t CO₂/ha/Jahr. Im Jahr 2030 beträgt in CARESupreme die Senkenleistung auf Agroforstflächen -6,1 Mio. t CO₂-Äq. und bis zum Jahr 2045 -10,9 Mio. t CO₂-Äq. (Abbildung 82).

In die Treibhausgasbilanz des LULUCF-Sektors werden CO₂-Einspeicherungen in Ackerland auf mineralischen Böden, auf denen eine Umstellung auf ökologischen Landbau erfolgt, nicht berücksichtigt, da die Unsicherheiten, dass die dadurch anvisierte CO₂-Einspeicherung erreicht wird, hoch sind. Unter Annahme einer CO₂-Einbindung von 0,72 t CO₂/ha errechnet sich ab dem Jahr 2030 eine CO₂-Einbindung von 2,5 Mio. t CO₂/ha (nicht in der Bilanz berücksichtigt).

⁸⁰ <https://bwi.info/>

Mit den Maßnahmen im LULUCF-Sektor wird erreicht, dass die Brutto-Senkenleistung im LULUCF erhalten bleibt und bis zum Jahr 2045 einen Wert von -79 Mio. t CO₂-Äq. annimmt. Wird die CO₂-Einbindung durch den ökologischen Landbau berücksichtigt, steigt die Brutto-Senkenleistung auf gut -81 Mio. t CO₂ im Jahr 2045.

Abbildung 85: Zusätzlicher Zufluss und mittlerer Zufluss der Jahre 2012-2021 an langlebigen Holzprodukten in den Holzproduktspeicher, CARESupreme, 2025 bis 2045



Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut.

Vor dem Hintergrund der aktuellen Treibhaus-Projektionen 2025 (Wehnemann et al. 2025) wird im Anhang A.12.10 eine methodische Einordnung gegeben, da die Berechnungen im CARE-Vorhaben vor Veröffentlichung der zusammenfassenden Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur, dem vorläufigen deutschen Treibhausgasinventar 2025 und den darauf aufbauenden Treibhausgas-Projektionen 2025 erfolgten. **Im Ergebnis wird deutlich, dass auch unter den aktuellen Daten die LULUCF-Ziele für das Jahr 2045 erreichbar sind.**

9.2 CARETech

9.2.1 Narrativ

Im Szenario CARETech werden im LULUCF-Sektor – wie bereits im Szenario CARESupreme – bestehende Quellen verringert und mögliche Senken ausgebaut. In Anlehnung an das Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS) im Projektionsbericht 2024 (Harthan et al. 2024) wird in CARETech angenommen, dass bestehende und in der Planung befindliche Maßnahmen und Instrumente umgesetzt werden. Es werden aber für einzelne Aspekte ambitioniertere Annahmen getroffen als im MWMS, wenn die politische Entwicklung dies rechtfertigt. In Summe wird in CARETech weniger an natürlichem Klimaschutz erreicht als in CARESupreme. CARETech

ist somit kein Zielszenario. Zielsetzungen für den LULUCF-Sektor im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) bis zu den Jahren 2030, 2040 und 2045 müssen in CARETech nicht erreicht werden.

9.2.2 Zentrale Maßnahmen und Instrumente

In CARETech werden die gleichen Instrumente herangezogen wie in CARESupreme (Quellen in Abschnitt 9.1.2.1; Senken in Abschnitt 9.1.2.2) gleichwohl mit weniger starker Ausprägung in der Treibhausgasminderungswirkung bzw. im Senkenausbau. Auf Unterschiede in der Ausgestaltung wird in der Ergebnisdarstellung eingegangen.

9.2.3 Zentrale Ergebnisse

Ausgehend von der Netto-Bilanz im LULUCF-Sektor von 2,6 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2021 wird im Szenario CARETech eine Treibhausgasminderung bis zum Jahr 2030 von -6,2 Mio. t CO₂-Äq. und bis zum Jahr 2045 von -24,5 Mio. t CO₂-Äq. erreicht (Abbildung 86). Damit werden die KSG-Ziele von mindestens -25 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 und mindestens -40 Mio. t CO₂-Äq. bis zum Jahr 2045 deutlich verfehlt. Gegenüber CARESupreme ist die Treibhausgasbilanz im LULUCF-Sektor für CARETech im Jahr 2030 um 17,1 Mio. t CO₂-Äq. und im Jahr 2045 um 31,4 Mio. t CO₂-Äq. schlechter (Abbildung 86).

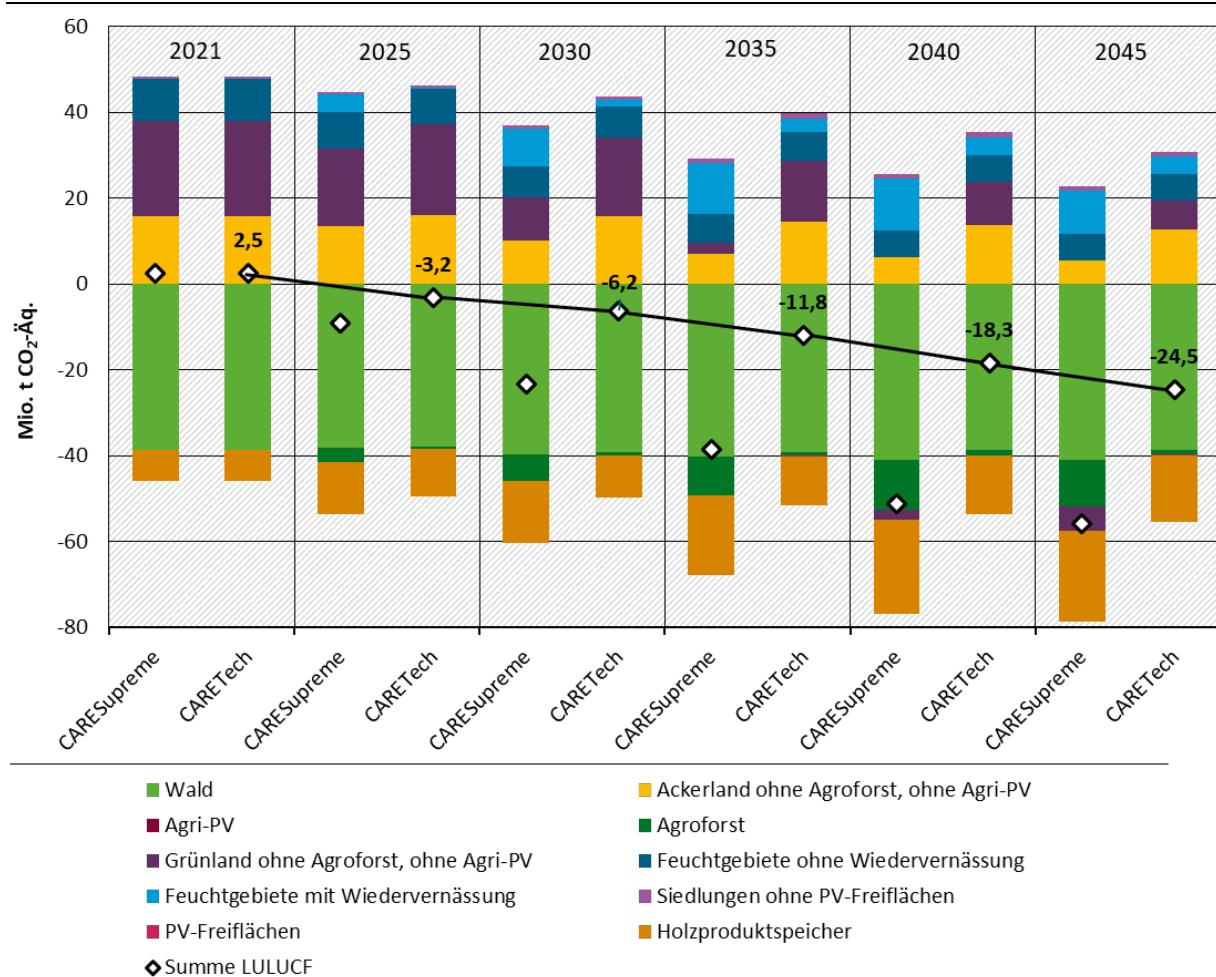
Unterschiede zwischen CARESupreme und CARETech treten vor allem für die folgenden Maßnahmen auf (siehe Abbildung 86):

- ▶ **Wiedervernässung drainierter Moorböden in der Landwirtschaft:** In CARETech werden bis 2045 34,1 % der trocken genutzten Moorböden in der Landwirtschaft wiedervernässt. In CARESupreme sind es 82,5 %. So gehen die Treibhausgasemissionen im Acker- und Grünland in CARETech weniger stark zurück als in CARESupreme. Gleichzeitig steigen aber auch die Emissionen aus den wiedervernässten Flächen als Teil der Feuchtgebiete weniger stark an. Die Summe der Treibhausgasemissionen aus Acker- und Grünland und wiedervernässten Flächen beträgt in CARETech in 2045 23,7 Mio. t CO₂-Äq.. Der Wert ist um 13,6 Mio. t CO₂-Äq. höher als in CARESupreme.
- ▶ **Reduzierung des Flächenverbrauchs für Siedlungen:** Der Flächenverbrauch bleibt in CARETech bis 2030 bei 30 ha pro Tag und geht bis 2050 auf netto-Null zurück.⁸¹ In CARESupreme wird im Jahr 2030 bereits ein Rückgang auf 20 ha pro Tag erreicht. Auf die Treibhausgasbilanz wirkt sich dieser Unterschied kaum aus (0,05 Mio. t CO₂-Äq.). Auf Ebene der Flächenkulisse werden bis 2050 in CARETech ca. 57.000 ha mehr an Siedlungsfläche angelegt als in CARESupreme.
- ▶ **Anlage von Agroforstflächen:** In CARETech werden Agroforstflächen⁶⁸ bis 2030 auf 169.500 ha und bis 2045 auf 232.500 ha neu angelegt (Summe in 2045: 402.000 ha). Die Holzentnahme auf den Agroforstflächen wird als hoch angenommen, um Energieholz für die anderen Sektoren bereitzustellen. So liegt die angenommene CO₂-Einbindung bei einem niedrigen Wert von 3,6 t CO₂/ha/Jahr. Die Senkenleistung durch Agroforst beträgt in CARETech -0,6 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 und -1,2 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045. In CARESupreme sind diese Werte mit -6,1 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 und -10,9 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045 deutlich höher, da mehr Fläche zu Agroforst wird (1.050.000 ha bis 2045) und weil weniger Holz entnommen und so 13,6 t CO₂/ha/Jahr eingebunden werden.

⁸¹ Dies entspricht der Annahme zur Siedlungsentwicklung im MWMS im Projektionsbericht 2024 der Bundesregierung (Harthan et al. 2024).

- ▶ **Waldbewirtschaftung und Waldmehrung:** In CARETech werden – wie in CARESupreme – mittlere natürliche Störungen ab 2022 angenommen. Die Laubholzentnahme wird in CARETech wie in CARESupreme bis 2030 um 2 Mio. m³ und bis 2045 um weitere 2 Mio. m³ (CARESupreme weitere 3 Mio. m³) reduziert. Diese Reduktion wird als nötig erachtet, um Anforderungen an das EU Nature Restoration Law zu erfüllen. Die Annahmen zur Nadelholzentnahme, zum Waldumbau und zur Nutzung von Schad- und Mortalitätsholz werden in CARETech wie in CARESupreme beibehalten. Eine Waldmehrung findet in CARETech bis 2045 auf 33.000 ha statt (CARESupreme: 220.000 ha). Mit diesen Annahmen liegt in CARETech die Senkenleistung im Wald im Jahr 2030 bei 39,3 Mio. t CO₂-Äq. und im Jahr 2045 bei 38,6 Mio. t CO₂-Äq., und damit leicht niedriger als in CARESupreme (2030: 39,8 Mio. t CO₂-Äq.; 2045: 41,0 Mio. t CO₂-Äq.).
- ▶ **Holzproduktspeicher:** In CARETech wird mehr Holzenergie eingesetzt, so dass das Potenzial, vermehrt Holz in langlebigen Holzprodukten zu speichern, geringer ist als in CARESupreme. In CARETech wird der Zufluss in den Holzproduktspeicher gegenüber dem Mittelwert der Jahre 2012-2021 bis 2030 um 1 Mio. m³ und bis 2045 um 10,5 Mio. m³ erhöht. So wird die CO₂-Speicherung im Holzproduktspeicher von 7,1 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2021 auf 10,8 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 und 11,5 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045 gesteigert. Da in CARESupreme die zusätzliche Holzzuflüsse etwa dreimal höher liegen als in CARETech, fällt in CARESupreme die CO₂-Festlegung in Holzprodukten deutlich höher aus.
- ▶ In CARETech werden die Annahmen zu Einstellung des Torfabbaus, Nutzung von Torfersatz, Optimierung von bestehenden Feuchtgebieten und Grünlanderhalt wie in CARESupreme beibehalten.

Abbildung 86: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Aufnahme durch Senken im Sektor LULUCF, CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Quelle: UBA (2024), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 39: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Aufnahme durch Senken im Sektor LULUCF in ausgewählten Jahren, CARETech, 2021 bis 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Wald (mittlere natürliche Störungen)	-38,7	-38,0	-39,3	-39,1	-38,7	-38,6
Ackerland ohne Agroforst, ohne Agri-PV	15,8	16,0	15,7	14,4	13,7	12,7
Agri-PV auf Acker- und Grünland	--	>0,001	>0,001	0,002	0,004	0,004
Agroforst auf Acker- und Grünland	--	-0,3	-0,6	-0,9	-1,2	-1,2
Grünland ohne Agroforst, ohne Agri-PV	22,1	21,0	18,3	14,2	10,0	6,8
Feuchtgebiete ohne Wiedervernässung	9,9	8,4	7,2	6,7	6,3	6,0
Feuchtgebiete mit Wiedervernässung	--	0,4	1,5	3,2	4,1	4,2
Siedlungen ohne PV-Freiflächen	0,4	0,4	0,8	1,1	1,1	1,1
PV-Freiflächen	--	-0,03	-0,11	-0,15	-0,15	-0,11

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Holzproduktspeicher	-7,2	-11,1	-9,9	-11,3	-131,5	-15,5
Sonstiges	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt	2,6	-3,2	-6,2	-11,8	-18,3	-24,5

Quelle: UBA (2024), Modellrechnungen Öko-Institut.

Tabelle 40: Entwicklung der Flächenkulisse im LULUCF-Sektor in ausgewählten Jahren, CARETech, 2021 bis 2045

Kategorie	2021	2025	2030	2035	2040	2045
Mio. ha						
Wald	10,88	11,03	11,08	11,10	11,13	11,16
Ackerland ohne Agroforst, ohne Agri-PV	12,48	12,28	11,94	11,47	10,98	10,72
Agri-PV auf Ackerland	0,00	0,00	0,05	0,21	0,45	0,48
Agroforst auf Ackerland	0,00	0,07	0,15	0,21	0,27	0,34
Grünland ohne Agroforst, ohne Agri-PV	6,71	6,74	6,65	6,54	6,37	6,34
Agri-PV auf Grünland	0,00	0,00	0,03	0,12	0,28	0,30
Agroforst auf Grünland	0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06
Feuchtgebiete ohne Wiedervernässung	0,81	0,83	0,86	0,88	0,90	0,92
Feuchtgebiete mit Wiedervernässung	0,00	0,02	0,09	0,22	0,33	0,43
Siedlungen ohne PV-Freiflächen	4,87	4,76	4,83	4,88	4,91	4,93
PV-Freiflächen	0,00	0,02	0,06	0,08	0,08	0,08
Sonstige Flächen	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Gesamt	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79

Quelle: UBA (2024), Modellrechnungen Öko-Institut.

Quellenverzeichnis

AGEB - AG Energiebilanzen (Hg.) (2023a): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Jahre 2008-2020. Stand 2008 für die Jahre 1990-2002, Stand 2012 für die Jahre 2003-2010, Stand 2013 für das Jahr 2011, Stand 2014 für das Jahr 2012, Stand 2015 für das Jahr 2013, Stand 2016 für das Jahr 2014, Stand 2017 für das Jahr 2015, Stand 2018 für das Jahr 2016, Stand 2019 für das Jahr 2017, Stand 2021 für die Jahre 2018 und 2019, Stand 2022 für das Jahr 2020, Stand 2023 für das Jahr 2021. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/>, zuletzt geprüft am 12.04.2024.

AGEB - AG Energiebilanzen (Hg.) (2023b): Satellitenbilanz Erneuerbare Energien, Jahre 2000-2020. Stand 2008 für die Jahre 2000-2002, Stand 2010 für die Jahre 2003-2008, Stand 2012 für die Jahre 2009-2010, Stand 2013 für das Jahr 2011, Stand 2014 für das Jahr 2012, Stand 2015 für das Jahr 2013, Stand 2016 für das Jahr 2014, Stand 2017 für das Jahr 2015, Stand 2018 für das Jahr 2016, Stand 2019 für das Jahr 2017, Stand 2020 für das Jahr 2018, Stand 2021 für das Jahr 2019, Stand 2022 für das Jahr 2020, Stand 2023 für das Jahr 2023. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/>, zuletzt geprüft am 12.04.2024.

Andor, M. A. (2022): Auswertung des Neun Euro Tickets. RWI, 07.09.2022. Online verfügbar unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Veranstaltungen/2022/9Euro-Ticket/RWI_Andor_Webinar_Agora_Verkehrswende_9_Euro_Ticket.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

Bei der Wieden, M.; Braungardt, S. (2023): Wie viel Energie verbrauchen unsere Wohngebäude? - Blog-Beitrag Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://blog.oeko.de/wie-viel-energie-verbrauchen-unsere-wohngebäude/>, zuletzt geprüft am 19.07.2023.

Benndorf; R.; Bernicke, M.; Bertram, A.; Butz, W.; Dettling, F.; Drotleff, J.; Elsner, C.; Fee, E.; Gabler, C.; Galander, C.; Hargita, Y.; Herbener, R.; Hermann, T.; Jäger, F.; Kanthak, J.; Kessler, H.; Koch, Y.; Kuntze, D.; Lambrecht, M.; ... Zietlow, B. (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 (Climate Change). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-2645>.

Blanck, R.; Zimmer, W.; Mottschall, M.; Göckeler, K.; Keimeyer, F.; Runkel, M.; Kresin, J.; Klinski, S. (2021): Mobilität in die Zukunft steuern: Gerecht, individuell und nachhaltig - Abschlussbericht zum UBA-Vorhaben „Fiskalische Rahmenbedingungen für eine postfossile Mobilität“ (Texte, 85/2021). Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-6356>.

BLE - Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2022): Versorgungsbilanz Fleisch 2021: Pro-Kopf-Verzehr sinkt auf 55 Kilogramm. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/220330_Versorgungsbilanz-Fleisch.html, zuletzt aktualisiert am 29.11.2023.

BLE - Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2024): Versorgungsbilanzen Milch. Online verfügbar unter <https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Milch-Milcherzeugnisse/Versorgungsbilanzen.html>, zuletzt geprüft am 02.09.024.

BMU (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hg.). Berlin.

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (05.02.2024): Einigung zur Kraftwerksstrategie. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/02/20240205-einigung-zur-kraftwerksstrategie.html>, zuletzt geprüft am 05.04.2024.

BNetzA - Bundesnetzagentur (Hg.) (2022): Genehmigung des Szenariorahmens 2023-2037/2045 für den Netzentwicklungsplan 2023-2037/2045. Online verfügbar unter https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-01/Szenariorahmen_2037_Genehmigung.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Bopst, J.; Hölzer-Schopohk, O.; Lindmaier, J.; Myck, T.; Schmied, M.; Weiß, J. (2019): Wohin geht die Reise? - Luftverkehr der Zukunft: umwelt- und klimaschonend, treibhausgasneutral, lärmarm. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-2240>.

Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018): FABio-Waldmodell - Modellbeschreibung Version 0.54 Stand Nov. 2017. Öko-Institut (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2022): Entwurf Flächenentwicklungsplan. Online verfügbar unter

https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan/_Anlagen/Downloads/FEP_2022_2/220701_FEP_Entwurf.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

Bürger, V.; Wiegmann, K. (2007): Energieeinsparquote und Weiße Zertifikate - Potenziale und Grenzen einer Quotenregelung als marktorientiertes und budgetunabhängiges Lenkungsinstrument zur verstärkten Durchdringung von nachfrageseitigen Energieeinsparmaßnahmen. Öko-Institut (Hg.). Freiburg/Darmstadt. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/312/DP-2007-002.pdf>, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

Cischinsky, H.; Diefenbach, N. (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 - Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (Hg.). Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2024.

Cunningham, M.; Fink, A.; Baier, U. (2015): Methanemissionen auf Kläranlagen. In: *Aqua & Gas* (3), S. 60–62. Online verfügbar unter

https://www.researchgate.net/publication/274677491_Methanemissionen_auf_Klaranlagen, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

destatis (2021): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Land- und Forstwirtschaft, Fischerei (Fachserie 3 Reihe 5.1). Statistisches Bundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Publikationen/Downloads-Flaechennutzung/bodenflaechennutzung-2030510217004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 12.01.2024.

EC - European Commission (2022): Impact Assessment Report Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014 - Commission Staff Working Document. SWD (2022) 96 final. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/s/z7a4>, zuletzt geprüft am 14.05.2025.

ENTSOG; ENTSO-E (Hg.) (2022): TYNDP 2022 Scenario Report - Version April 2022. Brussels. Online verfügbar unter https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2022/04/TYNDP2022_Joint_Scenario_Full-Report-April-2022.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

Europäische Kommission (2022): Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (COM/2022/150 final). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0150#>, zuletzt geprüft am 05.01.2023.

Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J.; Baur, F.; Hünecke, K.; Dehoust, G.; Bulach, W.; Wiegmann, K. (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor) - Abschlussbericht (Texte). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-6722>.

Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Hirzel, S.; Neusel, L.; Aydemir, A.; Schwotzer, C.; Kaiser, F.; Gondorf, C.; Hauch, J.; Hof, J.; Sankowski, L.; Langhorst, M. (2023): CO2-neutrale Prozesswärmeverzeugung - Umbau des industriellen

Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. Endbericht (Texte). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-5850>

FNB Gas - Die Fernleitungsnetzbetreiber (2023): Netzentwicklungsplan Gas 2022–2032 - Entwurf. Online verfügbar unter https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2023/03/2023_03_31_FNB_GAS_2022_P4_NEPEntwurf_DE.pdf, zuletzt geprüft am 03.07.2023.

Fraunhofer ISI; Consentec; ifeu; TU Berlin Fachgebiet E&R (2024): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Langfristszenarien 3. Online verfügbar unter <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

Gretzschel, O.; Hansen, J.; Schmitt, T. G.; Siekmann, K.; Jakob, J. (2012): Schlammfaulung statt aerober Stabilisierung - Trend der Zukunft? In: Korrespondenz Abwasser Abfall 59 (12), S. 1144–1152. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10993/7867>, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

Gschrey, B.; Behringer, D.; Kleinschmidt, J.; Jörß, W.; Liste, V.; Ludig, S.; Wissner, N.; Birchby, D.; Dubey, J.; Hekman, J. (2022): Support contract for an Evaluation and Impact Assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases - Impact assessment final report. Öko-Recherche; Öko-Institut; Ricardo. European Commission Directorate-General for Climate Action (Hg.). Publications Office of the European Union. DOI: 10.2834/934036.

Harthan, R. O.; Förster, H.; Borkowski, K.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jansen, L. L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Repenning, J.; ... Vos, C. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7510>.

Hennenberg, K.; Böttcher, H. (2023): Biomasse und Klimaschutz - Im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Analysen zu aktuellen klimapolitischen Fragen im Bereich der Energieeffizienz insbesondere in den Sektoren Industrie, GHD und Gebäude“ (67KE0064). Öko-Institut (Hg.). Berlin, Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oeekodoc/Biomasse-und-Klimaschutz_BMWK.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Pfeiffer, M. (2024a): Entwicklungen der CO2-Speicherleistung des Waldes frühzeitiger abschätzen – Einordnung der Ergebnisse der Bundeswaldinventur (Blog). Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/blog/entwicklungen-der-co2-speicherleistung-des-waldes-fruehzeitiger-abschaetzen-einordnung-der-ergebnisse-der-bundeswaldinventur/>, zuletzt geprüft am 23.06.2025.

Hennenberg, K.; Pfeiffer, M.; Böttcher, H.; Reise, J. (2024b): Kurzstudie zur Modellierung der THG-Bilanz der lebenden Bäume im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7430>.

Hermann, H.; Matthes, F. C.; Keimeyer, F. (2021): Konzept für die Einführung eines CO2-Mindestpreises im Stromsektor in Deutschland - Studie für die Stiftung Klimaneutralität. Öko-Institut (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/05/2021_05-11_Oeko-Institut2021-SKN-Konzept-CO2-Mindestpreis-final.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2022.

Hörner, M. (2022): Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude ENOB:dataNWG - Teilbericht Strukturdaten: Stand und Dynamik der energetischen Modernisierung von Gebäudehülle und haustechnischen Anlagen im Bestand der Nichtwohngebäude. Institut Wohnen und Umwelt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2022_IWU_Hoerner_ENOBdataNWG-Teilbericht_Strukturdaten-Nichtwohngebäude.Modernisierung-Huelle-tAnl-Solar.pdf, zuletzt geprüft am 22.08.2024.

KBU - Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt; KN Bau - Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (Hg.) (2021): Abschaffung des § 13 b BauGB - Position der Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU) und der Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (KN Bau). DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-5466>.

Kenkmann, T.; Cludius, J.; Fischer, C.; Fries, T.; Keimeyer, F.; Schumacher, K.; Brischke, L.-A.; Leuser, L. (2019): Flächensparend Wohnen - Energieeinsparung durch Suffizienzpolitiken im Handlungsfeld „Wohnfläche“ (Texte). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-5755>.

Muslemani, H.; Struthers, I.; Herraiz, L.; Thomson, C.; Lucquiaud, M. (2023): Waste Not, Want Not: Europe's untapped potential to generate valuable negative emissions from waste-to-energy (WtE) using carbon capture technology (OIES paper). The Oxford Institute for Energy Studies (Hg.). Oxford. Online verfügbar unter <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2023/03/Waste-Not-Want-Not-CM01.pdf>, zuletzt geprüft am 28.10.2024.

Naumann, R.; Pasold, S.; Fröhlicher, J. (2019): Finanzierung des ÖPNV - Status quo und Finanzierungsoptionen für die Mehrbedarfe durch Angebotsausweiterungen. KCW. Berlin. Online verfügbar unter https://www.kcw-online.de/media/pages/veroeffentlichungen/finanzierung-des-oepnv/6066a41265-1579615122/2019_finanzierung_des_oepnv_fin.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

Neutz, S. (2023): Suffizienzmaßnahmen als Instrument zur Bekämpfung des Klimawandels - Potentialabschätzung von Emissionsminderungen in Industriemodellen - Unveröffentlicht.

Nobis, C. (2022): Mobilität und Suffizienz: Die Notwendigkeit suffizienten Verhaltens für das Gelingen der Verkehrswende. DLR, Institut für Verkehrsorschung, 15.11.2022. Online verfügbar unter https://elib.dlr.de/193284/1/Mobilit%C3%A4t%20und%20Suffizienz_Nobis_20221115.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

Öko-Institut; Fraunhofer ISE (2022): Durchbruch für die Wärmepumpe - Praxisoptionen für eine effiziente Wärmewende im Gebäudebestand. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-04_DE_Scaling_up_heat_pumps/A-EW_273_Waermepumpen_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2023.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2025): Datentabelle zu den Szenarien CARESupreme und CARETech. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7984>

Oppermann, R.; Pfister, S. C.; Eirich, A. (Hg.) (2020): Sicherung der Biodiversität in der Agrarlandschaft - Quantifizierung des Maßnahmenbedarfs und Empfehlungen zur Umsetzung. Mannheim: Institut für Agrarökologie und Biodiversität (IFAB). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/346054168_Sicherung_der_Biodiversitat_in_der_Agrarlandschaft_-_Quantifizierung_des_Massnahmenbedarfs_und_Empfehlungen_zur_Umsetzung_Mannheim_191_Seiten_ISBN_978-3-00-066368-0, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

Pape, C.; Geiger, D.; Zink, C.; Thylmann, M.; Peters, W.; Hildebrandt, S. (2022): Flächenpotenziale der Windenergie an Land 2022. Fraunhofer IEE und Bosch & Partner (Hg.). Online verfügbar unter https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/02-planung/20220920_BWE_Flaechenpotentiale_Windenergie_an_Land.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

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, Studie im Auftrag BMF. Infras (Hg.). Zürich. Online verfügbar unter http://www.infras.ch/media/filer_public/d3/de/d3de69df-a4d9-4d4c-9367-60237b62b815/wirkunglvs_sb_infras_270612_zusammenfassung.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2025.

Petschow, U.; Zimmermann, T.; Distelkamp, M.; Lutz, C. (2008): Wirkungen fiskalischer Steuerungsinstrumente auf Siedlungsstrukturen und Personenverkehr vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeitsziele der Bundesregierung. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hg.). Online verfügbar unter https://www.ioew.de/publikation/wirkungen_fiskalischer_steueringinstrumente_auf_siedlungsstrukturen_und_personenverkehr_vor_dem_hi, zuletzt geprüft am 05.09.2020.

Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U. (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK - Öko-Institut Working Paper 4/2023. Öko-Institut (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf>, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045: Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann - Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P.; Adlunger, K.; Balzer, F.; Berger, J.; Bernicke, M.; Bertram, A.; Biewald, A.; Dettling, F.; Drosihn, d.; Fee, E.; Futterlieb, M.; Gromke, U.; Günther, D.; Hain, B.; Herbener, R.; Hofmeier, K.; ... Werlein, M. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE-Studie (Climate Change). Umweltbundesamt (Hg.). DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-2677>.

Repenning, J.; Harthan, R. O.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Rausch, L.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; ... A.; Adam, S. (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. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/proJEktionsbericht_2021_uba_website.pdf, zuletzt geprüft am 14.08.2023.

Repenning, J.; Harthan, R.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Göckeler, K.; Görz, W. K.; Hacker, F.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Kasten, P.; Kreye, K.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Moosmann, L.; Nissen, C.; ... Steinbach, J. (2023): Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030 (Climate Change). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-2617>.

Schade, W.; Haug, I.; Berthold, D.; Flämig, H.; Beck, K.; Anstett, P.; Neuling, U.; Walther, C. (2022): Bewertung von Maßnahmen für ein Sofortprogramm nach Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) - Kurz-Report im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung und Begleitung des BMDV zur Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS-III). M-Five (Hg.). Karlsruhe. Online verfügbar unter https://rad.sh/wp-content/uploads/2022/09/22-09-12-2022_Gutachten-fuer-BMDV_Bewertung-von-Massnahmen-fuer-ein-Sofortprogramm-nach-Bundes-Klimaschutzgesetz.pdf, zuletzt geprüft am 04.09.2025.

Schlomann, B.; Rohde, C.; Bentele, S. (2021): Mögliche Ausgestaltung eines Energieeinsparverpflichtungssystems für Deutschland - Abschlussbericht (Climate Change). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-2666>.

Schmaus, M.; Bawidamann, J.; Friedrich, M.; Haberl, M.; Trenkwalder, L.; Fellendorf, M.; Uhlig, J.; Lohse, R.; Pestel, E. (2023): Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung (Texte). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-6499>.

SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP (Hg.) (2021): Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Online verfügbar unter

https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, zuletzt geprüft am 14.07.2023.

The EAT-Lancet Commission on Food, Planet, Health (Hg.) (2019): Healthy Diets From Sustainable Food Systems - Food, Planet, Health. Online verfügbar unter https://eatforum.org/content/uploads/2019/01/EAT-Lancet_Commission_Summary_Report.pdf, zuletzt geprüft am 21.06.2024.

Thünen-Institut (2017): Treibhausgasinventur 2017. Online verfügbar unter <https://bwi.info/start.aspx>, zuletzt aktualisiert am 18.01.2024, zuletzt geprüft am 18.01.2024.

UBA - Umweltbundesamt (2023): Datenausspielung aus der UBA-Datenbank "Zentrales System Emissionen" (ZSE). E-Mail mit Öko-Institut, 06.10.2023.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2022): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2020 (Climate Change). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-2962>.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2024): Nationales Inventardokument zum deutschen Treibhausgasinventar 1990-2022 - Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2024 (Climate Change). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/govreg/inventory/envzfm0va/DE_NID_2024_clean_13.03.2024_de.pdf, zuletzt geprüft am 17.04.2024.

VDV (Hg.) (2022): Deutschland steigt ein. - Abschlussbericht zur bundesweiten Marktforschung. Online verfügbar unter https://www.vdv.de/deutsche-bahn_vdv_9-euro-ticket-abschlussbericht.pdfx?forced=true, zuletzt geprüft am 04.09.2025.

WBAE - Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz beim BMEL (Hg.) (2020): Politik für eine nachhaltigere Ernährung - Eine integrierte Ernährungspolitik entwickeln und faire Ernährungsumgebungen gestalten. Gutachten. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmleb.de/SharedDocs/Archiv/Downloads/wbae-gutachten-nachhaltige-ernaehrung.pdf>, zuletzt geprüft am 07.12.2020.

Wehnemann, K.; Koßmann, M.; Purr, K.; Pagel, M.; Steinbrenner, J.; Voß-Stemping, J. (2025): Treibhausgas-Projektionen 2025 – Ergebnisse kompakt. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7821>.

Willett, W.; Rockström, J.; Loken, B.; Springmann, M.; Lang, T.; Vermeulen, S.; Garnett, T.; Tilman, D.; DeClerck, F.; Wood, A.; Jonell, M.; Clark, M.; Gordon, L. J.; Fanzo, J.; Hawkes, C.; Zurayk, R.; Rivera, J. A.; Vries, W. de; Majele Sibanda, L.; ... Murray, C. J. L. (2019): Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. In: *The Lancet* 393 (10170), S. 447–492. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31788-4.

Wirth, C.; Bruelheide, H.; Farwig, N.; Marx, J. M.; Settele, J. (Hg.) (2024): Faktencheck Artenvielfalt - Bestandsaufnahme und Perspektiven für den Erhalt der biologischen Vielfalt in Deutschland. München: Oekom. DOI: <https://doi.org/10.14512/9783987263361>

A Anhang: Maßnahmen und Instrumente CARESupreme

A.1 Einleitung

In diesem Dokument werden die sektoralen Narrative sowie die Instrumentenbeschreibungen und -parametrisierungen der Instrumente dargestellt, mit denen das Szenario CARESupreme abgebildet werden soll. Die übergreifende Definition der Narrative basiert auf dem Szenario GreenSupreme im RESCUE-Projekt. Die Weiterentwicklung in dieser Studie besteht darin, dass die Modellierung instrumenten- und nicht lediglich maßnahmengetrieben erfolgt.

Zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber wurde folgende Grundausrichtung für das Szenario abgestimmt:

- ▶ Treibhausgasminderung
 - 2030: -70 % ggü. 1990 (ohne LULUCF)
 - 2040: mind. -90 % (ideal -92 %) (ohne LULUCF)
 - 2045 treibhausgasneutral (mit LULUCF)
- ▶ Narrativ entspricht dem letzten GreenSupreme-Szenario (Purr et al. 2019).
- ▶ Klima- und Ressourcenschutz ist in Wirtschaft und Bevölkerung verinnerlicht
- ▶ Suffizienz ist wichtig, es handelt sich jedoch um kein reines Suffizienz-Szenario
- ▶ Gesamtwirtschaftliches Null-Wachstum ab 2035

Die Basis der Szenariodefinition wurde wie folgt festgelegt:

- ▶ Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) (Repenning et al. 2023)
- ▶ Bei der KIS-2030-Definition weggefallene Instrumente konnten wieder aufgegriffen werden
- ▶ Anschärfung und Erweiterung dieses Maßnahmenpaketes (auch um Suffizienzmaßnahmen)
- ▶ Politische Machbarkeiten mussten nicht berücksichtigt werden – es handelt sich um ein Idealszenario
- ▶ Hilfreiche Instrumente des Ampel-Koalitionsvertrags (SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP 2021) konnten übernommen werden
- ▶ Erkenntnisse aus RESCUE zur Ressourcenschonung sollten integriert werden

Die Ableitung der Instrumente wurde auf Basis der Instrumente des KIS-2030 (Repenning et al. 2023) vorgenommen. Über Diskussionen in Sektor-Workshops sollte eine schrittweise Annäherung der Instrumente an das CARESupreme-Narrativ stattfinden.

Instrumente und Maßnahmen, die mit „R“ gekennzeichnet sind, adressieren den Ressourcenverbrauch, Instrumente und Maßnahmen, die mit „S“ gekennzeichnet sind, beziehen sich auf Suffizienz.

A.2 Sektorübergreifende Maßnahmen und Instrumente

A.2.1 Bepreisung von Treibhausgasemissionen

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Für die CO₂-Preise im EU-ETS und im BEHG werden steigende Werte angenommen. Dabei entsprechen die Preise bis 2024 dem Projektionsbericht 2024 (Harthan et al. 2024). Danach sollen die Preise beider Systeme bis 2050 bei rund 355 €₂₀₂₂/t konvergieren.

Die CO₂-Preise werden CARESupreme und CARETech gleichermaßen angesetzt.

Parametrisierung

Tabelle 41: CO₂-Bepreisung (EU-ETS sowie BEHG)

Jahr	EU-ETS	BEHG
	€ ₂₀₂₂ /EUA	€ ₂₀₂₂ /t CO ₂
2005	29,90	
2006	24,76	
2007	26,03	
2008	30,57	
2009	17,84	
2010	19,08	
2011	14,58	
2012	9,99	
2013	5,78	
2014	7,45	
2015	9,26	
2016	6,33	
2017	6,79	
2018	18,31	
2019	27,92	
2020	27,33	
2021	57,13	26,47
2022	81,05	30,00
2023	82,00	28,28
2024	81,93	36,74
2025	96,34	106,91
2026	104,09	134,41

Jahr	EU-ETS	BEHG
2027	111,85	161,90
2028	119,60	189,39
2029	127,36	216,88
2030	133,01	243,84
2031	144,09	249,39
2032	155,17	254,93
2033	166,26	260,47
2034	177,34	266,01
2035	188,42	271,55
2036	199,51	277,10
2037	210,59	282,64
2038	221,68	288,18
2039	232,76	293,72
2040	243,84	299,26
2041	254,93	304,80
2042	266,01	310,35
2043	277,10	315,89
2044	288,18	321,43
2045	299,26	326,97
2046	310,35	332,51
2047	321,43	338,06
2048	332,51	343,60
2049	343,60	349,14
2050	354,68	354,68

Quelle: Harthan et al. (2024), Annahmen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, Umweltbundesamt

A.2.2 Reduktion von Lebensmittelabfällen und -verlusten (S/R)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Als sektorübergreifende Maßnahme wird im Klimaschutzprogramm 2030 die Reduktion der Lebensmittelabfälle genannt. Die Bundesregierung hat eine Nationale Strategie zur Reduzierung der Lebensmittelverschwendungen 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 dem 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 verzehrbbaren Lebensmitteln im Einzelhandel.

Für die Modellierung im Abfallsektor wird angenommen, dass das Ziel der Nationalen Strategie zur Reduktion der Lebensmittelabfälle bis zum Jahr 2030 erreicht werden kann.

A.2.3 Reduktion der Proteingehalte im Abwasser (S)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Durch verbraucherseitige Instrumente wie eine Erhöhung der Mehrwertsteuer auf Fleischprodukten oder die Einführung einer Treibhausgasbepreisung im Lebensmittelbereich soll eine Reduktion der Proteingehalte im Abwasser erreicht werden.

Die Parametrisierung erfolgt in Rückkopplung mit der Modellierung im Landwirtschaftssektor. Im Landwirtschaftssektor wird angenommen, dass der Konsum tierischer Produkte den Empfehlungen der Planetary Health Diet der EAT Lancet Kommission entspricht. Diese Entwicklungen werden hier übernommen.

A.2.4 Förderung von Agroforstsystemen

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Förderung von 200.000 ha Gehölzstreifen erfolgt bis 2027 entsprechend den Förderzielen der GAP, das entspricht einem jährlichen Zuwachs 40.000 ha. Nach 2027 wird der jährliche Zuwachs von 40.000 ha beibehalten. Bis 2050 werden damit ca. 1,1 Mio. ha als Agroforstsystem bewirtschaftet. Die Nutzung erfolgt zu je einem Drittel als Nussanbau, zur Holznutzung (Wertholz, Energieholz, Gehölze) oder und als Schattenbaum und Futtermittel (Laub) auf Weiden.

Es sind sowohl der LULUCF-Sektor als auch der Landwirtschaftssektor von dieser Maßnahme betroffen. Die Parametrisierung erfolgt in Rückkopplung beider Sektormodelle über die Fläche. Für den LULUCF-Sektor wird daraus die CO₂-Einbindung ermittelt, in der Landwirtschaft die Einsparung der Stickstoffdüngung und daraus resultierende Lachgasemissionen.

A.3 Energiewirtschaft

A.3.1 Ausstieg aus fossilen Brennstoffen in der Strom- und gekoppelten Fernwärmeverzeugung und Ausbau von Wasserstoffkraftwerken

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

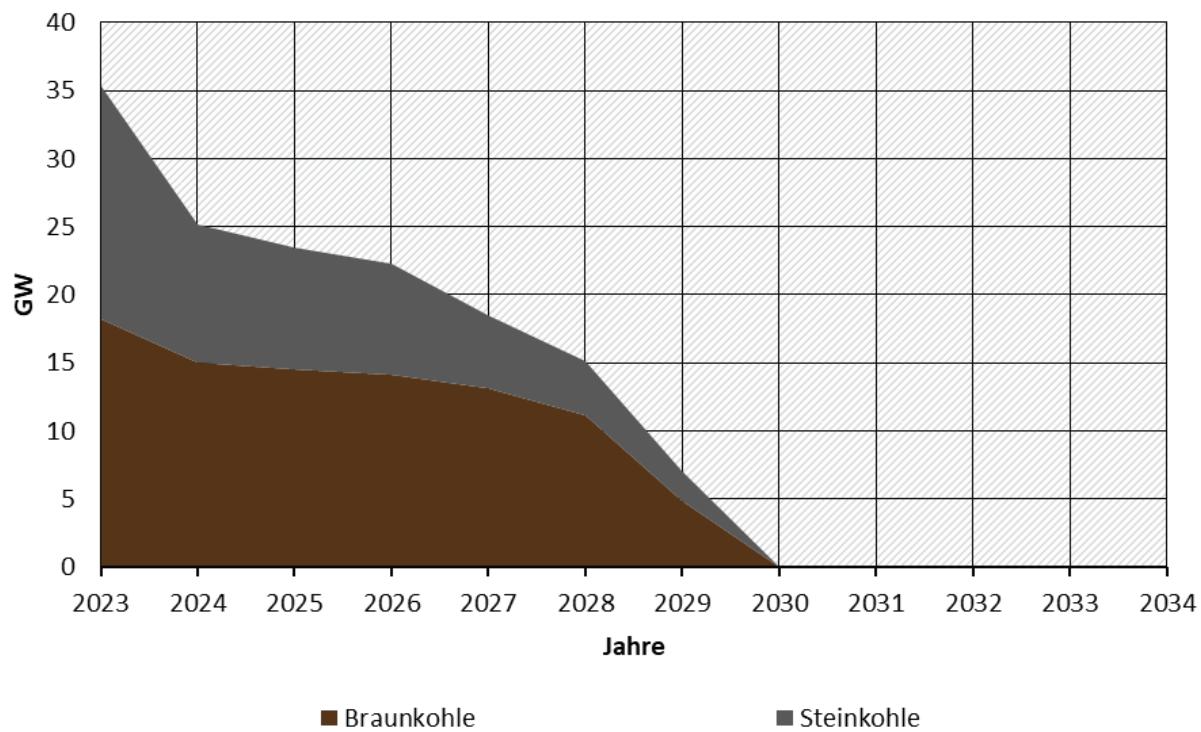
Kohle, Heizöl werden ab dem Jahr 2035 nicht mehr für die Strom- und gekoppelte Fernwärmeverzeugung im Sektor Energiewirtschaft verwendet. Das letzte Kohlekraftwerk wird dabei im Jahr 2029 abgeschaltet, das letzte Heizölkraftwerk im Jahr 2034. Der Erdgasausstieg erfolgt bis 2035 ebenfalls nahezu vollständig. Erdgaskraftwerke werden ab dem Jahr 2025 bedarfsgerecht auf die Nutzung von Wasserstoff umgerüstet bzw. durch neu errichtete

Wasserstoffkraftwerke ersetzt. Beim Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe bzw. dem Umstieg auf Wasserstoff wird berücksichtigt, dass eine gewisse Mindestleistung thermischer Kraftwerke in Deutschland vorgehalten wird. Diese richtet sich nach der Residuallast (Stromverbrauch abzüglich Stromerzeugung erneuerbarer Energien) und der Vorgabe nur moderater Strom-Importe aus europäischen Nachbarländern zuzulassen.

Parametrisierung

Kohlekraftwerke: Vergangene Studien (Agora KND 2045, (Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut 2021)) haben gezeigt, dass ein beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien (siehe Abschnitt A.3.3) zusammen mit hohen bzw. deutlich steigenden Preisen für Emissionszertifikate im EU-Emissionshandelssystem (*European Union Emissions Trading System*, EU ETS, siehe übergreifendes Instrument in Abschnitt A.2.1) zu einem fast vollständigem Rückgang der Kohleverstromung bis zum Jahr 2030 führen. Zudem zeigen Berechnungen des Öko-Instituts (Hermann et al. 2021), dass aktuelle und mittelfristige Deckungsbeiträge nicht ausreichen, um die Fixkosten von Kraftwerken und Tagebauen zu decken. Dies reizt die Stilllegung der Anlagen an, wobei der genaue Zeitpunkt davon abhängt, wann die entsprechenden Fixkosten abgebaut werden können. Weil dies jedoch für die Kraftwerke und Tagebaue in Einzelnen unklar ist, wird dem Strommarktmodell ein exogener Stilllegungspfad vorgegeben, nach welchem das letzte Kohlekraftwerk im Jahr 2029 abgeschaltet wird.

Abbildung 87: Installierte Leistung der Kohlekraftwerke



Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

Kuppelgase, Heizöl und nicht-biogener Anteil des Abfalls: Kuppelgase (Raffineriegas, Gichtgas, Kokereigas, sonstige Kuppelgase) fallen durch Aktivitäten in anderen Sektoren an bzw. ihr Aufkommen wird durch Aktivitäten in anderen Sektoren bestimmt. Dies betrifft vor allem die Stahlherstellung mit fossilen Technologien (die es 2045 nicht mehr gibt) sowie die Nachfrage nach Mineralölprodukten wie Kraftstoffen und Heizöl. Ihre Nutzung in Kraftwerken geht entsprechend der Dekarbonisierung der Sektoren Industrie und Verkehr zurück. Gleiches gilt für

die Nutzung von schwerem Heizöl als Kuppelprodukt des Raffineriebetriebs. Nach dem Jahr 2035 können diese Brennstoffe, ebenso wie der nicht-biogene Anteil des Abfalls, noch in geringem Umfang zur Strom- und FernwärmeverSORGUNG genutzt werden. Die Nutzung von leichtem Heizöl in Kraftwerken der Energiewirtschaft (und Industrie) wird hingegen zum Jahr 2034 beendet.

Gaskraftwerke und Gesamtleistung thermischer Kraftwerke: Ab dem Jahr 2026 beginnt der Ausstieg aus der Nutzung von Erdgas und ist im Sektor Energiewirtschaft bis zum Jahr 2039 vollständig abgeschlossen. Zugleich geht das erste wasserstoffbefeuerte Kraftwerk im Jahr 2027 in Betrieb. Der konkrete Pfad der Substitution von Erdgas zu Wasserstoff richtet sich hierbei danach, inwiefern die jährliche inländische Residuallast (Stromverbrauch abzüglich der Einspeisung erneuerbarer Energien) bei mittelfristig moderaten und langfristig (Richtung 2040) ausgeglichenem oder negativen Importsaldo durch den Einsatz der verbleibenden Kohle- und Gaskraftwerke sowie der neuen Wasserstoffkraftwerke bei plausiblen Vollbenutzungsstunden gedeckt werden kann. Neue Kraftwerke, die mit anderen strombasierten Kraft- oder Brennstoffen betrieben werden (PtL, PtG bzw. „synthetisches Methan“), werden nicht errichtet. Erdgaskraftwerke, die dem Sektor Industrie zugeordnet sind, können entsprechend den Instrumenten und Maßnahmen zur Dekarbonisierung dort, in geringerem Umfang noch über 2035 hinweg betrieben werden.

A.3.2 Aufbau von Carbon Capture-Anlagen für die Erzeugung von Negativ-Emissionen

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Auf Grund der Unsicherheit in der Emissionsentwicklung, insbesondere im LULUCF-Sektor, aber auch in den anderen Sektoren, soll über alle Sektoren hinweg eine Nettosenke als Sicherheitspuffer zur Treibhausgasneutralität von rund -15 Mio. t CO₂ verbleiben. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen auch in der Energiewirtschaft in beschränktem Umfang Carbon Capture-Technologien bei den verbleibenden fossilen und den biogenen Emissionsquellen zum Einsatz kommen. Abfall mit seinem fossilen und biogenen Anteil spielt hier die zentrale Rolle. Es wird angenommen, dass die großen städtischen und weiteren Müllverbrennungsgrößtanlagen sukzessive mit Post-Combustion-Capture ausgestattet werden.

Parametrisierung

Es wird angenommen, dass alle Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung über 100 MW_{th} sukzessive mit Post-Combustion-Capture ausgestattet werden. Daraus ergibt sich, dass im Jahr 2035 5 %, im Jahr 2040 30 % und im Jahr 2045 60 % der installierten Leistung mit Post-Combustion-Capture ausgestattet sind. Als zusätzliche Energienachfrage für die CO₂-Abscheidung werden 0,315 MWh_{el} pro abgeschiedene t CO₂ angenommen (Muslemani et al. 2023), und eine Abscheiderate von 90 % angenommen.

A.3.3 Beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Im Szenario CARESupreme werden die erneuerbaren Energien zügig ausgebaut, um eine zeitnahe Dekarbonisierung im Sektor Energiewirtschaft zu erreichen. Als Quelle für die mittelfristige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dient das EEG 2023. Für den Ausbau der Windenergie auf See wird für die installierte Leistung die Kapazität des Übertragungsnetzes mitbedacht. Die Nutzung von Biomasse zur Erzeugung von Strom und Fernwärme ist mittelfristig auf Reststoffe beschränkt.

Parametrisierung

Der Ausbau der Solarenergie und Windenergie an Land erfolgt grundsätzlich entsprechend den Ausschreibungen und Zielen des EEG 2023. Für den Startpunkt der Modellierung werden für die Ausbaupfade die in Tabelle 42 angegebenen Leistungen angenommen.

Für Windenergie auf See wird bis 2038 ein Ausbau entsprechend dem Entwurf des Flächenentwicklungsplans (FEP) mit Stand Juli 2022 zugrunde gelegt (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 2022). Um das Ziel von 70 GW installierter Leistung im Jahr 2045 gemäß Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG) zu erreichen, wird ab 2040 von einem weiteren, moderaten Zubau auf noch nicht im FEP ausgewiesenen Flächen ausgegangen sowie von einem Repowering von Windparks am Ende ihrer technischen Lebensdauer mit moderat erhöhter Leistung.

Die Entwicklung der Bioenergie richtet sich nach der auslaufenden Verfügbarkeit von fester und gasförmiger Biomasse für den Stromsektor, die von der Nachfrage nach Biomasse aus anderen Sektoren bei beschränktem Biomasse-Angebot abhängt. Auch hier können die Zahlen im Verlauf der Modellierung von den in Tabelle 42 gegebenen Werten abweichen. Für Wasserkraft (Laufwasser, Speicherwasser) und Geothermie wird ein moderater Zubau angenommen.

Tabelle 42 zeigt die installierten Leistungen zur Jahresmitte (relevant für die durch nicht einlastbaren EE-Anlagen erzeugbare Strommenge) und zum Jahresende⁸².

Tabelle 42: Installierte Leistungen (Jahresmitte und Jahresende) der erneuerbaren Energien im CARESupreme-Szenario

Technologie	Einheit	Stichtag*	2019	2025	2030	2035	2040	2045
Windkraft an Land	GW	JM	53	64	110	152	160	160
Windkraft an Land	GW	JE	53	67	115	157	160	160
Windkraft auf See	GW	JM	7	10	27	46	59	70
Windkraft auf See	GW	JE	8	11	31	48	60	70
Photovoltaik	GW	JM	47	105	204	301	390	400
Photovoltaik	GW	JE	49	114	215	309	400	400

Anmerkungen: *JM: Jahresmitte; JE: Jahresende

Quelle: Eigene Annahmen und Darstellung Öko-Institut

Rahmenbedingungen

Angelehnt an den ehrgeizigen Ausbau der erneuerbaren Energien wird auch für den Zubau von Batteriespeichern ein ambitionierter Pfad für Batteriespeicher angenommen. Der Ausbau ist dabei, der Logik im Projektionsbericht 2024 (Harthan et al. 2024) beschriebenen Logik folgend, an den Ausbau von PV-Dachanlagen, PV-Freiflächenanlagen sowie Windanlagen an Land geknüpft. Damit steigt die installierte Leistung von Kleinbatteriespeichern auf rund 20,6 GW im Jahr 2030 und dann weiter, sodass ab 2040 rund 37,2 GW verfügbar sind. Im gleichen Zeitraum steigt die installierte Leistung der Großbatteriespeicher von 6,8 GW im Jahr 2030 auf 14,9 GW im Jahr 2040 und weiter auf 16,1 GW im Jahr 2045. Für Kleinbatteriespeicher beträgt das

⁸² Bei sehr hohen unterjährigen Ausbauraten weichen die Werte zur Jahresmitte von denen der installierten Leistung zum Jahresende, die in Zielformulierungen gemeint sind, teils erheblich ab.

Verhältnis von Speicherkapazität zu installierter Leistung 1,8 kWh/kW, für Großbatteriespeicher beträgt es 1,1 kWh/kW.

Für Pumpspeicher geht das CARESupreme-Szenario, dem mittleren Szenario B des Netzentwicklungsplan (NEP) 2023 (BNetzA 2022) folgend, davon aus, dass die an das deutsche Übertragungsnetz angeschlossene Leistung bis zum Jahr 2035 moderat auf 11,1 GW ansteigt.

Für zeitflexible Stromverbraucher, insbesondere im Sektor Industrie, wird Netzentwicklungsplan (NEP) 2023 (BNetzA 2022) folgend davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2045 rund 10 GW der Nachfrage verschoben werden können. Neue Stromverbraucher im Bereich der Mobilität (batterieelektrische Fahrzeuge) und Fernwärme (Großwärmepumpen) werden entsprechend ihres Speichers und der Energienachfrage ebenfalls als zeitflexibel angesehen.

Die Pfade für die Entwicklung des Kraftwerksparks und der erneuerbaren Energien im europäischen Ausland folgen dem Szenario *Global Ambition des Ten Year Network Development Plan (TYNDP)* 2022 des ENTSO-E (ENTSOG; ENTSO-E 2022). Sie betonen die Entwicklung in Deutschland in einer ambitionierten Dekarbonisierung im europäischen Ausland ein. Um eine Stromversorgung weitgehend aus inländischen Quellen in der Jahressumme zu garantieren, wird als Randbedingung ein ausgeglichener oder negativer Importsaldo Richtung 2040 und danach angestrebt.

A.3.4 Dekarbonisierung der Fernwärme

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Im Szenario CARESupreme wird auch die Versorgung mit netzgebundener Wärme zügig dekarbonisiert. Hierzu dient zum einen der Ausstieg aus der Nutzung von Kohle sowie Erdgas und Heizöl in Kraftwerken des Sektors Energiewirtschaft bis 2029 bzw. 2034, zusammen mit dem Ausbau der wasserstoffbefeuerten Kraftwerke (siehe Instrument in Abschnitt A.3.1). Hierbei werden die Wasserstoffkraftwerke der öffentlichen Versorgung grundsätzlich als stromgeführt betrachtet und sind in der Fernwärmeverzeugung nur bei einer ausreichenden Zahl an Vollbenutzungsstunden aktiv. Während die fossil befeuerten Kraftwerke der Energiewirtschaft (abgesehen vom nicht-biogenen Anteil des Abfalls) bis spätestens 2034 abgeschaltet sind, können analog zur Stromerzeugung Erdgas- und Kuppelgaskraftwerke des Sektors Industrie über dieses Datum hinaus in geringerem Umfang betrieben werden und dabei zur Versorgung mit netzgebundener Wärme des Sektors Industrie dienen.

Zum anderen wird die erneuerbare Fernwärme (Solarthermie, Geothermie, Abwärme, Wärmepumpen) ausgebaut. Der Ausbau beruht dabei auf den Instrumenten der kommunalen Wärmeplanung, der Verpflichtung öffentlicher Eigentümer, Flächen für erneuerbare Fernwärmesysteme bereitzustellen, sowie der Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW).

- ▶ Die kommunale Wärmeplanung ist die Verpflichtung der Bundesländer zur Erstellung kommunaler Wärmepläne. Hierbei können die Länder die Pflicht auch auf die kommunale Ebene oder regionale Planungsverbände übertragen. Die Pläne umfassen eine Aufnahme des Status Quo, die Definition von Zielen, die Identifikation von Einspar- und Dekarbonisierungspotenzialen sowie die Ausarbeitung von Maßnahmen. Als Grundlage effektiver und effizienter Entscheidungen wird die kommunale Wärmeplanung im Kontext der Berechnung des Szenarios als Voraussetzung zur Dekarbonisierung angesehen und nicht gesondert parametrisiert.

- ▶ Die Energieflächenverpflichtung öffentlicher Eigentümer einen Prozentsatz an Flächen in kostenloser Erbpacht für erneuerbare Wärmeprojekte zur Verfügung zu stellen.
- ▶ Die BEW adressiert gezielt die Förderung der erneuerbaren Fernwärme durch die Förderung von Einzelmaßnahmen und systemische Förderung für Netze.

Die Nutzung von Biomasse (fest, gasförmig) zur Fernwärmeverzeugung geht, analog zur Stromversorgung, mittelfristig auf den Einsatz von Rest- und Abfallstoffen zurück.

Parametrisierung

Der Ausbaupfad der alternativen Fernwärmeverzeugung orientiert sich an der Studie Klimaneutrales Deutschland 2045 (Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut 2021). Die entsprechenden Annahmen zur netzgebundenen Wärmebereitstellung durch Solarthermie, Abwärme, Geothermie und Wärmepumpen im zeitlichen Verlauf ist in Tabelle 43 dargestellt. Des Weiteren werden die verbleibenden Abfall- und Biomassekraftwerke zur Wärmeerzeugung beitragen sowie Wasserstoff-KWK-Anlagen. Es handelt sich bei Tabelle 43 um vorläufige Annahmen, sobald die gesamte Fernwärmennachfrage, die Modellierungsergebnis ist, bekannt ist, kann ein Nachjustieren der genauen Bereitstellung der Fernwärme nochmal nötig sein.

Tabelle 43: Leistung von EE-Fernwärme im Szenario CARESupreme

Technologie		2019	2025	2030	2035	2040	2045
Solarthermie	GW	0,0	2,0	7,0	12,0	12,0	13,0
Abwärme	GW	0,1	0,7	1,3	1,8	1,8	1,8
Geothermie	GW	0,0	0,7	1,7	2,3	2,7	3,0
Großwärmepumpen	GW	0,0	0,3	5,0	9,7	15,0	16,7
Power-to-Heat	GW	0,2	3,6	6,5	12,0	18,0	22,0
Gesamt	GW	0,3	9,2	23,4	39,9	51,5	58,5

Quelle: (Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut 2021), eigene Annahmen Öko-Institut

A.3.5 Ausbau der Elektrolyse

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Im CARESupreme-Szenario werden die Elektrolysekapazitäten in Deutschland zügig ausgebaut. Die Wasserstofferzeugung dient zum einen der Deckung des Wasserstoffverbrauchs aus dem Sektor Industrie. Dieser steigt mittelfristig vor allem durch eine Umstellung von Produktionsprozessen deutlich an. Zum anderen erfordert der Ausbau von Wasserstoffkraftwerken in Deutschland eine verstärkte Erzeugung von Wasserstoff. Grundsätzlich wird hierbei der Bedarf an Wasserstoff für die energetische Nutzung durch inländische Erzeugung gedeckt. Wasserstoff für die stoffliche Nutzung sowie strombasierte Flüssiggiftstoffe (PtL) werden hingegen komplett importiert.

Da im CARESupreme-Szenario die Nachfrage nach Mineralölprodukten sehr schnell und sehr stark zurückgeht, werden anders als in der Wasserstoffstrategie der Bundesregierung vorgesehen, keine Elektrolyseure in Raffinerien angenommen, um Stranded Investments zu vermeiden.

Parametrisierung

Es wird angenommen, dass zeitnah große Kapazitäten von Elektrolyseuren gebaut werden müssen, um die Nachfrage der Sektoren nach Wasserstoff sowie den Bedarf zur Rückverstromung zu decken. Für den Ausbaupfad wird ein ambitionierter und gleichzeitig plausibler jährlicher Zubau angenommen. Abhängig von der finalen Wasserstoffnachfrage aus den Sektoren, kann es nötig sein, den Elektrolyseurausbaupfad nachträglich anzupassen, um die gesamte energetische Nachfrage der Endverbraucher und der Rückverstromung in Wasserstoffkraftwerken zu decken.

A.3.6 Umstellung von einem Erdgasnetz auf ein Wasserstoffnetz

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Das Erdgasnetz in Deutschland umfasst im Jahr 2020 knapp 34.000 km Transportnetz und über eine halbe Million Kilometer Verteilnetz (UBA 2022). Um das Gasnetz treibhausgasneutral zu machen, gibt es drei Optionen:

- ▶ Umrüstung auf Wasserstoff;
- ▶ Rückbau;
- ▶ Stilllegung ohne Rückbau (z.B. durch Befüllung mit Inertgas).

Welche der drei Optionen gewählt werden kann, hängt von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten ab. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass es einen gewissen Zeitverzug gibt zwischen Rückgang des Erdgasverbrauchs und Möglichkeit zum Rückbau des Gasnetzes, da ein Netzstrang erst dann stillgelegt werden kann, wenn der letzte Verbrauch an diesem Strang umgerüstet ist.

Im Gasnetz gibt es Verdichter, die mit Erdgas befeuerten Gasturbinen angetrieben werden. Verdichter können auch elektromotorisch angetrieben werden. „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 CO₂-Äq.. Die damit verbundene mechanische Antriebsarbeit lässt sich mit einem angenommenen Wirkungsgrad von 35 % für eine Gasturbine mit 8,3 J abschätzen. Würden diese Gasturbinen komplett durch Elektromotoren ersetzt werden, würde dies eine zusätzliche Stromnachfrage von 2,3 TWh bzw. 8,3 PJ bedeuten“ (Repenning et al. 2023).

Parametrisierung

Erdgas besteht hauptsächlich aus Methan, das ein starkes Treibhausgas ist. Wasserstoff ist kein direktes Treibhausgas. Daher ist für die Berechnung der diffusen Emissionen aus dem Gasnetz nur das Erdgasnetz, nicht aber das Wasserstoffnetz relevant. Da das Wasserstoffnetz nicht explizit modelliert ist, führen alle drei oben genannten Maßnahmenoptionen zu den gleichen parametrisierenden Größen: den verbleibenden Netzlängen im Erdgastransport- und Verteilnetz. Konkret wird folgende Parametrisierung für die Netzlängen vorgeschlagen:

- ▶ Bis 2030 ändert sich an der Länge des Erdgasnetzes nichts, da noch zu viele Verbraucher am Netz hängen und daher noch kein nennenswerter Rückbau stattfinden kann. Dies stellt aber immerhin einen Fortschritt gegenüber dem Status quo dar, denn aktuell gibt es Planungen für einen Ausbau der Erdgasinfrastruktur (siehe z.B. den aktuellen Entwurf zum Netzentwicklungsplan Gas (FNB Gas - Die Fernleitungsnetzbetreiber 2023)).

- Der Rückbau nach 2030 erfolgt bis 2050 und nicht 2045, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass es einen gewissen Zeitverzug zwischen Rückgang des Erdgasverbrauchs und der Möglichkeit zum Rückbau des Gasnetzes gibt.

Die Parametrisierung der Verdichter im Erdgasnetz erfolgt in Anlehnung an Repenning et al. (2023): Für das CARESupreme-Szenario „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“ (Repenning et al. 2023). Auch für Verdichter im Wasserstoffnetz wird ein entsprechender Mix aus Verdichtern mit Gasturbinen und Verdichtern mit Elektromotoren unterstellt. Die Nutzung von Verdichtern mit Gasturbinen im Wasserstoffnetz ermöglicht eine gewisse Unabhängigkeit vom und Redundanz zum Stromnetz.

A.3.7 Weitere Maßnahmen der sonstigen Energiewirtschaft

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

In Deutschland wird nach wie vor in geringem Umfang Erdgas und Erdöl gefördert. Im Jahr 2020 waren dies knapp 5,2 Milliarden Kubikmeter Erdgas und 1,9 Millionen Tonnen Erdöl (UBA 2022). Diese Förderung ist seit Mitte der 2000er Jahre rückläufig. Eine weitere Förderung von Erdgas und Erdöl ist mit den Zielen von CARESupreme nicht vereinbar. Zudem zielt das CARESupreme-Szenario darauf, aus der Nutzung fossiler Brennstoffe auszusteigen. Zum anderen führt die Förderung und Aufbereitung von Erdgas und Erdöl selbst zu Emissionen, die durch einen Ausstieg aus der inländischen Förderung vermieden werden können.

Parametrisierung

Im Einklang mit dem Ziel, die Energiewirtschaft bis 2035 weitmöglichst zu dekarbonisieren, wird die Erdgas- und Erdölförderung so parametrisiert, dass sie im Jahr 2035 null erreicht.

A.4 Industrie

A.4.1 Eisen und Stahl

Im Subsektor Eisen und Stahl gibt es drei wesentliche Hebel für die Zielerreichung: Umstellung der Primärproduktion (Konsistenz), Erhöhung des Sekundärrouutenanteils (Konsistenz/Effizienz) und Reduktion der Rohstahlnachfrage (Effizienz/Suffizienz).

Umstellung der Primärproduktion

Die Primärproduktion von Stahl (konventionell über die kohle-/koksbasierte Hochofenroute) wird bis 2040 (Ausstieg aus der Kohlenutzung) vollständig auf die wasserstoffbasierte Direktreduktion (H_2 -DRI) umgestellt. Durch weitere Instrumente sinkt die Primärproduktion von (2018) 30 Mt auf (2045) 13 Mt. Das maßgebliche Instrument zur Erreichung der technologischen Umstellung ist die Subventionierung der deutlich höheren OPEX der H_2 -DRI-Route über Klimaschutzverträge. Es wird ergänzt durch Grüne Leitmärkte und einen europäisch

wirksam geschützten Markt⁸³ (z.B. CBAM). Hinzu kommen Maßnahmen (nicht durch Instrumente hinterlegt), die den benötigten Wasserstoff an den Standorten verfügbar machen (Erzeugung, Transport, Verteilung).

Das benötigte Budget für die hinreichende Subventionierung der H₂-DRI Betriebskosten und der Investitionen in neue Anlagen ist unsicher, wird aber bis 2035 auf 22 G€ geschätzt⁸⁴. Hernach wären die neuen Anlagen (bei den angenommenen Rahmendaten) ohne Betriebskostenförderung marktfähig.

Erhöhung des Sekundärrouutenanteils (R)

Im Zuge der Reduktion der Primärstahlerzeugung wird die Sekundärroute ausgebaut. Bis 2045 steigt die Produktionsmenge von 13 Mt (2018) auf 25 Mt. Der Sekundärrouutenanteil an der Gesamterzeugung steigt damit von 30 % (2018) auf 66 %. Dieser ist im Wesentlichen durch die Gesamtproduktionsmenge und die Verfügbarkeit hochqualitativer Schrotte begrenzt. Die Schrottverfügbarkeit kann durch eine Verringerung des (in-)direkten Schrottexports (bspw. Altfahrzeuge), der Verringerung der Schrottnutzung in anderen Prozessen (bspw. Eisenguss)⁸⁵ und durch eine verbesserte Sammlung und Aufbereitung von Stahlschrotten erhöht werden⁸⁶. Zusätzlich werden Stahlschrotte, die bisher in der Hochofenroute genutzt wurden, eingesetzt. Außerdem kann das Mischen von Schrotten niedriger Qualität mit hochqualitativen DRI die Qualität des hergestellten Stahls auf das gerade benötigte Niveau heben – und so eine effizientere Mischung erzeugen. Instrumente, um die Verfügbarkeit von hochqualitativen Schrotten zu steigern sind folglich Vorgaben zur besseren Sammlung und Sortierung von Stahlschrotten und die Regulierung des (in-)direkten Exports von Stahlschrotten. Für die Prüfung, Nachverfolgung und Mischung von Schrotten können weitgehend digitalisierte Verfahren notwendig, sicher, aber hilfreich sein. Eine reduzierte Nachfrage nach Stahlprodukten sorgt für einen relativ gesehen höheren Rücklauf von Schrotten aus der Nutzungsphase. Langfristig reduziert eine sinkende Stahlnachfrage jedoch die Schrottverfügbarkeit.

Reduktion der RohstahlNachfrage (R, S)

Die Stahlnachfrage hat direkten Einfluss auf die benötigten Stahlmengen aus der Primär- und Sekundärroute sowie die Schrottverfügbarkeit. Bis 2045 sinkt die Stahlnachfrage von 44 Mt (2018) auf 38 Mt. Dies wird hauptsächlich durch Nachfragereduktionen des Hauptabnehmers Bau verursacht. Da bis 2045 der Pro-Kopf-Flächenbedarf sinkt (S) und der Anteil Holzbau im Wohnbau (R) zunimmt, sinkt die Stahlnachfrage gegenüber 2018 um rund 4 Mt. Weitere Nachfragereduktionen (2 Mt) können der effizienteren Materialnutzung in allen Stahlprodukten zugeordnet werden. Instrumente für Letzteres sind Vorgaben zum Design von Stahlprodukten, in denen Stahl eingesetzt wird. Dies sind beispielweise Standards und Normen, die Nutzung von Building-Information-Modelling (BIM) und Vorgaben zu Fertigbauteilen im Baubereich.

⁸³ Nicht modelliert, sondern als gegeben angenommen.

⁸⁴ Davon entfällt unter den angenommenen Rahmendaten ein großer Teil auf die Förderung von Investitionen (Annahme: 1000 €/t Rohstahlkapazität). Hohe Wasserstoff- und niedrige CO₂-Preise lassen das Verhältnis von CAPEX zu OPEX aber schnell kippen.

⁸⁵ Es wird davon ausgegangen, dass die steigenden Preise für Stahlschrott, die Nutzung außerhalb der Stahlherstellung, begrenzen. Es wird angenommen, dass diese bis 2040 von rund 4 Mt auf 0 Mt sinken wird. Dies ist eine Entwicklung, die sich bereits heute im Eisenguss abzeichnet.

⁸⁶ Aktuell gibt es rund 15 % dissipative Verluste zwischen Schrottentstehung und -verwendung. Für das Szenario wird einer Verbesserung um 10 %-Punkte angenommen. Da es basierend auf statistischen Daten nicht möglich ist, die dissipativen Verluste zuzuordnen, ist dies jedoch mit Unsicherheit behaftet.

A.4.2 Verarbeitung von Steinen und Erden (hier: Zement)

In der Herstellung von Zement sind drei maßgebliche Hebel bestimmd für das Szenario: Reduktion der Produktionsmenge (Effizienz, Konsistenz, Suffizienz), Umstellung der Prozesswärmeerzeugung und Adressierung der prozessbedingten Emissionen (Konsistenz). Ein historisch wichtiger Hebel, der Klinkeranteil im Zement, wird als konstant angenommen, da die Verfügbarkeit von Klinkersubstituten durch den Kohle- und Hochofenausstieg unklar ist⁸⁷. Die Konstanz dieser Kennzahl ist damit bereits ambitioniert.

Reduktion der Nachfrage (R, S)

In Verknüpfung mit Instrumenten im Gebäude- und Verkehrssektor sinkt die Zementnachfrage von (2018) 35 Mt auf (2045) 20 Mt. Dies ist analog zu Stahl durch den rückläufigen Pro-Kopf-Flächenbedarf (S) und den Holzbau (R) sowie zusätzlich durch den reduzierten Tiefbau (S) verursacht. Zusätzlich trägt wie bei Stahl die Steigerung der Materialeffizienz im Baubereich zu einer Nachfragereduktion bei (R). Die dafür bestimmenden Instrumente wirken im Allgemeinen auf die Bautätigkeit. Hinzu kommen Instrumente der Materialeffizienz, also die Anpassung der Standards und Normen, BIM und Fertigbauteile, um die Überspezifikation von Bauteilen zu reduzieren.

Umstellung der Prozesswärme

Die Erzeugung der benötigten Prozesswärme wird technologisch auf einen Mix aus biogenen Abfallstoffen (2045: 50 %) und direkter (2045: 30 %) sowie indirekter Elektrifizierung (geringe Anteile Wasserstoff) und hochkalorischer Ersatzbrennstoffen (2045: 20 %) umgestellt. Berücksichtigte Instrumente hierfür sind ein deutlich reduzierter Strompreis für die Erzeugung industrieller Prozesswärmee (Größenordnung 4-5€ct/kWh) und Umstellung der Kunststoffproduktion (Großteil der Abfallmengen) auf eine Rohstoffbasis ohne fossile Brennstoffe.

Adressierung von prozessbedingten Emissionen (R)

Im Szenario wird keine Form der CO₂-Abscheidung (weder mit Speicherung noch Nutzung) berücksichtigt. Der Großteil der durch die Entsäuerung des Kalksteins entstehenden prozessbedingten Emissionen verbleiben daher innerhalb des Subsektors wie der Industrie insgesamt unadressiert. Ein Teil der prozessbedingten Emissionen wird aber durch die Nutzung von innovativen Bindemitteln gemindert. Bis 2045 wird ein Anteil von 10 % (2 Mt) an der Gesamtproduktion angenommen. Dies mindert die verarbeitete Menge Kalkstein. Wichtige Instrumente, um dies zu ermöglichen, sind eine beschleunigte Zulassung der Werkstoffe für den Massenmarkt sowie Grüne Leitmärkte, z.B. in der öffentlichen Beschaffung⁸⁸.

A.4.3 Verarbeitung von Steinen und Erden (hier: Kalk) (R, S)

Die Kalkproduktion sinkt bis 2040 etwa um 40 %, da mit Kohlekraftwerken und Hochöfen wichtige Nachfrager vollständig bzw. (Produktion von Stahl in Direktreduktionsanlagen als Ersatz für Hochöfen) teilweise wegfallen. Hinzu kommt steigende Materialeffizienz und Bedarfsreduktion durch Aktivitätsrückgang anderer Prozesse, die Kalk nutzen. Dies sind die Rauchgasreinigung, die Herstellung von Baustoffen, Chemie und Landwirtschaft. Die

⁸⁷ Es existieren Optionen (Klärschlamm, Schlacke aus anderen metallurgischen Prozessen, Ton/Puzzolane, verstärkter Einsatz ungebrannten Kalksteins ...). Deren Verfügbarkeit und wirtschaftliche Verwertungsfähigkeit ist aber unsicher.

⁸⁸ Die unterstellten Mengen innovativer Bindemittel können leicht von der Nachfrage der öffentlichen Hand absorbiert werden.

Prozesswärmeverzeugung wird stark elektrifiziert (2045: 80 %), ergänzt durch Wasserstoff, wo dies aufgrund gewünschter Produkteigenschaften notwendig ist.

A.4.4 Grundstoffchemie

Ethylen (Olefine)

Die Produktion von Olefinen wird von der auf fossilem Öl (Naphtha) basierten Route bis 2045 vollständig auf wasserstoffbasierte Verfahren umgestellt. Dabei gibt es zwei Varianten, die sowohl bilanziell für Deutschland als auch technologisch deutlich unterscheidbar sind. Das Szenario legt den Fokus auf die Methanol-to-Olefines-Route (MtO), in der aus Wasserstoff und CO₂ erzeugtes Methanol zu Olefinen synthetisiert wird. Dies kann vollständig inländisch oder mit importiertem Wasserstoff geschehen. Im Szenario werden bis 2045 75 % (3 Mt) der Ethylenproduktion⁸⁹ so hergestellt. Ergänzend wird 1 Mt über das Aufspalten (Cracken) importierter wasserstoffbasierter Flüssig-Kohlenwasserstoffe (PtL) erzeugt. Außerdem werden rückläufige Produktionsmengen berücksichtigt (2018: 4,5 Mt, 2045: 4 Mt). Diese sind sowohl auf nachfrageseitige Veränderungen wie bspw. eine reduzierte Nachfrage nach Kunststoffen (S) als auch auf das vermehrte Kunststoffrecycling (R) rückzuführen. Bis 2045 wird angenommen, dass rund 50 % der Kunststoffabfälle mechanisch und 40 % chemisch recycelt werden. Außerdem werden rund 10 % energetisch verwertet. Für die beiden Herstellungsverfahren gilt, dass Instrumente die hohen Differenzkosten zwischen konventioneller Erzeugung und Wasserstoff decken müssen. Dazu sind Klimaschutzverträge grundsätzlich geeignet, sie müssten aber aufgrund des sehr hohen stofflichen Wasserstoffbedarfes deutlich höhere Differenzkosten als im Fall der wasserstoffbasierten Direktreduktion von Eisenerz decken. Abhängig vom angenommenen Wasserstoffpreis (2030: 3,4 €/kg, 2040: 2,8 €/kg) wird mit einem notwendigen Förderbudget von etwa 30 G€ bis 2035 gerechnet⁹⁰. In der MtO-Route kommt hinzu, dass neue Produktionsanlagen aufgebaut müssen und Wasserstoff vor Ort verfügbar gemacht werden muss. Die Nachfragereduktion bei Kunststoffen kann sowohl durch informative Instrumente wie das Labelling treibhausgasintensiver Kunststoffe als auch ordnungsrechtliche Maßnahmen zur Einschränkung der Kunststoffnutzung (bspw. Einwegverpackungen) und zum effizienteren Design von Plastikverpackungen erreicht werden. Für das Kunststoffrecycling sind sowohl Recycling- als auch Rezyklateinsatzquoten geeignete Instrumente.

Ammoniak

Die Ammoniakproduktion wird zwischen 2025 und 2045 vollständig auf wasserstoffbasierte Verfahren umgestellt. Die Gesamtproduktion sinkt dabei um etwa 20 % aufgrund der rückläufigen Nachfrage nach Düngemitteln infolge der Umstrukturierung der Landwirtschaft. Die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas muss sichergestellt werden. Mögliche Instrumente sind Klimaschutzverträge und der Aufbau von Wasserstoffinfrastruktur. Die Kohlenstoffbilanz der weiteren Prozesskette wird durch diese Umstellung gestört – für die Erzeugung von Harnstoff benötigte Menge Kohlenstoff muss aus anderen – nicht-fossilen – Quellen bezogen werden.

⁸⁹ Ethylen steht als Repräsentant der Olefine, die bislang als Gemisch aus der konventionellen Route erzeugt werden. Der für wasserstoffbasierte Olefine (und Methanol) benötigte zusätzliche Kohlenstoff (nach Berücksichtigung des chemischen Recyclings, jährlich etwa 7 Mt CO₂ bzw. 2 Mt C) wird außerhalb des Industriesektors beschafft – über Luftabscheidung oder biogenen Ursprungs.

⁹⁰ Bei einem Wasserstoffpreis von 2 €/kg ab 2030 würde das notwendige Budget auf unter 15 G€ sinken. Ähnlich wirken Verschiebungen der Umstellung auf spätere Zeiträume (mit angenommenen niedrigem Wasserstoffpreis).

Methanol

Die Methanolproduktion wird entsprechend der Ammoniakproduktion umgestellt. Es gelten die gleichen Überlegungen. Die Produktion für bestehende Zwecke aufgrund von Nachfragerückgängen (S) sinkt leicht, die Umstellung der Olefine auf die MtO-Route benötigt allerdings eine massiv höhere Menge Methanol als Zwischenprodukt (etwa Faktor 20 gegenüber der bisherigen Produktion bzw. Faktor 6 bzgl. der Ethylenproduktionsmenge⁹¹).

Allgemeine Prozesswärme in der Chemie

Die Prozesswärmebereitstellung wird überwiegend (80 %) elektrifiziert, Teile von Hochtemperaturprozessen können auch mit (an den Standorten aufgrund der stofflichen Nutzung verfügbaren) Wasserstoff bzw. daraus erzeugter Wärme (15 %) betrieben werden. Instrumente dafür sind mit der Prozesswärmebereitstellung anderer Subsektoren identisch (Industriestrompreis, attraktiver Wasserstoff). Das gesamte Aktivitätsniveau sinkt im Vergleich zu 2018 bis 2045 auf etwa 85 %. Dies wird im Wesentlichen wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben durch Nachfragereduktionen verursacht. Hinzu kommt außerdem das vermehrte Recycling von Kunststoffen.

A.4.5 Glas

Glasherstellung wird vorrangig elektrifiziert mit Nischen für die Nutzung von Wasserstoff, wo dies technisch notwendig oder besonders vorteilhaft ist. Entsprechend gelten die Aussagen zur Elektrifizierung anderer Prozesswärmes (75 %). Wasserstoff (in geringen Mengen Kohlenwasserstoff) wird ergänzend eingesetzt, um Produkteigenschaften und Prozessstabilität zu gewährleisten (~15 %). Herausforderungen könnten in mangelnder Erfahrung zur Prozessführung vollelektrifizierter Anlagen liegen.

Die Gesamtproduktion sinkt um rund 15 % entsprechend reduzierter Bauaktivität insbesondere im Wohnungsbau, aber auch aufgrund der rückläufigen Verwendung im Nahrungsmittelbereich. Die Nachfrage nach Flachglas sinkt um ca. 27 % bis 2045 aufgrund des verringerten Pro-Kopf-Flächenbedarfes (S) und die Nachfrage nach Behälterglas um rund 12 % aufgrund der verringerten Nachfrage nach Verpackungen o.Ä. (S). Letzteres kann wiederum durch informative Instrumente wie das Labelling oder ordnungsrechtliche Vorgaben wie bspw. zum Einsatz von Mehrwegverpackungen erreicht werden.

A.4.6 NE-Metalle

Das Gesamtproduktionsniveau der wichtigsten NE-Metalle (Aluminium, Kupfer, Zink) bleibt konstant. Materialeffizienzfortschritten stehen dabei neue bzw. ansteigende Bedarfe entgegen. Die Produktion wird weitgehend elektrifiziert (~80 %), mit Ergänzung durch Wasserstoff wo notwendig. Es gelten daher die Herausforderung von Elektrifizierung/Wasserstoffnutzung wie in anderen Sektoren und es werden entsprechende Instrumente benötigt. Die Sekundärroute steigt auf etwa 87 % (2018: etwa 55 %). Im Gegensatz zum Stahlrecycling führt die gleichbleibende Produktionsmenge dazu, dass die Schrottverfügbarkeit einzig durch die dissipativen Verluste bei Sammlung und Aufbereitung bestimmt wird. Das Recycling von Aluminium und Zink ist bereits heute durch geringe dissipative Verluste charakterisiert (global, 5-15 %). Das höchste Verbesserungspotential gibt es bei Kupfer. Daher wird angenommen, dass

⁹¹ Dies deckt dann alle Produkte der konventionellen Erzeugung in Dampfspaltöfen – Olefine und Aromate – ab.

die dissipativen Verluste für alle drei NE-Metalle bei rund 15 % liegen. Instrument hierfür ist insbesondere die verbesserte Sammlung und Aufbereitung der Schrotte.

A.4.7 Papier

Für die Elektrifizierung der Dampferzeugung in der Papierherstellung wird ein subventionierter Strompreis benötigt. Die Produktionsmenge sinkt nachfragebedingt um etwa 20 % (S). Dies ist im geringen Maße durch die fortschreitende Digitalisierung begründet. Der größere Hebel ist der Rückgang von Verpackungsmaterialien durch ein geändertes Konsumverhalten (S). Ähnlich wie bei Kunststoffen und Glas kann diese Verhaltensänderungen einerseits durch Informationen für die Endverbrauchenden und andererseits durch rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden. Für Papierverpackungen sind dies bspw. verpflichtende Versandkosten beim Online-Versand.

A.4.8 Allgemeine Prozesswärme

Zentrales Instrument für die Elektrifizierung der Prozesswärme ist – wie in den einzelnen Subsektoren bereits angeführt – ein gegenüber fossilen Optionen wettbewerbsfähiger Strompreis. Dies wird absehbar nicht allein über einen CO₂-Preis erreicht⁹². Eine breite Entlastung von anderen Preisbestandteilen wäre ein geeignetes Instrument, um die Lücke zu schließen. Ein Preisniveau von 4-5 €ct/kWh (entspricht etwa der maximalen Entlastung, bei der fast nur noch Erzeugung und Vertrieb als Preisbestandteile verbleiben) könnte in Kombination mit einem ambitionierten CO₂-Preis (schnell ~200 €/t) ein entsprechendes Umfeld schaffen (Fleiter et al. 2023).

Alternative Instrumente sind im Ordnungsrecht zu finden: Neubauverbot von fossilen Wärmeerzeugungsanlagen und/oder ein Betriebsverbot könnten die Elektrifizierung erzwingen. Die so entstehenden Differenzkosten würden aber in erster Näherung nur verlagert. Mit den daraus entstehenden Verteilungsfragen beschäftigt sich die Modellierung nicht.

Parallel zur Schaffung der wirtschaftlichen Attraktivität muss in vielen Branchen auch die Austauschgeschwindigkeit von Prozesswärmeanlagen deutlich erhöht werden (Größenordnung Faktor 1,4). Dies kann theoretisch als Reaktion auf Preissignale "von selbst" geschehen, eine entsprechende Begleitung mit darauf zielenden Instrumenten scheint aber notwendig zu sein.

A.4.9 Reduktion der Prozessemisionen in der Aluminiumproduktion (R)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

In der Aluminiumindustrie werden jährlich rund 0,7 Mio. t CO₂ aus der Nutzung von Graphit-Elektroden emittiert. Außerdem entstehen FKW-Emissionen von rund 0,1 Mio. t CO₂-Äq.. Um diese Prozessemisionen zu reduzieren, kann der Anteil an Sekundäraluminium erhöht werden und Graphit-Elektroden durch inerte Anoden ersetzt werden.

Die Instrumente, um diese Entwicklung zu ermöglichen, sind der CO₂-Preis im EU-ETS sowie das Ordnungsrecht, um den Recyclinganteil von Aluminium zu erhöhen. Außerdem wird

⁹² 2018 betrug der Preisspread von Strom zu Erdgas etwa 65 €/MWh (Eurostat Datenbank NRG_PC_205, NRG_PC_203, ohne Umsatzsteuer und andere erstattungsfähige Steuern und Abgaben, Bänder I5 und IF). Diese Differenz würde (unter der Annahme, es gäbe keine Wirkung auf den Strompreis) durch eine CO₂-Preiserhöhung von etwa 300 €/t ausgeglichen (Emissionsfaktor Erdgas: 0,202 t CO₂/MWh).

Technologieentwicklung benötigt, da inerte Elektroden in der Aluminiumindustrie noch nicht für die reguläre Produktion einsetzbar sind.

Es wird angenommen, dass der Sekundäraluminium-Anteil im Jahr 2030 auf 57 %, 2040 auf 78 % und 2050 auf 85 % erhöht wird, während die Gesamtproduktionsmenge konstant bleibt. Für die Umstellung auf inerte Anoden wird ein Anteil von 0 % im Jahr 2030 und 100 % im Jahr 2040 angenommen, mit einem linearen Verlauf in den Zwischenjahren.

A.4.10 Reduktion der Prozessemissionen in der Zinkproduktion (R)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

In der Zinkproduktion werden jährlich rund 0,3 Mio. t CO₂ aus der Nutzung von Reduktionsmitteln emittiert. Diese können reduziert werden, indem der Sekundäranteil erhöht wird. Außerdem können fossile Reduktionsmittel durch biogene bzw. synthetische Reduktionsmittel ersetzt werden.

Es wird angenommen, dass der Sekundärzink-Anteil im Jahr 2030 auf 57 %, 2040 auf 78 % und 2050 auf 85 % erhöht wird. Die Gesamt-Produktionsmenge bleibt konstant. Für die Umstellung der Reduktionsmittel wird ein Anteil von 0 % im Jahr 2030 und 100 % im Jahr 2040 angenommen, mit einem linearen Verlauf in den Zwischenjahren.

A.4.11 Verkaufsverbot von Paraffinwachs (R)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Emissionen aus Paraffinwachsen (rund 0,5 Mio.t CO₂-Äq.) werden durch die Verbrennung von Kerzen aus Wachsen fossilen Ursprungs dominiert. Paraffin aus fossilen Rohstoffen kann durch Wachs auf Basis von Pflanzenölen ersetzt werden. Außerdem können Kerzen z.T. durch elektrische Licht- und Wärmequellen ersetzt werden.

Da Alternativen zu Paraffinwachsen zur Verfügung stehen, kann ein Verkaufsverbot für diese Wachse eingeführt werden.

Es wird angenommen, dass ein stufenweises Verkaufsverbot für Kerzen aus Paraffinwachs eingeführt wird. Dadurch reduzieren sich die Emissionen aus der Nutzung dieser Kerzen zwischen 2025 und 2035 linear vom derzeitigen Wert auf null.

A.4.12 Verbote und Ersatz von Lösemitteln (R)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Durch den Einsatz von Lösemittel werden flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) emittiert, die in der Atmosphäre zu CO₂ umgewandelt werden und dadurch zu indirekten CO₂-Emissionen in der Höhe von rund 1 Mio. t CO₂-Äq. führen.

Um den Einsatz von Lösemitteln zu reduzieren, können Verbote spezifischer Stoffe für bestimmte Anwendungen ausgesprochen werden, wie dies bereits in der Vergangenheit im Rahmen von chemikalienrechtlichen Verordnungen und von Verordnungen unter dem Bundes-Immissionsschutzgesetz geschah.

Außerdem können durch verbesserte Verfahren der Einsatz und die Emissionen von NMVOC verringert werden, und Lösemittel auf Basis fossiler Grundstoffe können durch biogene Lösemittel ersetzt werden.

Die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ (Benndorf et al. 2014) geht davon aus, dass die Emissionen von NMVOC bis 2050 um 51 % gegenüber 2020 abnehmen. Da diese Studie bereits alle technisch realisierbaren Minderungsmaßnahmen einbezieht, wird hier dieselbe prozentuale Reduktion angenommen.

Es wird aber berücksichtigt, dass die NMVOC-Emissionen im Jahr 2020 gemäß dem aktuellsten Treibhausgasinventar (UBA 2024) für das Basisjahr geringer sind als in der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ angenommen wurde. Die NMVOC-Emissionen im Jahr 2020 betrugen 1,02 Mio. t CO₂-Äq., während die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ noch von höheren Emissionen von 1,41 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2020 ausging. Es wird nun angenommen, dass die Emissionen zwischen den Jahren 2020 und 2050 linear um 51 % abnehmen. Damit ergeben sich Emissionen von 0,59 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045.

A.4.13 Anspruchsvolle Verschärfung und Verlängerung des EU-weiten HFKW-Phase-Down (R)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Mit der Novelle der EU-F-Gase-Verordnung 517/2014 wurde eine schrittweise EU-weite Beschränkung der Mengen von HFKW eingeführt, die EU-weit in Verkehr gebracht werden dürfen, unterfüttert mit spezifischen Verboten von Kältemitteln oberhalb spezifischer GWP-Schwellen in Neuanlagen bestimmter Anwendungen. Der HFKW-Phase-Down führt jenseits der Verbote zu einer Verknappung der für Neuanlagen und Nachfüllungen verfügbaren HFKW-Mengen, zu höheren HFKW-Preisen und steigender Attraktivität von Alternativstoffen ohne oder mit niedrigerem GWP und im Endeffekt mit Zeitverzögerung zu geringeren HFKW-Emissionen aus dem Betrieb und der Entsorgung von HFKW-haltigen Geräten und Produkten. Die Europäische Kommission hat im April 2022 einen Revisionsvorschlag (Europäische Kommission 2022) zur F-Gase-Verordnung 517/2014 vorgelegt, der u.a. ab 2024 eine Verschärfung und Verlängerung des aktuell nur bis 2030 definierten HFKW-Phase-Down sowie weitere Verbot vorsieht. Für das CARESupreme-Szenario wird in diesem Kontext eine Verschärfung angenommen, die sich an maximalen technisch machbaren Substitutionspotenzialen für HFKW orientiert, insbesondere als Kältemittel in Kühl und Klimaanlagen sowie Wärmepumpen.

Für die Modellierung im CARESupreme-Szenario werden aus Modellierungsarbeiten im Kontext der Revision der EU-F-Gase-Verordnung (Gschrey et al. 2022) für die Folgenabschätzung zur Revision der F-Gas-Verordnung (EC 2022) die EU-weiten Emissionstrends im anspruchsvollsten berechneten Szenario (*Option 3 – Maximum Substitution Scenario*) auf Deutschland übertragen. Für die Modellierung ist zu beachten, dass beim Ersatz von HFKW in Neuanlagen die emissionsmindernde Wirkung erst mit Verzögerung eintritt, da die vermiedenen HFKW-Emissionen sich durch vermiedene Kältemittelverluste im laufenden Betrieb und bei der Entsorgung zum Ende der technischen Lebensdauer einstellen, die nach Gerätetyp etwa 8 bis 30 Jahre beträgt.

A.4.14 Inverkehrbringungsverbote für SF₆ in elektrischen Schaltanlagen (R)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Elektrische Schaltanlagen sind die bedeutendsten verbliebenen technischen Neuanwendungen für Schwefelhexafluorid (SF₆), welches mit einem GWP (AR5) von 23.500 zu den stärksten bekannten Treibhausgasen zählt. Relevante frühere Verbote betreffen den Einsatz von SF₆ in neuen Schallschutzgläsern sowie als Schutzgas beim Metallguss.

Für das CARESupreme-Szenario wird der Revisionsvorschlag von 2022 der Europäischen Kommission zur F-Gase-Verordnung 517/2014 berücksichtigt (Europäische Kommission 2022), der auch einen Fahrplan für selektive Verbote zur Verwendung von SF₆ in neuen elektrischen Schaltanlagen enthält.

Die Treibhausgasminderungswirkung der SF₆-Verbote tritt aufgrund der langen Lebensdauer der meisten SF₆-haltigen Geräten und Produkten überwiegend erst mit Jahrzehntelanger Verzögerung auf.

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

A.4.15 Initiative für die optimierte Entsorgung von SF₆ aus elektrischen Schaltanlagen (R)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Ab Mitte der 2020er Jahre ist mit einer stark steigenden Anzahl von SF₆-befüllten Schaltanlagen zu rechnen, die ihr technisches Lebensende erreichen und entsorgt werden müssen. Ohne zusätzliche Maßnahmen ist deshalb damit zu rechnen, dass die Emissionsraten bei der Entsorgung steigen und etwa 10 % des zu entsorgenden SF₆-Betriebsmittels in die Atmosphäre entweicht.

Durch eine verstärkte Sensibilisierung der Branche könnten die SF₆-Verluste bei der Entsorgung minimiert werden.

Im CARESupreme-Szenario wird angenommen, dass die Emissionsraten der Entsorgung von 5 % im Jahr 2025 auf 1 % im Jahr 2030 sinken und dann konstant bleiben.

A.4.16 Förderprogramm zum Ersatz persistenter Klimagase in der Halbleiter- und Photovoltaikindustrie (R)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Fluorierte Treibhausgase (HFKW, FKW, SF₆ und auch NF₃) werden in der Halbleiter- und Photovoltaikindustrie v.a. für Ätz- und Reinigungsprozesse genutzt. Die Emissionen betragen etwa 0,2 Mio. t CO₂-Äq. jährlich. Durch ein Förderprogramm soll, wo technisch möglich, der Ersatz dieser Gase durch klimafreundlichere Alternativen angereizt werden,

Im CARESupreme-Szenario wird angenommen, dass die jährlichen F-Gas-Emissionen bis 2030 um etwa 30 % gesenkt werden können.

A.4.17 Weitere Kategorien

Im Sektor Industrieprozesse und Produktverwendung existieren weitere Quell-Kategorien, die relativ geringe Emissionen aufweisen, und für die keine spezifischen Instrumente zu Verfügung stehen. Für diese Kategorien wird angenommen, dass die Emissionen konstant bleiben, oder dass sie durch den Einfluss anderer Instrumente reduziert werden, etwa durch die Förderung von Elektromotoren im Verkehrssektor. Tabelle 44 gibt einen Überblick über diese Kategorien und die angenommene weitere Entwicklung der Emissionen.

Tabelle 44: Weitere Kategorien im Sektor Industrieprozesse und Produktverwendung

Kategorie	Parametrisierung	Begründung
2.C.5 Bleiproduktion	Konstante Fortschreibung	Geringe Emissionen (0,1 Mio. t CO ₂)
2.D.1 Schmiermittel	Proportional zur Entwicklung der Flüssigkraftstoffe im inländischen Verkehr	Der Einsatz von Schmiermitteln reduziert sich mit dem Umstieg von Verbrennungsmotoren auf Elektromotoren.
2.D.3.d.1 AdBlue (Harnstoffnutzung in SCR-Katalysatoren in Dieselfahrzeugen)	Fortschreibung des Trends bis 2025, anschließend proportional zur Entwicklung des Dieselverbrauchs im inländischen Verkehr	Der Einsatz von AdBlue reduziert sich mit dem Umstieg von Dieselmotoren auf Elektromotoren.
2.G.3 N ₂ O aus medizinischen Anwendungen	Konstante Fortschreibung	Geringe Emissionen (0,3 Mio. t CO ₂ -Äq.), keine Alternativen absehbar.
2.G.4 Methan aus Holzkohlenutzung	Konstante Fortschreibung	Geringe Emissionen (0,03 Mio. t CO ₂ -Äq.)

Quelle: Annahmen Öko-Institut

A.5 Gebäude – Raumwärme und Warmwasser

A.5.1 Reform der Steuern, Abgaben, Umlagen bei den Energiepreisen sowie CO₂-Bepreisung

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Änderungen bei Steuern, Abgaben und Umlagen beeinflussen das Investitionsverhalten sowohl beim Wärmeschutz als auch den Heizungsanlagen. Gleiches gilt für den CO₂-Preis des BEHG.

Parametrisierung

Die Annahmen zur Entwicklung der Energiepreise finden sich in den Rahmendaten. Für die Modellierung wird angenommen, dass insbesondere alle neuen Wärmepumpen in Bestandsgebäuden über einen eigenen Zählpunkt mit dem Netz verbunden und damit über einen vergünstigten Wärmepumpentarif versorgt werden. Dazu trägt bei, die Stromsteuer auf das EU-Minimum abzusenken.

A.5.2 Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) legt die materiellen Mindestanforderungen an Neubau und Bestandssanierungen fest. Für das CARESupreme-Szenario werden Verschärfungen bei den Anforderungen sowohl beim Neubau als auch bei Bestandssanierungen unterstellt.

Parametrisierung

Neubau: Verschärfung des energetischen Mindeststandard auf EH-40 (wirksam ab 01.01.2025); die Anforderungen beziehen sich dabei sowohl auf den Primärenergiekennwert als auch den

hüllflächenbezogenen Transmissionswärmeverlust H_T' . Gleichzeitig erfolgt ab dem 01.01.2023 ein Verbot fossiler Heizanlagen.

Bestand: Die Bauteilanforderungen im Falle einer Sanierung orientieren sich im Szenario CARESupreme an den Mindestanforderungen (U-Werte) der BEG-Einzelmaßnahmenförderung. Bei den bedingten Sanierungsanforderungen werden die bestehenden Ausnahmetatbestände gestrichen. Dies gilt zum Beispiel für Gebäude mit Baujahr später als 1984 (die das aktuelle GEG von den bedingten Sanierungsanforderungen ausnimmt) oder die Nachrüstpflichten (z.B. Dämmung der obersten Geschoßdecke). Die Nachrüstpflichten für alte Heizkessel werden auf Niedertemperatur- und Brennwertkessel ausgeweitet; gleichzeitig werden die bestehenden Ausnahmen für Ein- und Zweifamilienhäuser gestrichen und das Höchstalter des Kessels auf 25 Jahre begrenzt.

A.5.3 65 %-Anforderung

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Jede neu installierte Heizanlage muss mit mindestens 65 % erneuerbaren Energien betrieben werden (65 %-Anforderung). Die 65 %-Anforderung gilt für alle Wohn- und Nichtwohngebäude. Die Anforderung wird so ausgestaltet, dass auch der (theoretische) verbleibende 35 %-Anteil an fossilen Brennstoffen nach und nach aus dem System gedrängt wird und die Verwendung fossiler Brennstoffe bis 2044 komplett eingestellt wird. Die Umsetzung der 65 %-Anforderung erfolgt im Rahmen des GEG. Die bisherigen EE-Wärme-Anforderungen für Neubauten und die Sanierung öffentlicher Gebäude gehen in der neuen 65 %-Anforderung auf.

Parametrisierung

Die in der Modellierung unterstellte Ausführung der 65 %-Erneuerbare-Wärme-Vorgabe ist ambitionierter als das in der Realität verabschiedete Gebäudeenergiegesetz (GEG 2023). Darin ist geregelt, dass neu installierte Heizungen ab 30.06.2026 bzw. 2028 (nach Abschluss der Wärmeplanung) zu 65 % mit Erneuerbaren Energien betrieben werden müssen. Die Anforderung umfasst sowohl die Raumwärme- als auch Warmwassererzeugung. Im Hinblick auf die Erfüllungsoptionen gilt grundsätzlich weiterhin der technologieneutrale Ansatz, allerdings ergänzt um einige technologiespezifische Anforderungen. Der Anschluss an ein Wärmenetz gilt als pflichterfüllend. Hier wird angenommen, dass der Rechts- und Förderrahmen dafür sorgt, das Wärmenetze zügig auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umgestellt werden. Gleichzeitig wird angenommen, dass bestehende Wärmenetze erweitert und neue Netze gebaut werden sowie in bestehenden Versorgungsgebieten die Anschlussdichte deutlich steigt. Die entsprechenden Instrumente werden in Abschnitt A.3.4 beschrieben. Anders als im realen GEG wird Biomasse nur dann anerkannt, wenn keine erneuerbare Alternative zur Verfügung steht („Kaskadenmodell“). Bei Biogas und strombasierten Brennstoffen (z.B. Wasserstoff) wird im Szenario die Regelung ergänzt, dass die mit dem Bezug verbundenen Mehrkosten durch den Vermieter zu tragen sind (vgl. § 71o GEG-E). Dies dient zum einen dem Mieterschutz, zum anderen, den Einsatz dieser knappen Brennstoffe im Bereich der Gebäudewärme möglichst gering zu halten.

Analog zum realen GEG gilt für fossile Kessel, die zwischen 2024 und 2028 installiert werden, eine Mindestquote für erneuerbaren Brennstoff (§ 71 Abs. 9 GEG): 15 % im Jahr 2019, 30 % in 2035 und 60 % in 2040. In Gasheizungen wird dieser durch Biogas gedeckt. In der Modellierung sorgt die Vorgabe dafür, dass keine Ölheizungen frühzeitig getauscht werden, da technisch kein „grünes Heizöl“ verfügbar ist. In der Modellierung wird davon ausgegangen, dass

Eigentümer*innen spätere Mehrkosten durch grüne Gase in ihre Investitionsentscheidung miteinpreisen. Dies wird durch begleitende Informationskampagnen sichergestellt

Anders als im realen GEG werden in CARESupreme und CARETarget Szenario keine Wasserstoffnetzausbaugebiete ausgewiesen und entsprechend sind hier keine Erdgasheizungen bis zur Ankunft des Wasserstoffs betreibbar, was Lock-Ins vermeidet.

Zum 01.01.2029 wird die Anforderung in eine 100 %-Anforderung überführt. Wärmepumpen und Fernwärmeanschluss sind weiterhin pflichterfüllend. Zum 1.1.2045 tritt ein generelles Verbrennungsverbot für fossile Brennstoffe in Kraft. Dies ist notwendig, um die Gaskessel, die bis dahin noch laufen, aus dem Wärmemarkt zu bringen. Eine Umstellung dieser Kessel auf Biomethan wäre allerdings zulässig.

A.5.4 Mindesteffizienzstandards (MEPS)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Es erfolgt die Einführung von energetischen Mindesteffizienzstandards für Bestandsgebäude (MEPS). Dafür werden Gebäude entlang ihrer Effizienzklasse im Sinne von „worst first“ – also beginnend mit den schlechtesten Gebäuden – energetisch saniert. Die Umsetzung der MEPS erfolgt ebenfalls im Rahmen einer Novelle des GEG.

Parametrisierung

Die Ausgestaltung der MEPS orientiert sich an dem Vorschlag der EU-Kommission vom 15.12.2021 für die Novelle der Gebäuderichtlinie (EPBD).⁹³ Dort sind zeitpunktbezogene MEPS vorgesehen: Der Gebäudebestand wird in Gesamteffizienzklassen eingeteilt, deren Schwellenwerte erreicht werden müssen.⁹⁴ Die von der Kommission vorgeschlagene Stufenkurve endet bei öffentlichen Gebäuden und NWG in 2030 und bei Wohngebäuden in 2033. Wir nehmen an, dass sie im Sinne des Kommissionsvorschlags dynamisch weitergeführt wird („[...] in line with the pathway for transforming the national building stock into zero-emission buildings“).

Tabelle 45: Anforderungsdynamik bei den MEPS

Optionen	2027	2030	2033	2036	2039	2042
Nichtwohngebäude (inkl. öffentlicher Gebäude)	≥ F	≥ E	≥ D	≥ C	≥ B	
Wohngebäude		≥ F	≥ E	≥ D	≥ C	≥ B

Quelle: Eigene Annahmen und Darstellung Öko-Institut

Die Stufenkurve bietet die Chance, ein Gebäude Schritt für Schritt, also Bauteil für Bauteil, zu sanieren. Um Gebäudeeigentümern ein Höchstmaß an Planungssicherheit zu gewährleisten, wird die Stufenkurve mit Einführung der MEPS gesetzlich verankert. Über begleitende Instrumente im Bereich Information und Beratung wird dafür gesorgt, dass die MEPS in der Breite verstanden werden und somit das Risiko minimiert wird, dass sich Hauseigentümer aus Unkenntnis über die späteren Stufen „in einen nicht-zielkompatiblen Lock-in investieren“. Dabei helfen Sanierungsfahrpläne (iSFP).

⁹³ Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast), 15.12.2021 COM (2021) 802 final 2021/0426 (COD)

⁹⁴ Gesamteffizienzklasse G entspricht den schlechtesten 15 % und A einem Nullemissionsgebäude. Der übrigbleibende Bestand wird gleichmäßig zwischen den Gesamteffizienzklassen F-B aufgeteilt.

A.5.5 Einsatz von Biomasse

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Da Biomasse, insbesondere Holz, in der Gebäudewärme aus Gründen des begrenzten nachhaltigen Potenzials nur in Ausnahmefällen zur Verfügung steht, wird der Einsatz auf die Häuser beschränkt, die über keine erneuerbaren Alternativen verfügen.

Parametrisierung

Durch eine Einstellung der Breitenförderung in der BEG, strenge Immissionsschutz-Grenzwerte und die Anwendung dieser auf alle Holzfeuerungen in Gebäuden wird der Betrieb neuer Holzheizungen sowie bestehender ineffizienter Kaminöfen nach und nach eingestellt.

A.5.6 Heizungsoptimierung

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Instrumente für die Heizungsoptimierung basieren auf den Maßnahmen der EnSimMaV⁹⁵. Diese umfassen den hydraulischen Abgleich sowie regelmäßige Heizungsinspektionen.

Parametrisierung

Hauseigentümer sind verpflichtet, ihre Heizanlagen regelmäßig überprüfen und optimieren zu lassen. Dabei geht es um die Optimierung der Heizkurve, die Absenkung der Vorlauftemperatur, die Einstellung der Nachtabsenkung und die Optimierung des Zirkulationsbetriebs der Warmwasserversorgung. Gleichzeitig werden Hauseigentümer verpflichtet, ihr Heizanlagensystem hydraulisch abzulegen.

A.5.7 Energieeffizienzverpflichtungssystem mit „Weißen Zertifikaten“

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Grundidee des Instruments ist, professionelle Akteure zu verpflichten eine bestimmte Menge an Energie-Einsparungen nachzuweisen. Meistens werden Energieversorgungsunternehmen wie z.B. Stadtwerke verpflichtet. Diese führen dann Effizienz-Maßnahmen bei ihren Kund*innen durch wie z.B. effiziente Beleuchtung, Dämmung, Fenstertausch oder Wärmepumpen. Für Bürgerinnen und Bürger bedeutet das System keine Verpflichtung. Sie profitieren vielmehr davon, dass ihnen kostenlose oder günstige Angebote für mehr Effizienz gemacht werden. EEOS steigern also die „Service-Orientierung“ eines Politik-Mix. Außerdem ist es ein marktbares und ökonomisch effizientes Instrument: Die Verpflichteten sind bemüht, die kostengünstigsten Maßnahmen mit der höchsten Einsparung zu realisieren. In manchen Systemen können Einspar-Zertifikate gehandelt werden. In diesem Fall spricht man von Weiße-Zertifikate-Systemen. Die Kosten für die Umsetzung der Effizienz-Maßnahmen wie z.B. ein Fenstertausch werden auf alle Kund*innen z.B. eines Gasversorgers umgelegt.⁹⁶

Parametrisierung

In CARESupreme wird ein EEOS als Weiße-Zertifikate-System eingeführt. Es werden Energieversorgungsunternehmen zu Einsparungen verpflichtet bei den netzgebundenen Energieträgern Gas, Fernwärme und Strom. Zusätzlich werden Heizöl-Steuerlager ebenfalls zu

⁹⁵ Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über mittelfristig wirksame Maßnahmen (Mittelfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung – EnSimMaV)

⁹⁶ Siehe dazu auch Schlomann et al. (2021) und Bürger und Wiegmann (2007).

Einsparungen verpflichtet. Die Verpflichteten können ihre Einsparungen sehr erbringen oder Einspar-Zertifikate erwerben, die gehandelt werden.

Die Einführung dieses Energieeffizienzverpflichtungssystems trägt vor allem dazu bei, die Einsparpotenziale durch gering-investive Maßnahmen zu heben und verdichtet damit den ambitionierten und auf Effizienz gerichteten Politik-Mix in CARESupreme.

A.5.8 Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) wird noch stärker auf das langfristige Klimaschutzziel ausgerichtet. Dies gilt sowohl für die Verteilung der Fördermittel mit starkem Fokus auf der Bestandsanierung gegenüber dem Neubau als auch für die Fördertatbestände und die damit verbundenen Mindestanforderungen. Das Verhältnis zwischen Fordern und Fördern wird so geregelt, dass es zukünftig prinzipiell zulässig ist, auch Sanierungsmaßnahmen zu fördern, die ordnungsrechtlich vorgeschrieben sind. Um die Planungssicherheit der beteiligten Akteure (u.a. Gebäudeeigentümer, Handwerksbetriebe, Hersteller) sicherzustellen, erhält die BEG stets ausreichend Budget, um alle Förderanträge zu bedienen.

Die geänderten Förderbedingungen werden auf die steuerliche Förderung übertragen.

Parametrisierung

Die Breitenförderung im Bereich des Neubaus wird sofort eingestellt. Bei der Effizienzhaus-Förderung wird der Standard EH-85 gestrichen. Dafür werden die Förderkonditionen für die Standards EH-70 und -55 deutlich angehoben. Biomasseheizungen werden ebenfalls nicht mehr gefördert. Die technologiespezifischen Mindestanforderungen bei den Einzelmaßnahmen stellen sicher, dass sehr effiziente Anlagen (zum Beispiel Wärmepumpen mit einem hohen COP-Wert) eingesetzt werden.

A.5.9 Wärmepumpen-Offensive

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Bei der Förderung wird ein zusätzlicher (zeitlich begrenzter) Förderschwerpunkt für den Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden eingerichtet. Dieser adressiert den gezielten Einsatz von Wärmepumpen in Marktsegmenten, in denen Wärmepumpen bisher nur in Nischen eingesetzt werden. Dazu gehören beispielsweise Mehrfamilienhäuser und Gebäude mit Etagenheizungen. Weitere Elemente der Wärmepumpen-Offensive sind der Einsatz klimafreundlicher Kältemittel sowie Maßnahmen zur Erhöhung des Automatisierungsgrades der Fertigung von Wärmepumpen und zur Entwicklung von Wärmepumpen, die sich schnell installieren lassen und eine hohe Fehlertoleranz aufweisen (also robust gegen Auslegungs- oder Installationsfehler sind).⁹⁷

Parametrisierung

Bei der Wärmepumpen-Offensive handelt es sich um eine flankierende Maßnahme, die notwendig ist, den durch die ordnungsrechtlichen Regelungen induzierten zügigen Markthochlauf von Wärmepumpen zu ermöglichen.

⁹⁷ Siehe hierzu u.a. Öko-Institut; Fraunhofer ISE (2022).

A.5.10 Kommunale Wärmeplanung

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Bundesländer werden durch ein Bundesgesetz verpflichtet, durch Landesgesetze die kommunale Wärmeplanung einzuführen. Konkret sollen die Länder dafür Sorge tragen, dass in allen größeren Kommunen innerhalb einer gesetzlich festgelegten Pflicht ein kommunaler Wärmeplan entwickelt wird. Kern der kommunalen Wärmeplanung ist eine räumlich aufgelöste Wärmewende-Strategie, ausgerichtet an dem Ziel, bis 2045 eine klimaneutrale WärmeverSORGUNG sicherzustellen. Die kommunale Wärmeplanung wird mit der Förderkulisse derart verschränkt, dass zukünftig nur noch solche Investitionen gefördert werden, die mit der kommunalen Wärmewende-Strategie konform gehen.

Parametrisierung

Bei der kommunalen Wärmeplanung handelt es sich um eine flankierende Maßnahme, die die kommunale Wärmewende unterstützt und dabei hilft, dass die Planungssicherheit erhöht wird, einzelne Investitionsentscheidungen aufeinander abgestimmt werden und Investitionen in die für die Wärmewende notwendigen Infrastrukturen (Wärme-, Gas-, Stromverteilernetze) entlang der kommunalen Wärmewende-Strategie getroffen werden können.

A.5.11 (Teil)Warmmietenmodell

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Das Mietrecht wird so angepasst, dass Vermieter ausreichend hohe Anreize für die energetische Gebäudesanierung erhalten und aus Perspektive der Mieter gleichzeitig Warmmieteneutralität gewährleistet ist. Wichtige Bausteine dafür sind die Ausgestaltung der Modernisierungsumlage (Höhe der Umlage, Frage der Anrechnung öffentlicher Fördergelder auf die Umlage), die finanzielle Förderung durch den Staat und alle weiteren Möglichkeiten, die Miete zu erhöhen.

Parametrisierung

Alternative Miet- und MietumlagemodeLLE sind flankierende Maßnahmen, die notwendig sind, um die Sanierungsaktivitäten im Bereich des Mietgebäudesektors zu erhöhen. Dabei geht es darum, Aufwand (in Form von Sanierungskosten) und Nutzen (in Form eingesparte Energiekosten) gerecht zwischen Vermieter und Mieter aufzuteilen. Ferner ist es notwendig, die Planungssicherheit sowohl auf Seiten des Vermieters (Refinanzierungsplan) als auch des Mieters (Entwicklung der Miete) hochzuhalten.

A.5.12 Gebäudeindividueller Sanierungsfahrplan (iSFP)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Der gebäudeindividuelle Sanierungsfahrplan (iSFP) ist ein wichtiges Beratungsinstrument, dass Gebäudeeigentümern Orientierung darüber gibt, mit welchen Maßnahmen und in welcher Maßnahmen Reihenfolge ein Gebäude nach und nach auf ein zielkompatibles Energieniveau gebracht werden kann. Durch gesetzliche Vorgaben werden die Auslösetatbestände für den iSFP deutlich ausgeweitet.

Parametrisierung

Die Ausstellung eines iSFP wird verpflichtend bei jedem Eigentumsübertragung und bei jeder Neuvermietung eines Gebäudes. Auch Anknüpfungspunkte an die Förderung von Einzelmaßnahmen werden verstärkt. Der Sanierungsfahrplan trägt außerdem dazu bei, dass die

Sanierung der Bauteile optimal an ihren natürlichen Reinvestitionszyklus angepasst wird und entfaltet Synergien mit den zeitlich gestaffelten Anforderungen der MEPS.

A.5.13 Serielle Sanierung

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Mit der seriellen Sanierung verbindet sich ein großes Potenzial, das Sanierungsvolumen zu erhöhen. Kern dieses Sanierungskonzepts ist der hohe Vorfertigungsgrad. Vorteile bestehen vor allem im Hinblick auf die Sanierungsqualität, die Sanierungsgeschwindigkeit sowie den spezifischen Fachkräfteeinsatz pro Sanierungsfall.

Parametrisierung

Die Aktivitäten im Bereich der seriellen Sanierung werden deutlich ausgeweitet. Neben Maßnahmen zur Erhöhung der Nachfrage nach seriellen Sanierungen wird ein Fokus darauf gelegt, den Automatisierung- und Industrialisierungsgrad bei der Fertigung der Sanierungselemente zu erhöhen.

A.5.14 Reduzierung des Flächenbedarfs (Wohn- und Nutzfläche) (S)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Mit der Reduzierung des Bedarfs an Wohn- und Nutzfläche verbindet sich ein großes Klimaschutspotenzial. Je kleiner die zu beheizende Fläche, desto geringer der Energiebedarf und damit die Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors. Für die Reduzierung des Wohnflächenbedarfs werden einige Instrumente unterstellt:

- ▶ Die finanzielle Förderung von Maßnahmen für eine effizientere Wohnraumnutzung. Gefördert werden können beispielsweise die Einrichtung kommunaler Wohnberatungsstellen, sogenannten One-Stop-Shops (vgl. Kenkmann et al. (2019)) und Wohnungstauschbörsen, die Menschen bei der effizienteren Wohnraumnutzung unterstützen. Auch die Mobilisierung leerstehender Einliegerwohnungen kann gefördert werden.
- ▶ Deutschlandweite, konsequente Anwendung von Leerstandskatastern und Zweckentfremdungssatzungen zur Aktivierung von Leerstand. Einführung einer Leerstandsabgabe für unbegründeten, lang andauernden Leerstand.
- ▶ Beschränkung der Neubauförderung auf den Bau von Mehrfamilienhäusern mit überwiegend kleinen Wohnungen bzw. Wohnungen für spezifische Wohnbedürfnisse (zum Beispiel Schaffung von Alternativwohnraum für Bewohner*innen von Einfamilienhäusern im Quartier, die sich gern verkleinern möchten.). Mehrfamilienhäuser weisen durchschnittlich geringere Pro-Kopf-Flächen auf als typische neue Einfamilienhäuser. Förderung des flexiblen Bauens (Gebäude- und Wohnungsschnitte, die sich später durch einfache bauliche Maßnahmen ändern lassen).
- ▶ Gesetzliche Verpflichtung zum flexiblen Bauen: Ein- und Zweifamilienhäuser müssen so gebaut werden, dass eine spätere Teilung des Gebäudes möglich ist (vorzusehen sind dabei beispielsweise ein zweiter Eingang oder Wasseranschlüsse für weitere Bäder/Küchen usw.)

Parametrisierung

Viele dieser Instrumente sind noch im Ideenstatus. Über ihre mögliche Wirkung ist nichts bekannt. Mangels Empirie erfolgt deswegen keine explizite Modellierung der Wirkung dieser Instrumente, vielmehr wird die Flächenentwicklung exogen vorgegeben. Dabei wird für den Rückgang der spezifischen Pro-Kopf-Wohnfläche der Wert aus dem RESCUE-CARESupreme-Szenario übernommen. Dieser liegt im Jahr 2050 bei 41 m²/Kopf.

Die Entwicklung der beheizten Nutzfläche in Nichtwohngebäuden orientiert sich ebenfalls an Nutzflächenentwicklung aus CARESupreme. Dort wird die Flächenentwicklung als Funktion der Bevölkerungs- und BIP-Entwicklung abgeschätzt. Mit den aktuellen Projektionen zu Bevölkerung und BIP wird die Flächenprojektion aktualisiert.

A.5.15 Absenkung der Raumtemperatur (S)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die mittlere Innentemperatur wird in allen beheizten Wohn- und Nichtwohngebäuden um ein Grad Celsius abgesenkt. Dieser Effekt wird neben der Senkung der Temperatur auch dadurch erreicht, dass nicht benötigte Räume teil- oder nicht beheizt werden und steuerbare Thermostate verbaut werden. Mit der Absenkung gehen Endenergieeinsparungen von circa 6 % einher.

Parametrisierung

Wir unterstellen, dass Gebäudebenutzer*innen im CARESupreme-Szenario aus eigenem Antrieb ihren Komfort einschränken, um Energie zu sparen.

A.6 Gebäude – Geräte und Prozesse

A.6.1 Mindesteffizienzstandards unter der EU Ökodesign-Richtlinie

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Verschärfung von Mindesteffizienzstandards wirkt insbesondere bei der Weißen Ware (z.B. Kühlschränke). Hier sind die Lebenszyklen in der Regel länger und die technischen Fortschritte langsamer im Vergleich zu IKT-Geräten. Durch Mindeststandards kann der Energiebedarf von Neugeräten gegenüber dem Ist-Zustand gesenkt werden.

Parametrisierung

Anhebung von Mindesteffizienzstandards für folgende Produktgruppen: Kühlschränke, Gefrierschränke, Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler, Herde, Beleuchtung, elektronische Displays (einschließlich Fernsehgeräten), Computer, Set-Top-Boxen.

A.6.2 Anforderungen an kreislauforientiertes Produktdesign unter der EU Ökodesign-Richtlinie

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die neue Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte ((EU) 2024/1781) setzt einen Rahmen für die Festlegung von Anforderungen für bestimmte Produktgruppen, um Kreislaufwirtschaft und andere Nachhaltigkeitsaspekte zu verbessern. Dieser Rahmen

ermöglicht die Festlegung zahlreicher Anforderungen, u. a. in Bezug auf: Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Nachrüstbarkeit und Reparierbarkeit von Produkten.

Parametrisierung

Pauschale Anhebung der durchschnittlichen technischen Lebensdauern neuer Geräte um 20 % für folgende Produktgruppen: Kühlschränke, Gefrierschränke, Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler, Herde, Beleuchtung, elektronische Displays (einschließlich Fernsehgeräten), Computer, Set-Top-Boxen.

A.6.3 Informationskampagne für Klima- und Ressourcenschutz (S)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Im Zuge einer gezielten Informationskampagne wird ein Wandel des Konsumverhaltens der Verbraucherinnen hin zu nachhaltigem Konsum unterstützt.

Parametrisierung

Nutzungsintensität: Pauschale Reduzierung der Nutzungsintensität (Betriebsstunden pro Jahr) um 10 % bis 2045 für folgende Produktgruppen: Waschmaschinen, Trockner, Geschirrspüler, Beleuchtung.

Gerätegröße: Keine weitere Zunahme (0 % Anstieg) gegenüber bestehenden Gerätedimensionen (z.B. Kühlvolumen von Kühlschränken).

A.7 Verkehr – Personenverkehr

A.7.1 EU CO₂-Flottenzielwerte für Pkw und leichte Neufahrzeuge

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Die CO₂-Flottengrenzwerte (in g CO₂/km) legen einen maximalen Wert für den Durchschnitt der CO₂-Emissionen bei Neufahrzeugen fest. Die in Europa in einem Jahr zugelassenen Fahrzeuge dürfen diesen Emissionszielwert im Durchschnitt nicht überschreiten.

Das Ambitionsniveau zur CO₂-Minderung bei Neufahrzeugen steigt im Jahr 2030 auf -50 % (leichte Nutzfahrzeuge) bzw. -55 % (Pkw) ggü. dem Jahr 2021; im Jahr 2035 liegt die Minderungsanforderung für alle Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bei -100 % und es können nur noch Nullemissionsfahrzeuge zugelassen werden.

Parametrisierung

Es wird jahresscharf geprüft, ob die Flottenzielwerte durch die Zusammensetzung der Neuzulassungen erfüllt werden. Ist dies nicht der Fall, werden wie bei der internen Preisgestaltung der Hersteller finanzielle Anreize für effizientere/emissionsfreie Fahrzeuge bzw. finanzielle Aufschläge für stark emittierende Fahrzeuge eingesetzt und die Neuzulassungsstruktur entsprechend angepasst.

A.7.2 Anpassung der Kfz-Steuer (Einführung einer Klimaabbgabe)

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Die Kfz-Steuer im 1. Jahr für neu zugelassene Pkw wird ab 2025 in Abhängigkeit der CO₂-Emissionen eines Pkw stufenweise erhöht. Die Bemessungsgrenze, über der die zusätzliche Komponente der Kfz-Steuer zu entrichten ist, sinkt kontinuierlich ab. Im Jahr 2030 sind von der Klimaabbgabe alle Fahrzeuge außer Nullemissionsfahrzeuge erfasst. Die CO₂-abhängigen Steuersätze sind in Tabelle 46 dargestellt. Die zusätzliche Kfz-Steuer im ersten Jahr darf jedoch maximal 50 % des Fahrzeugkaufpreises betragen.

Tabelle 46: Kfz-Steuer im 1.Jahr in € je g CO₂/km (WLTP)

Jahr	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Bemessungsgrenze in g CO ₂ /km	80	65	50	35	20	0
Zusatzzahlung in €/(g CO ₂ /km)	60	80	120	160	200	240

Quelle: Eigene Zusammenstellung Öko-Institut

Parametrisierung

Die Maßnahmen wirkt im Modell auf die Gesamtkosten für die Anschaffung und Nutzung (TCO) der neuen Pkw und damit auf die Neuzulassungsstruktur.

A.7.3 Umweltbonus / Kaufprämie für Pkw

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Vollständig emissionsfreie Pkw erhalten im Jahr 2023 eine staatliche Kaufunterstützung von 3.000 € (40.000 – 65.000 € Nettolistenpreis) bzw. 4.500 € (bis 40.000 € Nettolistenpreis). Ab dem 1. September 2023 erhalten nur noch Privatpersonen den Umweltbonus. Für das Jahr 2024 erhalten Pkw mit einem Nettolistenpreis unter 45.000 € eine Kaufunterstützung von 3.000 €.

Parametrisierung

Die Maßnahmen wirkt im Modell auf die Gesamtkosten für die Anschaffung und Nutzung (TCO) der neuen Pkw und damit auf die Neuzulassungsstruktur.

A.7.4 Abschaffung der Entfernungspauschale

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Die Entfernungspauschale wird im Jahr 2027 abgeschafft.

Parametrisierung

Durch den Wegfall der Entfernungspauschale wird das Pendeln durch Arbeitswege weniger attraktiv. Nach Petschow et al. (2008) wird die Minderung der Verkehrsleistung durch die Abschaffung der Entfernungspauschale hergeleitet. Im Laufe von 10 Jahren reduziert sich die Verkehrsleistung demnach um 2,3 % jährlich.

A.7.5 Umgestaltung der Besteuerung von Dienstwagen

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Für die Bestimmung des steuerrelevanten geldwerten Vorteils wird grundsätzlich 1 % des Bruttolistenpreis angesetzt. Hinzu kommt ab dem Jahr 2025 eine fahrleistungsabhängige Komponente (0,1 %-Punkt je 1.000 km private Fahrleistung / pauschaler Ansatz: Private Fahrleistung entspricht 75 % der Jahresfahrleistung). Ab dem Jahr 2025 existiert keine Bevorzugung von Plug-In-Hybride (PHEV) mehr. Für rein elektrische Fahrzeuge (BEV und FCEV) ist der Basissatz für die Berechnung des geldwerten Vorteils 0,25 % (bis 2025), 0,5 % (bis 2027), 1 % (ab 2028) des Bruttolistenpreises.

Parametrisierung

Die geänderte Dienstwagenbesteuerung wirkt auf die TCO und damit auf die Anschaffungentscheidung bei Dienstwagen. Gegenüber der derzeitigen Regelung sinkt insgesamt die Attraktivität von Diesel- und Benzinfahrzeugen sowie von PHEV als Dienstwagen.

A.7.6 Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Eine fahrleistungsabhängige Pkw-Maut wird ab 2029 für das gesamte Straßennetz eingeführt. Nach dem „Phase-In“ von 1,1 ct/km im Jahr 2029 erreicht sie die volle Wirkung ab dem Jahr 2035 (6,5 ct/km für emittierende Pkw; 6,4 ct/km für emissionsfreie Pkw). Externe Kosten für Luftschadstoffe, Lärm, sowie Natur und Landschaft werden im Jahr 2035 vollständig internalisiert (Blanck et al. 2021).

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 % vermiedene Verkehrsleistung).

A.7.7 Angebotsausweitung ÖPNV

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Die Verlagerungswirkung auf den ÖPNV wird nur möglich bei zusätzlichen Ausgaben für die Angebotserweiterung im ÖPNV. Finanzbedarfe für die Angebotserweiterung des ÖPNV liegen nach Naumann et al. (2019) beispielsweise bei rund 7 Mrd. € jährlich. Aufgrund der stark auf die Verlagerung wirkenden Preisinstrumente (z.B. BEHG, fahrleistungsabhängige Pkw-Maut) wird in dem Szenario von keiner zusätzlichen Verlagerung durch die Angebotserweiterung des ÖPNV ausgegangen. Sie ist aber die Voraussetzung dafür, dass die preislichen Instrumente eine Wirkung entfalten können.

Parametrisierung

Die Angebotsausweitung des ÖPNV ist notwendige Voraussetzung, um durch den CO₂-Preis und die Pkw-Maut eine umfassende Verlagerung auf den ÖPNV zu erzielen. Der Angebotsausweitung wird keine eigene Minderungswirkung zugeschrieben. Die Verlagerung ist im Modell Folge der erhöhten Kilometerkosten im MIV.

A.7.8 Fortführung des Deutschlandtickets

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Ab 2023 wird das Deutschlandticket mit 49 € pro Monat eingeführt. Mit diesem Ticket ist eine Nutzung aller regionalen und überregionalen Nahverkehrszüge sowie Angebote des ÖPNV inbegriffen.

Parametrisierung

Durch die Einführung des 49-€-Tickets wird die Nutzung von Nahverkehrszügen und Angeboten des ÖPNV attraktiver. Abgeleitet aus der Empirie zum 9-€-Ticket (Andor 2022; VDV 2022) und zur Bereitschaft des Kaufs eines Deutschlandtickets mit höherem Preis (Nobis 2022) wird der Verkehrszuwachs auf der Schiene und im ÖPNV sowie die Verlagerung vom MIV bestimmt. Das Ergebnis ist ein Anstieg der Verkehrsleistung im ÖPNV von 13 %, davon werden 60 % vom MIV verlagert.

A.7.9 Erhöhte Förderung des Radverkehrs

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Gemäß der Ziele des Nationalen Radverkehrsplans 3.0 sollen ab 2030 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 %). In CARESupreme wird die Investitionssumme von 30 € je Einwohner auf 2025 vorgezogen.

Parametrisierung

Es wird angenommen, dass für jeden investierten Euro 0,9 km zusätzlich mit dem Fahrrad pro Jahr zurückgelegt wird. Diese Verkehrsleistung entsteht durch Verlagerung vom Pkw-Verkehr, ÖV und induzierten Verkehr. Die Wirkung kommt erst mit 5 Jahren Verzögerung aufgrund des zeitlichen Verzugs durch Planung und Bau der Infrastruktur vollständig zum Tragen.

A.7.10 Erhöhung der Luftverkehrsteuer

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Seit Januar 2011 wird in Deutschland die LuftVSt auf Rechtsvorgänge (regelmäßig entgeltliche Beförderungsverträge) erhoben, die zum Abflug eines Fluggastes berechtigen. Die Steuer entsteht mit dem tatsächlichen Abflug des Passagiers von einem inländischen Flughafen.

Sie beträgt seit dem 1. Januar 2023 pro Fluggast 12,73 € („Kurzstrecke“), 32,25 € („Mittelstrecke“) bzw. 58,06 € („Langstrecke“).

Ab dem Jahr 2025 erfolgt eine Erhöhung der Gesamteinnahmen der LuftVSt auf 2 Mrd. €/Jahr (heute rund 1,2 Mrd. €/Jahr). Ab dem Jahr 2030 erfolgt eine Erhöhung der Gesamteinnahmen auf die Höhe der Mehrwertsteuereinbußen, welche durch das Ausbleiben der Mehrwertsteuereinnahmen von internationalen Flügen entstehen. Für das Jahr 2018 wurde diese Lücke auf 4 Mrd. € abgeschätzt (Bopst et al. 2019). Dieser Betrag wird über die Wachstumsrate des internationalen Flugverkehrs skaliert.

Der nationale Steuersatz wird kontinuierlich überproportional angepasst. Im Jahr 2030 wird er gegenüber 2023 verdoppelt (auf 25,5 €) und im Jahr 2040 gegenüber 2023 verdreifacht (auf

38,2 €). Zwischen 2040 und 2050 wird ein schwächeres Wachstum des Steuersatzes von 1,6 % pro Jahr angenommen, im Jahr 2050 beträgt der nationale Steuersatz dann 44,6 €.

Parametrisierung

Der Anteil nationaler bzw. internationaler Flüge sowie die Verteilung der Luftverkehrssteuer auf die drei Streckenkategorien wird aus (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023) abgeleitet. Im nationalen Luftverkehr verdreifacht sich die Luftverkehrsteuer pro pkm von umgerechnet 1,5 ct/pkm im Jahr 2018 auf 4,5 ct/pkm im Jahr 2050. Im internationalen Luftverkehr erhöht sich die Luftverkehrsabgabe um 62 % von 0,38 ct/pkm im Jahr 2020 auf 0,61 ct/pkm im Jahr 2050.

Es werden auf Basis von Peter et al. (2012) und den Anteilen von Geschäftsreisen Preiselastizitäten von -0,75 (national) und -0,79 (international) angenommen, welche zu einer Nachfragerreduktion führen.

A.7.11 Stärkere Implementierung der Parkraumbewirtschaftung

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

In Städten werden flächendeckend Bewohnerparkausweise eingeführt und Parkgebühren für temporäres Parken eingeführt. Die Preise der Bewohnerparkausweise erreicht im Jahr 2025 360 €/Jahr und im Jahr 2035 850 €/Jahr, was dem heutigen Niveau in Stockholm entspricht. Zusätzlich wird angenommen, dass abseits von Wohngebieten Parkgebühren je Stunde erhoben werden. Diese betragen im Jahr 2025 2 €/h, bis zum Jahr 2035 wächst der Betrag zu 4 €/h an.

Parametrisierung

Die Parkgebühren werden auf die Fahrleistung je Halterregion umgelegt. Alle städtischen Halter bezahlen einen Bewohnerparkausweis sowie 1 h/Woche zusätzliche Parkgebühren. Halter aus den städtischen Einzugsgebieten sowie ländliche Halter zahlen im Schnitt 2h/Woche Parkgebühren. Die Umlegung auf die Kilometerkosten führt zu einer stärkeren Vermeidung und Verlagerung auf andere Verkehrsträger.

A.8 Verkehr – Güterverkehr

A.8.1 CO₂-Flottenzielwerte für schwere Nutzfahrzeuge

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Die CO₂-Flottengrenzwerte (in g CO₂/tkm bzw. g CO₂/pkm) legen einen Durchschnitt der CO₂ Emissionen für neu zugelassene schwere Nutzfahrzeuge fest. Die in Europa in einem Jahr zugelassenen Fahrzeuge dürfen diesen Zielwert im Durchschnitt nicht überschreiten. Die Ausgestaltung der Regulierung entspricht dem Vorschlag der EU-Kommission. Bereits von der Regulierung erfasste Lkw müssen ab dem Jahr 2030 einen höheren Zielwert als bisher einhalten (-45 % ggü. Referenz im Jahr 2019/2020). Die übrigen Lkw und Reisebusse werden zukünftig von den CO₂-Emissionsstandards erfasst. Deren Emissionen müssen ab dem Jahr 2030 um -45 % gegenüber ihrer Referenz aus dem Jahr 2025 zu sinken. Die Zielwerte für die Jahre 2035 und 2040 liegen bei -65 % bzw. -90 % gegenüber der jeweiligen Referenz. Zusätzlich sollen alle neuen Stadtbusse ab dem Jahr 2030 emissionsfrei sein.

Parametrisierung

Es wird jahresscharf geprüft, ob die Flottenzielwerte durch die Zusammensetzung der Neuzulassungen erfüllt werden. Ist dies nicht der Fall, werden wie bei der internen Preisgestaltung der Hersteller finanzielle Anreize für effizientere/emissionsfreie Fahrzeuge bzw. finanzielle Auf- und Abschläge für stark emittierende bzw. nicht emittierende Fahrzeuge eingesetzt und die Neuzulassungsstruktur entsprechend angepasst.

A.8.2 Ausweitung und CO₂-Spreizung der Lkw-Maut sowie Ausbau der Lkw-Energieinfrastruktur

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Die Lkw-Maut wird im Jahr 2025 auf alle Lkw und alle Straßen ausgeweitet. Zudem wird ab dem Jahr 2024 eine zusätzliche CO₂-Komponente in der Lkw-Maut eingeführt. Diese beträgt 200 €/t CO₂ und bleibt konstant, solange sie höher liegt als der CO₂-Preis im BEHG. Mautpflichtige Fahrzeuge bekommen den CO₂-Preis des BEHG erstattet. Zudem werden emissionsfreie Lkw ab dem Jahr 2026 zu 75 % von der Infrastrukturkomponente der Lkw-Maut befreit. Ab dem Jahr 2030 liegt mit 50 % eine geringere Befreiung zugrunde.

Außerdem wird die Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw (O-Lkw), BEV und FCEV 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. Es wird angenommen, dass 2030 für rund 50 % der Lkw-Nutzungsprofile auch im Fernverkehr BEV eingesetzt werden können. Im Jahr 2024 bestehen zudem 300 km Pendelstrecken für Oberleitungs-Lkw. Dieses Netz wird anschließend ausgebaut bis im Jahr 2030 ein Gesamtnetz von 1.700 km und 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 zur Schiene und Binnenschifffahrt 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.

A.8.3 Kaufförderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Seit dem Jahr 2021 findet für Nullemissions-Lkw eine Kaufförderung statt, die 80 % der technologiebezogenen Mehrkosten dieser Lkw gegenüber einem vergleichbaren Diesel-Lkw erstattet. Insgesamt stehen bis zum Jahr 2028 3 Mrd. € an Fördergeldern zur Verfügung.

Parametrisierung

Die Maßnahmen wirkt im Modell auf die Gesamtkosten für die Anschaffung und Nutzung (TCO) der neuen Lkw und damit auf die Neuzulassungsstruktur.

A.8.4 Ausbau der Förderung effizienter Trailer

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Das „Flottenerneuerungsprogramm für schwere Nutzfahrzeuge“ wird zur Maßnahme „Ausbau Förderung effiziente Trailer“ weiterentwickelt. Für die Jahre 2023 – 2025 stehen insgesamt 256 Mio. € für das Förderprogramm zur Verfügung, um Effizienzmaßnahmen an Trailern zu unterstützen.

Parametrisierung

15.000 Trailer von Sattelzügen pro Jahr werden um 5 % effizienter (Schade et al. 2022).

A.9 Verkehr – Kraftstoffe

A.9.1 Abschaffung des Dieselsteuerprivilegs

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Die Energiesteuern für Kraftstoffe betragen seit dem Jahr 2003 47,04 ct/l für Diesel und 65,45 ct/l für Benzin. Auch Erdgas und LPG besitzen reduzierte Energiesteuersätze. Die Energiesteuer für Diesel, Erdgas und LPG wird im Zeitraum 2025-2028 an das Niveau der Energiesteuer von Benzin (bemessen am Energiegehalt) angeglichen. Ferner wird für alle Kraftstoffe ein Inflationsausgleich ab 2029 eingeführt, sodass die Energiesteuern ab 2029 real gleichbleiben.

Parametrisierung

Die steigenden Kraftstoffpreise wirken auf die Neuzulassungen bei Pkw, SNF und LNF und auf die Verkehrsnachfrage.

A.9.2 EU-Mindestenergiesteuersatz für Kerosin

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Für inländische Flüge wird ab 2025 der Mindestenergiesteuersatz von 33 ct/l erhoben. Ab 2025 wird der Mindeststeuersatz auch für EU-Flüge über einen Zeitraum von 9 Jahren eingehast, sodass im Jahr 2033 der volle Mindeststeuersatz auf EU-Flüge anfällt.

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) und der Anteile geschäftlicher Reisen Preiselastizitäten von -0,75 (national) und -0,79 (international) angenommen, welche zu einer Nachfragerreduktion führen. Die Nachfrage wird großteils auf den MIV und den ÖV verlagert.

A.9.3 Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) / ETS 2

Diese Maßnahme ist sektorübergreifend (siehe Abschnitt A.2.1).

A.9.4 ETS 1 im Flugverkehr

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Auf Flüge wird der steigende CO₂-Preis durch den ETS1 fällig und kostenlose Zuteilungen an die Luftverkehrsindustrie entfallen entsprechend der Fortschreibung des ETS1 ab dem Jahr 2026. Ab 2030 werden außerdem nicht-CO₂-Effekte auf nationaler sowie EU-Ebene eingepreist.

Parametrisierung

Nicht-CO₂-Effekte werden mit einem Faktor von 1,9 für die Emissionen von nationalen und 2,3 (abgeleitet aus Berechnungen von atmosfair.de für die zehn häufigsten Verbindungen innerhalb Deutschlands und von Deutschland in die EU) für die Emissionen von internationalen Flügen in der EU berücksichtigt. Die erhöhten Kosten führen zu Vermeidung und einer stärkeren Verlagerung auf andere Verkehrsträger.

A.9.5 THG-Quote/Energetische Quoten für erneuerbare Kraftstoffe

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Bis zum Jahr 2030 entspricht die THG-Quote der heutigen Ausgestaltung (kontinuierlicher Anstieg der THG-Quote bis auf 25 %.). Bis zum Jahr 2040 wird die THG-Quote so weiterentwickelt, dass die absolute Menge an erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor aus dem Jahr 2030 verbleibt. In der Phase von 2030 bis 2040 werden die Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse und aus Altspeiseölen ausgephast und durch fortschrittliche Biokraftstoffe ersetzt. Dies entspricht einem Anstieg der erneuerbaren Kraftstoffanteile im Jahr 2035 von rund 30 % und von rund 60 % im Jahr 2040. Bis zum Jahr 2045 steigt der erneuerbare Anteil in den Kraftstoffen im Verkehrssektor auf 100 %.

Parametrisierung

Der Hochlauf erneuerbarer Kraftstoffe entspricht den Anteilen der Instrumentenbeschreibung.

A.9.6 PtL im Flugverkehr

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

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 20 % im Jahr 2035, 50 % im Jahr 2040 und 100 % im Jahr 2045 durchgeführt.

Parametrisierung

Die Zunahme der PtL-Kraftstoffe reduziert die CO₂-Emissionen im Luftverkehr, führt aber auch zu einem Anstieg der Kraftstoffpreise, aus der auch eine Nachfragereaktion erfolgt.

A.10 Verkehr – Übergreifende Maßnahmen und Instrumente

A.10.1 Tempolimit

Instrumenten- und Maßnahmenbeschreibung

Für das allgemeine Tempolimit wird angenommen, dass ab 2025 ein flächendeckendes Tempolimit auf allen Straßen mit 120 km/h auf Autobahnen, 80 km/h außerorts und 30 km/h innerorts eingeführt wird.

Parametrisierung

Die Parametrisierung orientiert sich an der Studie Schmaus et al. (2023). Es werden Routenwahleffekte, Nachfrageeffekte sowie Änderungen durch die HBEFA-Streckentypen berücksichtigt (Änderung der Geschwindigkeiten). Bei den Routenwahleffekten wird berücksichtigt, dass durch das Tempolimit und die damit verbundene Reisezeitänderung verschiedene Routen für die Zielerreichung gewählt werden. Dadurch wird die Fahrleistung bei Pkw um 0,9 % verringert und bei Lkw um 0,1 % erhöht. Durch Nachfrageeffekte werden außerdem 2,1 % der Verkehrsleistung im MIV auf andere Verkehrsträger verlagert bzw. vermieden. In einem letzten Schritt wird der Energieverbrauch pro km angepasst, da die Fahrzeuge langsamer fahren und somit weniger verbrauchen. Im MIV sinkt der Energieverbrauch um 4,7 %, bei Lkw und LNF um 0,4 %.

A.11 Landwirtschaft

A.11.1 Ernährungsstrategie zur Umsetzung der Planetary Health Diet [S]

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Während produktionsseitig durch die bestehenden Förderungen (z.B. GAP) und gesetzlichen Vorgaben (z.B. Stickstoff) schon viele Ansatzpunkte zur Regulierung der Produktion bestehen, ist die Nachfrageseite bisher gänzlich unreguliert und es fehlt ein entsprechendes Instrumentarium zur Zielerreichung. Ein klarer Pfad für die Förderung der pflanzlichen Ernährung ist entscheidend für die Reduktion der Emissionen des Landwirtschaftssektors und die Zielerreichung der Treibhausgasneutralität.

Im Rahmen der Modellierung ist keine quantitative Berechnung von Instrumenten zur Regulierung der Nachfrageseite vorgesehen. Daher erfolgt im Rahmen des Szenarios nur eine qualitative Beschreibung der notwendigen Instrumente. Dazu zählen:

- ▶ Steuerung über Preiselemente: z. B. kurzfristig Mehrwertsteueranhebung auf tierische Produkte, weitere Reduktion für pflanzliche Produkte, langfristig Treibhausgasbepreisung tierische Produkte
- ▶ Verpflichtende Vorgaben für Außer-Haus-Verpflegung in öffentlichen Einrichtungen und auf öffentlich geförderten Veranstaltungen
- ▶ Bildung/Schulung/Information/Aufklärung: Anpassung der Inhalte bei der Kochausbildung, Einführung Unterrichtsfach Ernährung, Bereitstellung von Informationen und Bewerbung von Vorteilen und Notwendigkeit der pflanzlichen Ernährung.

A.11.2 Zukunftsfähiges Tierhaltungs-Gesetz (ZukTierG)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Analog zum Kohleausstiegsgesetz wird auch die Zukunft der Tierhaltung gesetzlich geregelt. Die flächengebundene Tierhaltung wird zur Grundlage der Transformation der Tierhaltung. Die Höhe der Tierhaltung orientiert sich zukünftig an einer Flächenbindung auf Betriebsebene, einer Grünlandbindung für Wiederkäuer, dem Auslaufen der Tierhaltung auf Moorböden (max. Haltung von Wasserbüffeln in sehr moorreichen Regionen) und der Umsetzung von Biodiversitätszielen auf Landkreisebene, sowie der Tierhaltung im Ökolandbau. Die Umsetzung dieser Maßnahmen geht mit einer auskömmlichen Förderung des Tierwohls einher. Durch die Erhöhung von Qualitätsstandards können die Produktionsrückgänge wirtschaftlich abgepuffert werden.

Dafür wird ein ausgewogener Instrumentenmix bestehend aus ordnungsrechtlichen Vorgaben und finanzieller Förderung eingeführt werden. Wesentliche Punkte sind:

Finanzielle Förderung

- ▶ Förderung von Ausstiegsprogrammen für die Tierhaltung auf Moorstandorten und in Gebieten mit hohen Stickstoffüberschüssen
- ▶ Förderung von Tierwohl unter Berücksichtigung der oben genannten Kriterien in Verbindung mit reduziertem Tierbestand

Ordnungsrechtliche Vorgaben

- ▶ Flächenbindung auf Betriebsebene/ Erhöhung der Eigenfutterquote
- ▶ Grünlandbindung für Wiederkäuer [R]
- ▶ Moratorium für neue Tierhaltungsanlagen in Moorregionen

Parametrisierung

Folgende Annahmen werden für die Modellierung getroffen:

- ▶ Grünlandbindung Wiederkäuer: Zielwert 1,4 GVE/ha auf mineralischem Grünland, Umsetzung schrittweise bis 2045, Beginn 2035
- ▶ Auslaufen der Tierhaltung in Moorregionen – maximal Haltung von Wasserbüffeln mit 0,4 GVE/ha oder geringer in Regionen mit hohen Mooranteilen, Beginn 2025, schrittweise bis 2050
- ▶ Flächenbindung Tierhaltung Monogastrier: max. 1 GVE/ha Ackerland

Weitere Parametrisierung, die auch die Tierhaltung beeinflussen sind unter den Stickstoffmaßnahmen und den Maßnahmen des Ökolandbaus zu finden.

Im Rahmen der Modellierung wurden keine näheren Annahmen zur Umsetzung und Wirkung von Tierwohlmaßnahmen getroffen.

A.11.3 Reduktion der Stickstoffemissionen [R]

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Reduktion der Stickstoffüberschüsse ist ein wesentliches Ziel des Klimaschutzprogramms 2030 und der Farm to Fork Strategy auf EU-Ebene. Ein wesentliches Instrument dafür ist die Stoffstrombilanzverordnung. Die Stoffstrombilanzverordnung soll die Nährstoffverluste aus der Landwirtschaft soweit 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, die Stickstoff-Gesamtbilanz für Deutschland im Jahr 2030 auf 70 kg N / ha Landwirtschaftsfläche zu begrenzen. Für das CARESupreme-Szenario wird angenommen, dass bis zum Jahr 2045 die Stickstoffüberschüsse auf mindestens 50 kg N/ha gesenkt werden. Die Stoffstrombilanzverordnung wird in dieser Form allerdings nicht modelliert, da die Stickstoffüberschüsse ein Szenario-Ergebnis darstellen.

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.

Parametrisierung

- ▶ Erhöhung der Stickstoffanrechnung der Wirtschaftsdüngerwirksamkeit: +10 % ggü. DüV 2020, linear von 2025 bis 2035
- ▶ Reduktion Ausbringungsobergrenze Wirtschaftsdünger auf Böden: von 170 kg N/ha auf 120 kg N/ha bis 2035, nach 2035 schrittweise Reduktion auf 80 kg N/ha

A.11.4 Strukturelle Änderungen in der Landwirtschaft und Extensivierung

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Zur Umsetzung von Umwelt- und Ernährungszielen sind strukturelle Änderungen in der landwirtschaftlichen Produktion erforderlich. Neben der Ausweitung bestimmter Ackerkulturen wie einer Stärkung des Leguminosenanbaus oder einer Gemüseinitiative und der Förderung des Nussanbaus, wird auch mehr Fläche für die Umsetzung der Biodiversitätsziele oder der Moorwiedervernässung benötigt, die in dieser Form dann für die landwirtschaftliche Produktion nicht mehr zur Verfügung steht. Gleichzeitig bestehen ehrgeizige Flächenziele für die Ausweitung des Ökolandbaus. Ein Großteil dieser Maßnahmen wirkt auf die Treibhausgasemissionen durch eine Reduktion der Stickstoffdüngeranwendungen, aber auch durch eine Verringerung der Tierbestände durch eine Reduktion der landwirtschaftlichen Nutzfläche und Vorgaben zur Flächenbindung. Die Umstellung der landwirtschaftlichen Produktion erfolgt derzeit zum Großteil über Förderungen innerhalb der GAP (Ökolandbau, Biodiversitätsflächen, Leguminosenanbau). Langfristig können aber auch ordnungsrechtliche Vorgaben (z.B. verpflichtenden Fruchtfolgeregelungen in der guten fachlichen Praxis etc.) erfolgen. Im Folgenden wird die Parametrisierung für die einzelnen Maßnahmen beschrieben.

Parametrisierung

- ▶ Ökolandbau: 30 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche nach Ziel des Koalitionsvertrags bis 2030

- ▶ Zunahme von Gehölzstrukturen in Form von Agroforstsystmenen, Hecken, Kurzumtriebsplantagen: Bis 2050 wird die Fläche auf ca. 1,1 Mio. ha ausgedehnt. Gegenüber annuellen Kulturen werden in diesen Landbausystemen Stickstoffdünger eingespart, und damit N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden reduziert. Durch die Kohlenstoffeinbindung über die Gehölze gibt es Wechselwirkungen mit dem LULUCF-Sektor. Eine detailliertere Beschreibung dieser Maßnahme findet sich daher in Abschnitt A.2.4.
- ▶ Biodiversitätsflächen: Umsetzung der Biodiversitätsstrategie bis 2030 mit 10 % des Agrarlandes als biologisch wertvolle Flächen. Im Rahmen des CARESupreme-Szenarios wird angenommen, dass bis 2045 eine weitere Erhöhung auf 20 % stattfindet. Agroforstsystme werden dabei als Strukturelemente komplett angerechnet. Der Anteil der Brachflächen und Blühstreifen ergibt sich daher rechnerisch aus der Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche, der Zielsetzung für die Biodiversitätsflächen (10 % bis 2030, 20 % bis 2045) und der Fläche an Gehölzstrukturen.
- ▶ Leguminosenanbau: Bis 2030 erfolgt im konventionellen Landbau eine Ausweitung auf mindestens 5 %, bis 2045 steigt der Anteil auf 20 % im konventionellen Anbau, im Ökolandbau wird der heutige Anteil von ca. 25 % beibehalten
- ▶ Ausweitung Gemüseanbau: Im Rahmen des CARESupreme-Szenarios wird angenommen, dass sich der Gemüseanbau ab dem Jahr 2025 bis zum Jahr 2045 vervierfacht.

A.11.5 Reduktion der Emissionen durch technische Maßnahmen

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Neben den Maßnahmen, die zu strukturellen Änderungen in der landwirtschaftlichen Produktion führen, stehen auch technische Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen zur Verfügung. Dazu zählen die bereits großflächig in der Umsetzung befindlichen Maßnahmen der Güllevergärung, der stickstoffreduzierte Fütterung und der Einsatz von emissionsarmen Ausbringungsstechnologien. Weiterhin in der Diskussion sind auch die Maßnahmen zum Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren oder Futterzusätze zur Reduktion der Methanemissionen aus der Verdauung. Bei diesen letzten Technologien sind aber die Auswirkungen auf Umwelt, Tierwohl und Lebensmittelsicherheit noch nicht abschließend geklärt. Im Folgenden wird die Parametrisierung für diese Maßnahmen dargestellt.

Parametrisierung

- ▶ Güllevergärung: Ziel nach dem Klimaprogramm 2030 ist eine Vergärungsquote von 70 % des anfallenden Wirtschaftsdüngers. Angesichts von stark sinkenden Tierbeständen in diesem Szenario bis zum Jahr 2045 würde der Einsatz von 70 % Wirtschaftsdünger bei einer entsprechenden Tierbestandszahl in neuen Anlagen zu starken Lock-In-Effekten führen, wenn zukünftig weniger Tiere gehalten werden. Eine 70 % Güllevergärung wird im CARESupreme-Szenario daher frühestens im Jahr 2045 erreicht und bezieht sich auch nur auf den im Stall anfallenden Wirtschaftsdünger (bei Ausweitung der Weidehaltung fällt damit weniger an).
- ▶ Stickstoffreduzierte Fütterung: Im Rahmen des CARESupreme-Szenarios wird die Stickstoffreduzierte Fütterung berücksichtigt. Soweit möglich wird sie zukünftig großflächig umgesetzt. [R]

- ▶ Emissionsarme Ausbringungstechnologie: Hier werden überwiegend die bereits bestehenden Vorschriften der DüV umgesetzt. Wo möglich sind darüber hinaus weitere Verschärfungen vorgesehen (z.B. Einarbeitungszeit innerhalb 1 Stunde etc.) [R]
- ▶ Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren: Der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren wird in diesem ambitionierten Szenario auf Grund von ungeklärten Umweltfolgen etc. nicht berücksichtigt.
- ▶ Einsatz von Futterzusatzstoffen zur Reduktion der Methanemissionen: Der Einsatz von Futterzusatzstoffen zur Verringerung der Methanemissionen aus der Verdauung wird auch in der Methanstrategie des UBA als Maßnahme benannt. Da aber auch in diesem Bereich große Unsicherheiten in Bezug auf Tierwohl, Lebensmittelsicherheit und langfristige Emissionsminderungen bestehen, werden die Futterzusatzstoffe in diesem Szenario nicht berücksichtigt.

A.11.6 Reduktion der energiebedingten Emissionen [R]

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Zur Reduktion der energiebedingten Emissionen des Landwirtschaftssektors stehen bereits Förderinstrumente zur Verfügung. Neben der Energieeffizienzrichtlinie zur Förderung der Energieeffizienz in Landwirtschaft und Gartenbau wirken auch Instrumente aus anderen Sektoren wie dem Gebäudektor (Marktanreizprogramme, GEG), dem Energiesektor (EEG) oder dem Verkehrssektor (RED II). Diese Instrumente kommen auch im CARESupreme-Szenario zum Tragen. Durch eine Ausweitung der bestehenden Förderrichtlinien zur Energieeffizienz in Landwirtschaft und Gartenbau durch höhere Fördervolumina ergeben sich höhere Durchdringungsraten bei effizienteren Gewächshäusern, Erntetrocknung sowie in der Tierhaltung und der Elektrifizierung der Innenwirtschaft.

Bei schweren Landmaschinen in der Außenwirtschaft werden vermehrt Biokraftstoffe (2. Generation) genutzt, wenn die Biokraftstoffnachfrage im Straßenverkehr durch hohe Elektrifizierung verringert wird. Als Alternative wird von einer Wasserstoffnutzung ausgegangen.

Parametrisierung

- ▶ Verdopplung der Fördermittel für Energieeffizienz in Landwirtschaft und Gartenbau (48 Mio. € im Jahr 2022), ab 2025 und Fortschreibung bis 2035, danach wirken andere Instrumente (Ordnungsrecht, BEHG, GEG etc.)
- ▶ Ausweitung der Biokraftstoffnutzung (2. Generation) in schweren Landmaschinen, wenn sie im Verkehrssektor nicht mehr gebraucht werden.
- ▶ Einsatz von Wasserstoff in schweren Landmaschinen schrittweise bis 2050, sofern keine Biokraftstoffe verfügbar.
- ▶ Rückkopplung mit Instrumenten aus anderen Sektoren.

A.12 LULUCF

A.12.1 Reduzierung des Flächenverbrauchs der Netto-Flächenneuinanspruchnahme

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke (Flächenverbrauch⁹⁸) wird bis 2030 auf 20 Hektar pro Tag und bis 2050 auf null Hektar pro Tag reduziert (R, S).

Dieser Maßnahme wird durch ordnungsrechtliche Instrumente umgesetzt und durch Handel mit Flächenzertifikaten, Förderung von Innenentwicklung und Beratung unterstützt:

- ▶ Als Grundannahme wird zeitnah die Ausweisung neuer Wohngebiete, Industriegebiete und Verkehrsflächen im Außenbereich von Siedlungen untersagt (vgl. KBU; KN Bau (2021)). Es werden Ausnahmetatbestände definiert, nach den hierzu Ausnahmen für Kommunen möglich sind. Dabei fließen Kriterien wie z.B. geringe Entwicklung in den letzten 20 Jahren, Mangel an Sozialwohnungen, geringe bisherige Entwicklung von Industriegebieten und Verkehrsinfrastruktur ein. Bei Verkehrsflächen erfolgen zudem übergreifende Planungen bei der Flächenverteilung, die nicht direkt an Kommunen gebunden sind. Diese Ausnahmetatbestände werden so ausgestaltet, dass der Zielpfad erreicht wird, und resultieren in Flächenkontingente je Kommune. Wenn eine Kommune die Flächenkontingente nicht ausschöpft (z.B. kein Entwicklungsbedarf, hohe Einschränkungen durch Naturschutz, Erhalt von Senken in Wald Grünland oder Gewässerschutz), kann sie sie an andere Kommunen verkaufen (Handel mit Flächenzertifikaten).
- ▶ Flankierend zu Begrenzung des Flächenverbrauchs im Außenbereich wird die Innenentwicklung (z.B. vor allem durch Siedlungsverdichtung, Aufstockung von Gebäuden, Flächeneffizienz bei der Gebäude Nutzung) und die Optimierung bestehender Verkehrsflächen unterstützt.

Der modellierte Zubau an PV-Freiflächenanlagen liegt im Jahr 2030 bei ca. 20 ha/Tag. PV-Freiflächenanlagen sind in der Inventarlogik formal als Siedlungsflächen zu werten. Im Szenario Green-Supreme wird angenommen, dass die Anlage von PV-Freiflächenanlagen so ausgestaltet wird, dass unter den PV-Modulen Grünland-ähnlicher Bewuchs und Pflege vorliegen. So sind die ökologischen Verhältnisse vergleichbarer zu Grünland als zu Siedlungsflächen. Aus diesem Grund werden Flächen mit PV-Freiflächenanlagen nicht auf die Zielerreichung der Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlungsflächen angerechnet. Sie werden aber in der Auswertung der Flächenkulisse und der Treibhausgasemissionen weiter unter Siedlungen berücksichtigt. Ab dem Jahr 2040 werden keine PV-Freiflächenanlagen mehr installiert, sondern nur noch Agri-PV- und Moor-PV-Anlagen. Diese gelten als landwirtschaftliche Fläche bzw. terrestrische Feuchtgebiete und beeinflussen nicht das Reduktionsziel für die Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlungen im Jahr 2050.

Parametrisierung

Die Netto-Flächenneuinanspruchnahme wird kontinuierlich:

⁹⁸ Flächenverbrauch und Netto-Flächenneuinanspruchnahme werden synonym verwendet.

- ▶ Lineare Abnahme vom aktuellen Stand von 54 Hektar pro Tag⁹⁹ auf 20 Hektar pro Tag im Jahr 2030.
- ▶ Lineare Abnahme von 20 Hektar pro Tag im Jahr 2030 auf 0 Hektar pro Tag im Jahr 2050.

A.12.2 Einstellung des Torfabbaus (**Moorbodenschutz**)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Der Abbau von Torf als Rohstoff für Kultursubstrate im gewerblichen Pflanzenbau und im Hobbybereich wird bis zum Jahr 2040 eingestellt (R).

Der Abbau von Torf führt zu sehr hohen CO₂-Freisetzung je Flächeneinheit. Torf gehört zu den s.g. Grundeigentümer-Bodenschätzten und unterliegt als solcher nicht dem Bundesberggesetz (Keimeyer et al. 2019)¹⁰⁰. Beispielsweise wird in Niedersachsen, wo der Schwerpunkt des Torfabbaus in Deutschland liegt, der Torfabbau im Niedersächsisches Naturschutzgesetz (NNatSchG) geregelt.¹⁰¹

- ▶ Torfabbauenden Unternehmen wird zeitnah der angestrebte Torfabbaupfad kommuniziert. Auch wird kommuniziert, dass auf bestehenden Torfabauflächen ab dem Jahr 2030 und spätestens im Jahr 2040 der Torfabbau eingestellt wird. Dies ist verhältnismäßig, da den Unternehmen so die Möglichkeit gewährleistet wird, die Betriebsführung (z.B. Investitionen in den Abbau) in ökonomisch sinnvoller Weise anzupassen. Aufgrund der Verhältnismäßigkeit bleibt die Renaturierungspflicht der Betreiber bestehen.
- ▶ Es werden keine neuen Genehmigungen für den Abbau von Torf erteilt und bestehende Genehmigungen werden nicht verlängert. Auslaufende Abbaugenehmigungen führen so bereits zu einer kontinuierlichen Abnahme der Torfabaufläche in Deutschland.
- ▶ Sollte dies nicht ausreichen, wird ab dem Jahr 2030 auf Torfabauflächen in dem Umfang der Torfabau beendet, der nötig ist, um den Zielpfad zu erreichen.

Parametrisierung

Bis zum Jahr 2040 wird der Torfabbau eingestellt und die Flächen werden wiedervernässt. Ausgehend vom den heutigen Torfabauflächen und unter Annahme einer linearen Abnahme auf null Hektar bis 2040 werden die Torfabauflächen in voll vernässte organische Böden überführt.

A.12.3 Begrenzung und Einstellung der Torfnutzung sowie Nutzung von Torfersatzstoffen (**Moorbodenschutz**)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Bis zum Jahr 2040 wird die Torfnutzung eingestellt. Das betrifft Torf von inländischen und ausländischen Torfabauflächen. Auch die Herstellung von Kultursubstraten auf Torfbasis für den Export wird bis zum Jahr 2040 eingestellt (R).

⁹⁹ Flächenindikator "Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche" als Mittelwert der Jahre 2017-2020 (<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/anstieg-suv2.html>)

¹⁰⁰ Siehe auch <https://rohstofftransparenz.de/rechtlicher-rahmen-und-staatliche-stellen/>

¹⁰¹ <https://www.nds-voris.de/jportal/?quelle=jlink&query=BNatSchGAG+ND&psml=bsvorisprod.psml&max=true&aiz=true#jlr-BNatSchGAGNDV3IVZ>

Der Torfeinsatz in Hobbybereich wird bereits 2026 vollständig durch Torfersatzstoffe ersetzt bzw. es wird auf entsprechende Produkte verzichtet. Im Erwerbsgartenbau erfolgt der Ersatz bis 2030 zu 70 % und bis 2040 zu 100 % (siehe Entwicklungspfad in Repenning et al. (2021)). Die Umsetzung erfolgt ordnungsrechtlich über ein Nutzungsverbot von Torf für die Herstellung von Erden und Substraten für entsprechende Bereiche. Parallel wird die Entwicklung von Torfersatzstoffen und deren Einsatz gefördert. Ein vielversprechendes Torfersatzstoffsubstrat sind Torfmoose aus Paludikulturen.¹⁰² Mit Beratungsmöglichkeiten für Betriebe, Öffentlichkeitsarbeit über Alternativen zu torfhaltigen Blumenerden und Schulungen spezieller Verwendungskreise wird die Umstellung auf Torfersatzstoffe unterstützt.

In der Logik der Modellierung gilt der Kohlenstoff im Torf mit dem Torfabbau als oxidiert und die Menge an freiwerdendem CO₂ wird direkt auf der Anbaufläche angerechnet. Damit die Einsparung an CO₂-Emissionen durch die Einstellung des Torfabbaus (Abschnitt A.12.2) auch in Deutschland wirksam wird, muss die Torfnutzung und der Export von Kultursubstraten mindestens um die gleiche Menge zurückgehen, da ansonsten zusätzliche Torfimporte die Einsparungen aufheben würden. In den getroffenen Annahmen für Deutschland geht aber die Torfnutzung und der Export von Kultursubstraten sogar stärker zurück als der Torfabbau in Deutschland, um zusätzlich auch die Torfimporte auslaufen zu lassen. Diese Minderung der CO₂-Emissionen wird aber in den Herkunftsländern über die dortige Abnahme des Torfabbaus angerechnet.

Parametrisierung

Die Begrenzung und Einstellung der Torfnutzung sowie Nutzung von Torfersatzstoffen wird nicht modelliert, da die Treibhausgaseffekte für Deutschland bereits vollständig bei der Einstellung des Torfabbaus bilanziert sind.

A.12.4 Vernässung landwirtschaftlich genutzter organische Böden (Ackerland, Grünland; MoorbödenSchutz)

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Trocken genutztes Acker- und Grünland auf organischen Böden (synonym Moorböden)¹⁰³ emittieren große Mengen an Treibhausgasen. Mit der Anhebung der Wasserstände kann die Treibhausgasemission auf diesen Flächen signifikant verringert werden. Dies hängt aber stark von dem Niveau der Wasserstandsanhebung ab. Je feuchter eine Fläche ist, desto stärker verändert sich aber auch die landwirtschaftlichen Nutzungsoptionen. Auch bereits der Wechsel von einer Ackerland- zu einer Grünlandnutzung schützt den Moorböden leicht.

Der MoorbödenSchutz ist bereits in Moorschutzprogrammen der Bundesländer, dem Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr 2030)¹⁰⁴, dem Klimaschutz-Sofortprogramm (SPr 2021)¹⁰⁵ sowie der Nationalen Moorschutzstrategie¹⁰⁶ und dem Aktionsprogramm Natürlicher

¹⁰² Torfmoos-Anbau ist großflächig erprobt und hat viele Vorteile – jetzt in die Fläche bringen! Faktenpapier zum Torfmoos-Anbau in Niedersachsen, 02/2021 (https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere_Briefings/202101_Faktenpapier_Torfmoosanbau.pdf).

¹⁰³ Organische Böden umfassen Moorböden, Anmoorböden und Moorfolgeböden. Im politischen Raum werden sie meist als Moorböden bezeichnet.

¹⁰⁴ <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klimamassnahmen-data.pdf?download=1>

¹⁰⁵ <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Klimaschutz/klimaschutz-sofortprogramm-2022.pdf?blob=publicationFile&v=2>.

¹⁰⁶ http://docs.dpaq.de/17908-nationale_moorschutz_strategie.pdf

Klimaschutz (ANK)¹⁰⁷ verankert und die Umsetzung hat begonnen. Im Szenario CARESupreme werden vergleichbare Maßnahmen herangezogen, die Intensität der Umsetzung des MoorbödenSchutzes wird aber erhöht.

Mit dieser Maßnahme werden mehrere Optionen bzw. Dimensionen des MoorbödenSchutzes auf landwirtschaftlichen Flächen auf organischen Böden adressiert:

- ▶ Flächenanteile, die von Ackerland zu Grünland umgenutzt werden,
- ▶ Flächenanteile, die vernässt werden,
- ▶ Niveau der Wasserstandsanhebung auf vernässten Flächen (Vernässungsintensität).

Einerseits werden für die Umsetzung dieser Maßnahmen zum MoorbödenSchutz Fördermittel bereitgestellt (z.B. ELER, EFRE, GAP)¹⁰⁸. Dies berücksichtigt auch die Förderung von Aktivitäten, um eine Paludikulturnutzung zu ermöglichen, und von technischen Maßnahmen zur Wasserstandsregelung. Andererseits werden Instrumente genutzt, die die Verfügbarkeit der zu vernässenden Flächen erhöhen. Hierzu zählen:

- ▶ Vorkaufsrecht bzw. bei Erst-Pachtrecht des Landes/Bundes bei Verkauf oder Verpachtung von Flächen auf organischen Böden (z.B. bei Hofaufgabe),
- ▶ Verbot zur Errichtung von neuer Infrastruktur, die einer Vernässung in der Nachbarschaft entgegensteht, im Bau- bzw. Planungsrecht oder im Bodenschutzgesetz,
- ▶ Einstellung der GAP-Förderung (1. Säule) für trocken genutzte organische Böden einstellen ab der nächsten Förderperiode (ab 2028),
- ▶ Besteuerung der Treibhausgasemissionen, die bei einer trockenen Nutzung organischer Böden im Vergleich zu einer vollständigen Vernässung freigesetzt werden (spätestens ab 2030).

Die Nutzung der vernässten Flächen z.B. als Paludikultur wird im Sektor Landwirtschaft modelliert. Die Installation von PV-Anlagen auf vernässten Flächen (Moor-PV) resultiert aus den Instrumenten zur Neuanlage von PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen im Stromsektor. Die Anlage von Wind- und Solaranlagen auf einer Fläche auf organischen Böden muss derart ausgeführt werden, dass eine vollständige Wiedervernässung der Fläche möglich bleibt.

Parametrisierung

Die Umwandlung von Ackerland zu Grünland auf organischen Böden, die Vernässung und die Intensität der Vernässung werden nach den Zielwerten in Tabelle 47 parametrisiert. Ackerflächen auf organischen Böden werden zeitnah in Grünland umgewandelt oder wiedervernässt. So werden im Jahr 2045 2050 keine organischen Böden mehr als Ackerfläche genutzt. Die Vernässung von Grünland auf organischen Böden (inkl. dem aus Ackerland neu hinzugekommenen Grünland) erreicht im Jahr 2045 eine Rate von 82,5 %. Die Vernässungsintensität der vernässten Flächen wird über die Zeitachse erhöht. Im Jahr 2030 erreichen 40 % der vernässten Flächen eine Vollvernässung (Wasserstand bei -10 bis 0 cm unter Flur). Dieser Anteil steigt bis 2045 auf 80 % an (Tabelle 47). Aufgrund möglicher

¹⁰⁷ <https://www.bmuv.de/download/aktionsprogramm-natuerlicher-klimaschutz>

¹⁰⁸ ELER: Europäischen Landwirtschaftsfond für die Entwicklung des ländlichen Raumes; EFRE: Europäischen Fonds für regionale Entwicklung; GAP: Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union.

Wasserknappheit wird angenommen, dass 10 % der Flächen nur einen Wasserstand von -15 cm unter Flur und 10 % von -20 cm unter Flur erreichen.

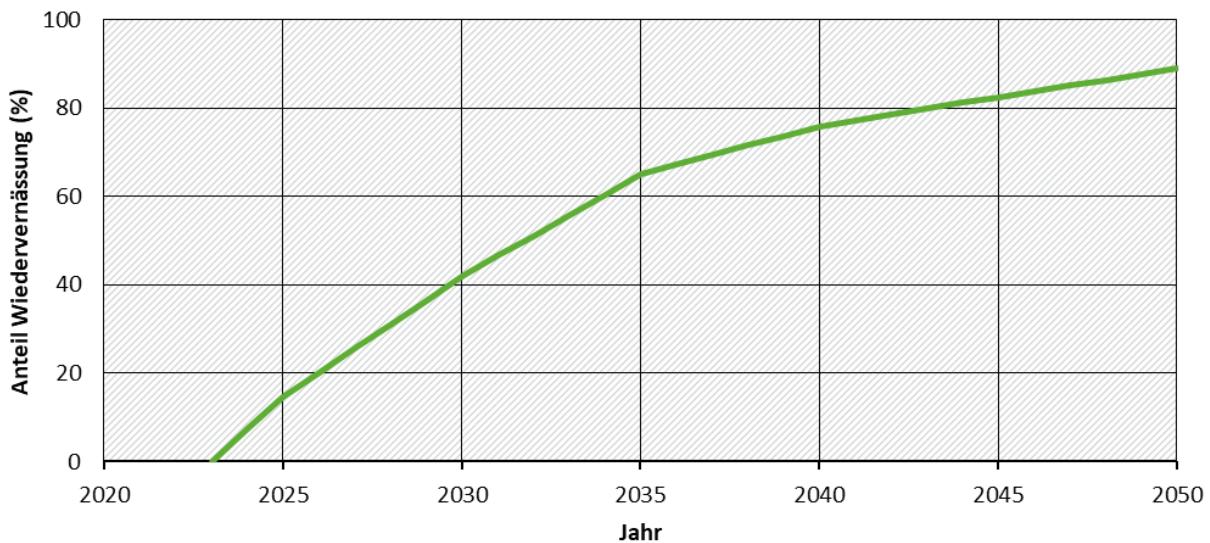
Tabelle 47: Zielwerte für Umwandlung von Ackerland zu Grünland und zur Bodenvernässung, CARESupreme, 2030-2050

Optionen	2030	2045	2050
Umnutzung von Ackerland auf organischen Böden (Anteil zu 2022)	60 % (davon 50 % zu Grünland, 50 % zu wiedervernässten Flächen)	100 % (100 % zu wiedervernässten Flächen)	100 % (100 % zu wiedervernässten Flächen)
Vernässte Acker- und Grünlandfläche (Anteil zu 2022)	41,8 %	82,5 %	89,0 %
Vernässungsintensität vernässter Flächen	40 % Wasserstand -10 cm bis 0 cm unter Flur	80 % Wasserstand -10 cm bis 0 cm unter Flur	80 % Wasserstand -10 cm bis 0 cm unter Flur

Quelle: Eigene Annahmen und Darstellung Öko-Institut

Die zeitliche Entwicklung der wiedervernässten landwirtschaftlichen Fläche auf organischen Böden ist in Abbildung 88 dargestellt. Aufgrund der nötigen Planungsprozesse werden bereits laufende Aktivitäten zur Vernässung von organischen Böden erst im Jahr 2023 wirksam. Bis zum Jahr 2030 werden 40 % der Flächen vernässt. Im Jahr 2045 wird ein Vernässungsgrad von 80 % erreicht, der bis 2050 noch leicht erhöht wird.

Abbildung 88: Anteil der wiedervernässten landwirtschaftlichen Fläche auf organischen Böden im Zeitverlauf, CARESupreme, 2020-2050



Quelle: FABio-Land, eigene Darstellung, Öko-Institut.

A.12.5 Optimierung des Wassermanagements bestehender Feuchtgebiete

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Im LULUCF-Sektor werden Feuchtegebiete in Gewässer und terrestrische Feuchtgebiete unterteilt. Letztere sind feuchte Flächen, aber keine offenen Wasserflächen. Bestehende

terrestrische Feuchtgebietsflächen auf organischen Böden sind z.T. entwässert bzw. der Wasserstand sinkt im Jahresverlauf periodisch auf niedrige Werte, so dass es zu einer Oxidation von organischer Substanz und entsprechender CO₂-Freisetzung kommt.

Mit dieser Maßnahme wird das Wassermanagement bestehender Feuchtgebiete optimiert, d.h. möglichst ganzjährig flurnah, so dass die Treibhausgasemissionen minimiert werden. Die Optimierung ist im Jahr 2030 zu 80 % und im Jahr 2045 zu 100 % abgeschlossen.

Es wird eine Verpflichtung zur Optimierung des Wassermanagements in Feuchtgebieten auf organischen Böden im Wasserhaushaltsgesetz als Erweiterung der allgemeinen Grundsätze der Gewässerbewirtschaftung (§ 6) aufgenommen. Für die Umsetzung wird in Moorschutzprogramme der Länder die Optimierung des Wassermanagements bestehender Feuchtgebiete aufgenommen und Fördermittel bereitgestellt. Zudem können bei Bedarf z.B. EU-Fördermittel (ELER, EFRE)¹⁰⁸ genutzt werden.

Parametrisierung

Diese Maßnahme adressiert verbliebene terrestrische Feuchtgebiete auf organischen Böden. Durch die Optimierung des Wassermanagements dieser Flächen werden die Treibhausgasemissionen je Flächeneinheit reduziert. Ausgehend von den Emissionsfaktoren im Startjahr werden bei Annahme einer Optimierung im Modell die Emissionsfaktoren hin zu einem optimierten Wassermanagement derart fortgeschrieben, dass im Jahr 2030 auf 80 % und ab dem Jahr 2045 auf 100 % der terrestrischen Feuchtgebiete eine Optimierung des Wassermanagements erreicht wird. Für den Zustand eines optimierten Wassermanagements werden die Emissionsfaktoren wie für vollständig wiedervernässte organische Böden angenommen.

A.12.6 Erhalt von Dauergrünland

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Der Erhalt von Dauergrünland ist bereits im Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr 2030)¹⁰⁴ verankert und wird im Rahmen der Greening-Auflagen der GAP bis zum Jahr 2028 umgesetzt. Dies wird bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben.

Parametrisierung

Der Erhalt von Dauergrünland wird bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben.

A.12.7 Humusaufbau in der Landwirtschaft

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Die Entwicklung des Humusgehalts auf landwirtschaftlichen Flächen hängt stark von den kultivierten Feldfrüchten bzw. dem Anbausystem ab. So können erzielte Humuszunahmen durch Umstellung der Fruchtfolge (mehr Humusmehrer und weniger Humuszehrer) in kurzer Zeit wieder verloren gehen, wenn die Fruchtfolge sich wieder ändert (weniger Humusmehrer und mehr Humuszehrer). Eine dauerhafte Zunahme des Humusgehalts auf Ackerflächen ist für die folgenden Fälle zu erwarten:

- ▶ Anlage von Dauerkulturen anstelle von einjährigen Kulturen (z.B. Agroforstsysteme, Hecken, Kurzumtriebsplantagen, Dauergrünland). Holzige Dauerkulturen werden in der Modellierung als Agroforst zusammengefasst.

- ▶ Umstellung der Ackernutzung von konventionellem Landbau auf ökologischen Landbau
(aufgrund hoher Unsicherheiten nicht in die Treibhausgasbilanz aufgenommen)

Die Flächenentwicklung von holzigen Dauerkulturen (Agroforstsysteme, Hecken, Kurzumtriebsplantagen) wird im Landwirtschaftssektor modelliert. Dort fließen Annahmen zur Förderung der Umnutzung bzw. Umstellung und die Förderung von Absatzwegen der Produkte ein (Abschnitt A.11.4).

Parametrisierung

Über eine Schnittstelle wird in FABio-Land diese Flächenkulisse zum Anbau übernommen. Für neue angelegte holzige Dauerkulturen (Agroforstsysteme, Hecken, Kurzumtriebsplantagen), neu angelegtes Dauergrünland und neu auf ökologischen Landbau umgestellte Ackerflächen wird die Wirkung auf die Kohlenstofffestlegung bilanziert.

A.12.8 Waldbewirtschaftung

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Auf der Waldfläche in Deutschland haben sich in den letzten Jahrzehnten die Kohlenstoffpools kontinuierlich erhöht. Vor allem der Kohlenstoffpool „lebende Biomasse“ reagiert sehr stark auf:

- ▶ Intensität der Waldbewirtschaftung (Holzentnahme, Durchforstung): zentrale Maßnahmen sind Waldumbau, hohe Entnahmeraten für Mortalitätsholz und Verringerung der Laubholzentnahme
- ▶ Natürliche Störungen (Windwurf, Trockenheit, Käferkalamitäten): Natürliche Störungen überprägen die Wirkung der Waldbewirtschaftung auf die Waldentwicklung. Vor allem kann sich durch natürliche Störungen die Mortalität der Bäume erhöhen und die Zuwachsleistung abnehmen. In Summe führt beides zu einer Abnahme der Senkenleistung von Waldbeständen.

Die Form und Intensität der Waldbewirtschaftung hängt stark von der Bestandssituation ab. In ökologisch instabilen, fehlbestockten Beständen (z.B. Fichtenbeständen in tieferen Lagen) bestehen deutliche Risiken, dass bei starken natürlichen Störungen Bestände absterben. Dies war eindrücklich in den trockenen Jahren mit hohen Käferschäden seit 2018, aber auch bei Windwurfereignissen z.B. im Jahr 2007 (Kyrill) zu beobachten. Auf derartigen Waldflächen ist es notwendig, den Wald umzubauen hin zu ökologisch stabilen, klimaresilienten Beständen. Schad- und Mortalitätsholz wird zu hohen Anteilen einer Nutzung zugeführt. Beim Waldumbau werden gezielt standortangepasste Baumarten in der Verjüngung gefördert bzw. eingebracht und der Altbestand bei Bedarf frühzeitig eingeschlagen. Der Waldumbau führt in den ersten Jahren zu einer kontrollierten Abnahme der Vorräte auf der Waldfläche. Erst danach wird der Vorrat in ökologisch stabilen, klimaresilienten Beständen wieder aufgebaut. Maßnahmen zum Waldumbau werden bereits in der GAK gefördert. Auch das ANK sowie die Förderprogramme „Klimaangepasstes Waldmanagement“¹⁰⁹ und „Wälder mit hoher Strukturvielfalt und Biodiversität“ (Start geplant für das Jahr 2024) setzen einen Fokus auf Waldumbau.

In ökologisch stabilen, klimaresilienten Waldbeständen wie standortsangepasste Laubmischwälder oder Fichtenbeständen in Höhenlagen ist es hingegen auch jetzt mit vertretbaren Risiken möglich, den Vorrat weiter aufzubauen. Dies wird durch eine Verringerung der Holzentnahme erreicht (S). Dabei können Einzelmaßnahmen wie mehr Totholz auf der

¹⁰⁹ <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/klimaangepasstes-waldmanagement.html>

Waldfläche belassen, Wälder zum Vorratsaufbau extensiver bewirtschaften, Wälder ganz aus der Nutzung nehmen oder Ausweisen von Habitatbäumen die Senkenleistung der Waldfläche erhöhen. Diese Maßnahmen können wiederum über die Förderprogramme „Klimaangepasstes Waldmanagement“¹⁰⁹ und „Wälder mit hoher Strukturvielfalt und Biodiversität“ angereizt werden. Bei Bedarf können die Maßnahmen auf Ebene des Ordnungsrechts auch in die Waldgesetze auf Bundes- oder Landesebene aufgenommen und in nachgeschalteten Durchführungsverordnungen umgesetzt werden.

Parallel zur Verringerung der Holzentnahme muss die Nachfrage nach entsprechenden Holzsortimenten sinken. Dies ist nötig, da ansonsten verstärkt Importe und damit negative Effekte auf die Senkenleistung der Waldfläche in den Herkunftsländern auftreten würden. Dies betrifft vor alle das Sortiment Waldenergieholz von Scheitholz über Hackschnitzel bis hin zu Holzpellets und Holzbriketts.

Parametrisierung

Im Waldmodell FABio-Forest können unterschiedlich starke Annahmen zu natürlichen Störungen eingestellt werden. Für das Szenario CARESupreme wird das Störungsniveau „mittlere Störungen“ gewählt. Damit wird angenommen, dass die Bedingungen für Mortalität und Zuwachs sich so verhalten wie im Mittel über die Jahre 2002 bis 2021, also etwa fünf von 20 Jahren durch starke natürliche Störungen wie Kyrill und die Extremjahre 2018-2020 geprägt sind.

Für die Holzentnahme wird – wie im Projektionsbericht 2024 – als Startpunkt die mittlere Holzentnahme der Jahre 2013 bis 2017 fortgeschrieben. Die Datengrundlage ist dazu die Einschlagsrückrechnung des Thünen-Instituts.¹¹⁰

- ▶ Ausgehend von dieser Fortschreibung wird die Holzentnahme für Laubholz bis zum Jahr 2030 um 2 Mio. m³ und bis zum Jahr 2050 um weitere 3 Mio. m³ reduziert. Die Nadelholzentnahme wird nicht verändert.

A.12.9 Zunahme langlebiger Holzprodukte

Instrumenten- bzw. Maßnahmenbeschreibung

Mit der stofflichen Nutzung von Holz wird Kohlenstoff, der aus dem Wald entnommen wurde, weiterhin im s.g. Holzproduktspeicher gespeichert. Dies ist auch der Fall, wenn holzige Rest- und Abfallstoffe durch Wiederverwendung oder Recycling wieder in Holzprodukten verwendet werden. Je langlebiger Holzprodukte sind, desto langfristiger ist der Speichereffekt im Holzproduktspeicher. Wird Holz hingegen zur energetischen Nutzung verbrannt, wird der Kohlenstoff als CO₂ freigesetzt. Um die aus Klimaschutzsicht vorteilhafte stoffliche Nutzung von Holz zu bevorzugen, ist in der Erneuerbaren Energien-Richtlinie (RED III) in Artikel 3¹¹¹ das Kaskadenprinzip festgeschrieben. So soll sichergestellt werden, dass holzartige Biomasse entsprechend ihrem höchsten wirtschaftlichen und ökologischen Mehrwert in der folgenden Prioritätenfolge genutzt wird: 1) holzbasierte Produkte, 2) Verlängerung der Nutzungsdauer, 3) Wiederverwendung, 4) Recycling und 5) Bioenergie vor 6) Deponierung. Im Szenario CARESupreme wird angenommen, dass das Kaskadenprinzip konsequent umgesetzt wird (R). Dazu werden Förderregelungen für Bioenergie und insbesondere für feste Biobrennstoffe abgeschafft und die Förderung langlebiger Holzprodukte ausgebaut. Auch laufende Aktivitäten

¹¹⁰ Daten zur Einschlagsrückrechnung (EER) des Thünen-Instituts:

<https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzeinschlag-und-rohholzverwendung>

¹¹¹ <https://www.consilium.europa.eu/media/65109/st10794-en23.pdf>

wie die Charta für Holz¹¹² werden verstärkt auf langlebige Holzprodukte ausgerichtet. Die notwendige Verringerung der Holzenergienutzung wird im Modellverbund in den energieverbrauchenden Sektoren umgesetzt.

Parametrisierung

Im LULUCF-Modell FABio-Land ist nach der Methode des IPCC ein Holzproduktspeichermodell integriert. So können Veränderungen der Zuflüsse von Holzprodukten in den Holzproduktspeicher und resultierende Veränderungen der Treibhausgasbilanz abgebildet werden. Der Abfluss von Holzprodukten aus dem Holzproduktspeicher ist eine Funktion der Halbwertszeiten für die Holzprodukte¹¹³. Diese werden bei der Modellierung nicht verändert.

Zuerst wird der Zuflüsse von Holzprodukten in den Holzproduktspeicher als Mittelwert der Jahre 2011 bis 2020 fortgeschrieben. Darauf aufbauend wird der Zufluss im Szenario CARESupreme bis zum Jahr 2030 um zusätzliche 6 Mio. m³ und bis zum Jahr 2050 um zusätzliche 20 Mio. m³ erhöht (siehe Details in Tabelle 48). Diese Mengen wurden abgeglichen mit dem zu erwartenden Holzaufkommen aus der Waldbewirtschaftung sowie aus Rest- und Abfallstoffen (Kaskadennutzung), und es wurde ein möglicher Hochlauf der stofflichen Nutzungspfade eingeschätzt. Gleichzeitig sinkt die Verfügbarkeit an festen Biomassebrennstoffen.

Tabelle 48: Zusätzlicher Zufluss an Holzprodukten (Mio. m³), CARESupreme, 2030-2045

	2030	2040	2045
Sawn wood (domestic)	1,0	3,0	3,0
Sawn wood (export)	0,5	1,0	1,0
Wood panels (domestic)	3,75	9,75	11,75
Wood panels (export)	1,75	5,25	5,25
Paper and paperboard (domestic)	-0,75	-0,75	-0,75
Paper and paperboard (export)	-0,75	-0,75	-0,75
Summe	5,5	17,5	19,5

Quelle: Eigene Annahmen und Darstellung, Name Institut

A.12.10 Methodische Einordnung von CARESupreme zu den aktuellen Treibhausgas-Projektionen 2025

Die Berechnungen im CARE-Vorhaben erfolgten vor Veröffentlichung der zusammenfassenden Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur (BWI-4)¹¹⁴, dem vorläufigen deutschen Treibhausgasinventar 2025¹¹⁵ und den darauf aufbauenden Treibhausgas-Projektionen 2025 (Wehnemann et al. 2025). Für den LULUCF-Sektor unterscheiden sich die Ergebnisse der Treibhausgas-Projektionen 2025 und von CARESupreme sehr stark. An dieser Stelle wird analysiert, zu welchen Anteilen dieser Unterschied auf Maßnahmen und Instrumente in

¹¹² <https://www.charta-fuer-holz.de>

¹¹³ Halbwertzeiten nach IPCC: Schnittholz = 35 Jahre, Holzwerkstoffe = 25 Jahre, Papier/Pappe = 2 Jahre.

¹¹⁴ <https://bwi.info/>

¹¹⁵ <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/treibhausgas-emissionen-lulucf>

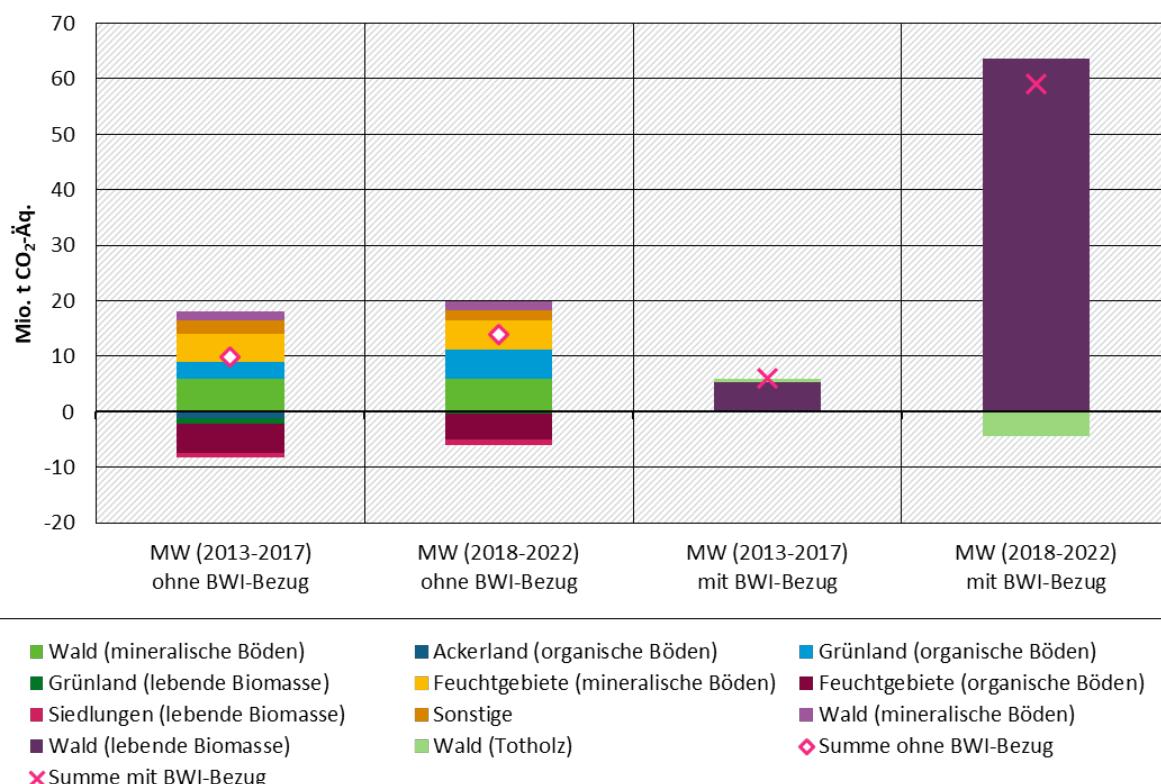
CARESupreme und zu welchen Anteilen auf methodische Unterschiede, insbesondere im Treibhausgasinventar, zurückzuführen sind. Hierzu werden drei Themenbereiche als Blöcke betrachtet:

- ▶ Methodische Anpassungen aufgrund der neuen Daten in der BWI-4 und verbesserte Berechnungen zum LULUCF-Sektor im deutschen Treibhausgasinventar,
- ▶ exogene Annahmen zur Waldentwicklung und Waldmaßnahmen in CARESupreme
- ▶ weitere im Szenario CARESupreme unterstellte LULUCF-Maßnahmen zur sektoralen Transformation und Zielerreichung

Methodische Anpassungen und Daten der BWI-4

In der Modellierung des LULUCF-Sektors wurde in CARESupreme die Waldentwicklung (lebende Biomasse im Wald) mit FABio-Forest abgebildet. FABio-Forest wurde u.a. auf Basis der zusammenfassenden Ergebnisse der Kohlenstoffinventur aus dem Jahr 2017 (CI-2017) kalibriert. Daten für die CI-2017 wurden auf etwa ¼ der Erhebungspunkte der BWI-4 erhoben. Aufgrund von Stichprobeneffekten weicht die Senkenleistung der Jahre 2013 bis 2017, die im deutschen Treibhausgasinventar 2024 noch auf Basis der CI-2017 ausgewiesen wurde, um 5,4 Mio. t CO₂-Äq. von der Senkenleistung im deutschen Treibhausgasinventar 2025 ab (vgl. Abbildung 89). Es wird angenommen, dass dieser Stichprobeneffekt sich in gleicher Höhe in der Modellierung fortsetzt.

Abbildung 89: Veränderung der Treibhausgasbilanz im LULUCF-Sektor zwischen den Berichtsjahren 2024 und 2025



Quelle: CRF-Tabellen zum Treibhausgasinventar der Jahre 2024 und 2025, eigene Darstellung, Öko-Institut. MW = Mittelwert der genannten Jahre, BWI = Bundeswaldinventur.

Hohe Kohlenstoffverluste der Waldflächen in den Jahren 2018 bis 2022 (Abbildung 89) sind als Effekt von Trockenheit und Käferkalamitäten zu interpretieren und nicht als Effekte methodischer Anpassungen. In der Waldmodellierung in FABio-Forest als Teil des LULUCF-Sektors wurden sehr hohe natürliche Störungen durch Trockenheit und Käferkalamitäten in den Jahren 2018 bis 2022 bereits vor Veröffentlichung der vierten Bundeswaldinventur im Oktober 2024 antizipiert (siehe Abschnitt 9.1.3), so dass die Modellierungsergebnisse als richtungssicher zu betrachten sind (Hennenberg et al. 2024a; Hennenberg et al. 2024b).

Im nationalen Treibhausgasinventar vom Berichtsjahr 2024 zu 2025 erfolgten weitere methodische Verbesserungen, die von den Ergebnissen der Waldinventuren unabhängig sind. Zu nennen ist vorrangig die verbesserte Abbildung der Kohlenstoffgehalte und deren Veränderung im Boden (Abbildung 89).

Exogene Annahmen zur Waldentwicklung und Waldmaßnahmen in CARESupreme

Mit der Waldmodellierung in FABio-Forest wurden die folgenden Aspekte im Vergleich zum OMS1222 der Treibhausgas-Projektionen 2025 berücksichtigt:

- ▶ Natürliche Störungen ausgedrückt als Höhe der Mortalität und der Zuwachsreduktion der Bäume (exogene Annahme): Konkret sind in der Fortschreibung in CARESupreme für etwa 25 % und im OMS1222¹¹⁶ für etwa 50 % der Jahre extreme Störungen hinterlegt.
- ▶ Intensität der Holzentnahme (exogene Annahme): Startwert in CARESupreme ist die mittlere Holzentnahme der Jahre 2013 bis 2017 für Laub- und Nadelholz. Im OMS1222 wird die höhere mittlere Entnahmeraten der Jahre 2013 bis 2022 fortgeschrieben.
- ▶ Darauf aufbauend wird in CARESupreme die Holzentnahme der Laubbäume bis zum Jahr 2050 um 5 Mio. m³ pro Jahr reduziert (Waldmaßnahme). Im OMS1222 fehlt diese Maßnahme.
- ▶ Optimierung der Entnahme von Mortalitätsholz zu Gunsten einer Schonung vitaler Bäume (Waldmaßnahme): Die Entnahmerate für Mortalitätsholz beträgt in CARESupreme 90 % für Stammholz und 50 % für Industrieholz. Aus Analysen zur BWI-4 wurde abgeleitet, dass die historische Entnahmerate von Mortalitätsholz bei etwa 60 % für Stammholz und 30 % für Industrieholz liegt (entspricht den Annahmen im OMS1222).

Die exogenen Annahmen führen gegenüber den Annahmen im OMS1222 zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen im LULUCF-Sektor um 10 bis 11 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr (Abbildung 90 für das Jahr 2030 und Abbildung 91 für das Jahr 2045; siehe weitere Stützjahre in Tabelle 49). Die Optimierung der Entnahme von Mortalitätsholz führt zu einer Treibhausgasminderung um 7 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr. Die Reduktion der Laubholzentnahme von 2 Mio. m³ im Jahr 2030 erreicht eine Treibhausgasminderung von 2,5 Mio. t CO₂-Äq. und von 4 Mio. m³ im Jahr 2045 von 7 Mio. t CO₂-Äq..

In Summe wird mit diesen Annahmen und Maßnahmen erreicht, dass die LULUCF-Treibhausgasbilanz im Jahr 2030 ca. 15 Mio. t CO₂-Äq. beträgt. Gegenüber dem OMS1222 ist dies eine Verbesserung um ca. 20 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 und um ca. 25 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045. Vereinfachend gesagt, würden diese exogenen Annahmen zur Waldentwicklung und die angenommenen Waldmaßnahmen aus dem CARESupreme-Szenario beim OMS1222 unterstellt, wäre der Ausgangswert für zusätzliche erforderliche Maßnahmen nicht bei knapp 40 Mio. t CO₂-Äq., sondern nur bei rund 15 Mio. t CO₂-Äq..

¹¹⁶ OMS = Ohne-Maßnahmen-Szenario in den Treibhausgas-Projektionen 2025. Im OMS1222 der Treibhausgas-Projektionen werden die Bedingungen fortgeschrieben, wie sie in der Periode von 2012 bis 2022 vorgeherrscht haben.

Weitere im Szenario CARESupreme unterstellte LULUCF-Maßnahmen zur sektoralen Transformation und Zielerreichung

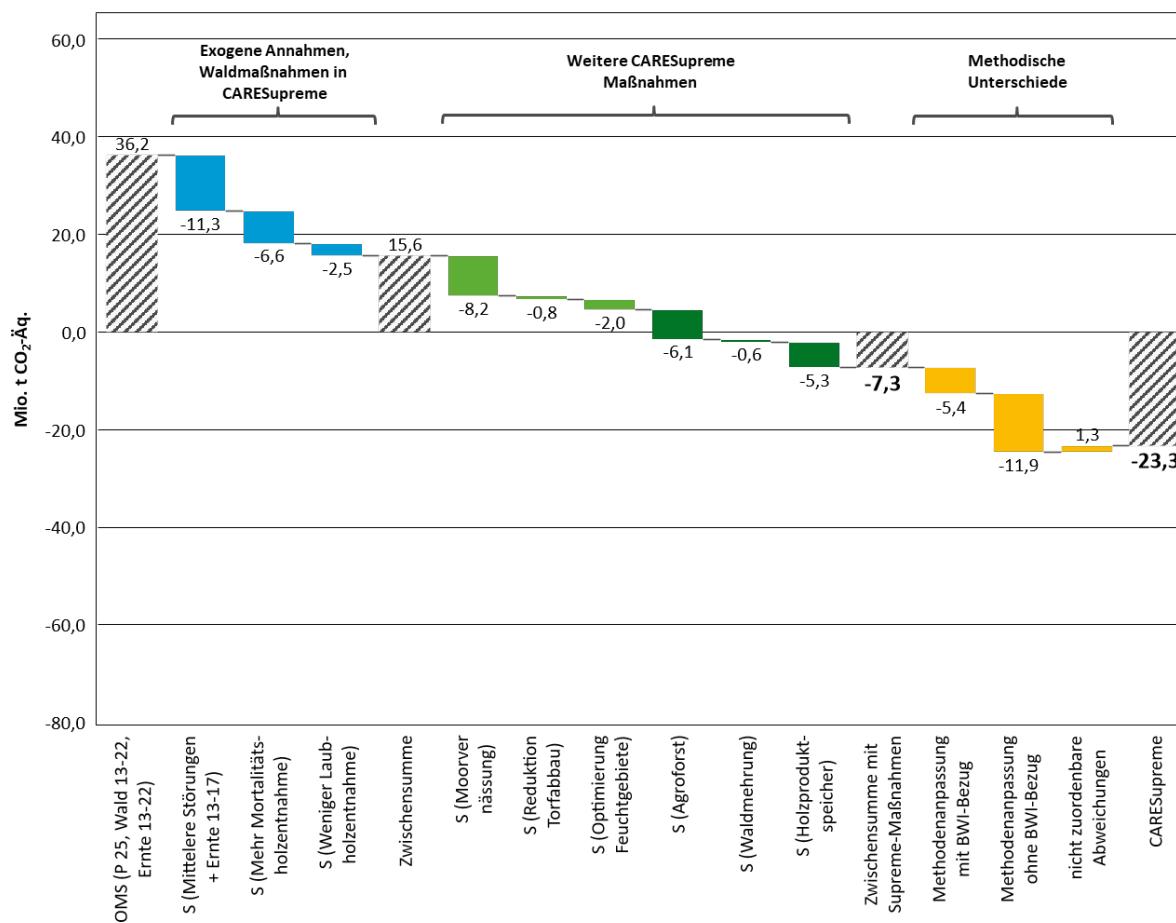
Das OMS1222 stellt im Rahmen der Treibhausgas-Projektionen eine Abbildung der derzeitigen Politiken dar. CARESupreme hingegen soll eine nachhaltige Transformation und Zielerreichung der nationalen Treibhausgasneutralität abbilden. CARESupreme macht also deutlich, an welchen Stellen mit welchen Maßnahmen die derzeitigen Lücken bei der Zielerreichung geschlossen werden können. Ergänzend zu den obigen Waldmaßnahmen führen Maßnahmen außerhalb der Waldfläche zu einer weiteren Treibhausgasminderung von etwa 23 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 (Abbildung 90) und von knapp 56 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045 (Abbildung 91). Bedeutende Maßnahmen sind die Moorwiedervernässung, die Anlage von Agroforst und die Erhöhung der Holzproduktspeichers.

Mit diesen Maßnahmen wird, auch unter den aktuellen Daten, bis zum Jahr 2045 eine Treibhausgasbilanz von mindestens -40 Mio. t CO₂-Äq. und somit das KSG-Ziel für dieses Jahr erreicht (Abbildung 90). Im Jahr 2030 aber beträgt die Treibhausgasbilanz nach Berücksichtigung der CARESupreme-Maßnahmen lediglich gut 7 Mio. t CO₂-Äq.. Das KSG-Ziel von mindestens -25 Mio. t CO₂-Äq. bis zum Jahr 2030 wird also trotz der ambitionierten Maßnahmen deutlich verfehlt (Abbildung 90).

Methodische Unterschiede

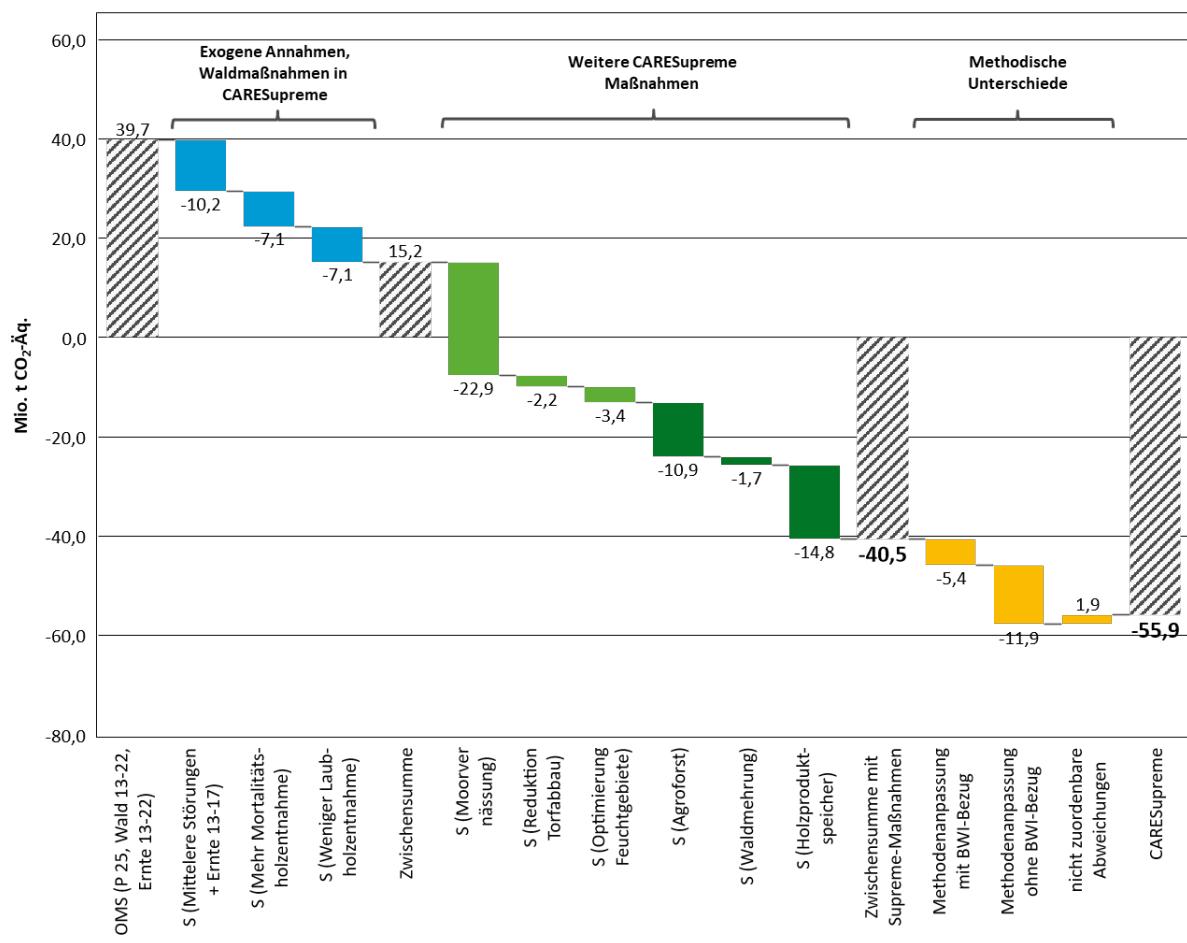
Die oben genannten methodischen Unterschiede zwischen den Treibhausgasinventaren 2024 und 2025 betragen in Summe gut 17 Mio. t CO₂-Äq.. Werden diese Treibhausgasmengen berücksichtigt, können die verbliebenen Unterschiede zwischen dem OMS1222 und CARESupreme sowohl im Jahr 2030 als auch im Jahr 2045 gut erklärt werden (Abbildung 90, Abbildung 90 und Tabelle 49).

Abbildung 90: Analyse von CARESupreme zu den Treibhausgas-Projektionen 2025 für das Jahr 2030



Quelle: Eigene Analysen in FABio-Land. OMS = Ohne-Maßnahmen-Szenario in den Treibhausgas-Projektionen 2025 (P 25, Wehnemann et al. 2025). S = CARESupreme, 13-22 bzw. 13-17 = Fortschreibung der Bedingungen in den Jahren 2013 bis 2022 bzw. 2013 bis 2017, BWI = 4. Bundeswaldinventur.

Abbildung 91: Analyse von CARESupreme zu den Treibhausgas-Projektionen 2025 für das Jahr 2045



Quelle: Eigene Analysen in FABio-Land. OMS = Ohne-Maßnahmen-Szenario in den Treibhausgas-Projektionen 2025 (P 25, Wehnemann et al. 2025). S = CARESupreme, 13-22 bzw. 13-17 = Fortschreibung der Bedingungen in den Jahren 2013 bis 2022 bzw. 2013 bis 2017, BWI = 4. Bundeswaldinventur.

Tabelle 49: Analyse von CARESupreme zu den Treibhausgas-Projektionen 2025 für die Jahre 2025, 2030, 2035, 2040 und 2045

	2025	2030	2035	2040	2045
OMS (P 2025, Wald 2013-2022, ohne Bäume)	49,7	45,3	49,6	49,1	49,0
OMS Bäume (P 2025, Wald 2013-2022)	-8,5	-9,1	-9,5	-9,4	-9,3
OMS (P 2025, Wald 2013-2022)	41,2	36,2	40,1	39,7	39,7
Exogene Annahmen und Waldmaßnahmen in CARESupreme					
S (Mittlere Störungen + Ernte 2013-2017)	-11,6	-11,3	-11,0	-10,4	-10,2
S (Mehr Mortalitätsholzentnahme)	-6,2	-6,6	-7,0	-7,1	-7,1
S (Weniger Laubholzentnahme)	-1,2	-2,5	-3,9	-5,9	-7,1
Zwischenstand Wald	22,2	15,6	18,2	16,3	15,2
Weitere CARESupreme-Maßnahmen					

	2025	2030	2035	2040	2045
S (Moorvernässung)	-1,8	-8,2	-14,2	-18,3	-22,9
S (Reduktion Torfabbau)	-0,3	-0,8	-1,5	-2,1	-2,2
S (Optimierung Feuchtgebiete)	-0,9	-2,0	-2,3	-2,6	-3,4
S (Anlage Agroforst)	-3,4	-6,1	-8,8	-11,5	-10,9
S (Waldmehrung)	-0,2	-0,6	-1,0	-1,4	-1,7
S (Holzproduktspeicher)	-1,8	-5,3	-10,5	-14,7	-14,8
Zwischenstand CARESupreme-Maßnahmen	13,8	-7,3	-20,0	-34,3	-40,5
Methodische Unterschiede					
Methodenanpassung mit BWI-Bezug	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4
Methodenanpassung ohne BWI-Bezug	-11,9	-11,9	-11,9	-11,9	-11,9
Zwischenstand Methodenkorrektur	-3,4	-24,6	-37,3	-51,6	-57,8
Ungeklärte Abweichungen	-5,6	1,3	-1,3	0,4	1,9
CARESupreme	-9,0	-23,3	-38,6	-51,2	-55,9

Quelle: Eigene Analysen in FABio-Land. OMS = Ohne-Maßnahmen-Szenario in den Treibhausgas-Projektionen 2025 (P 2025, Wehnemann et al. 2025). S = CARESupreme, 2013-2022 bzw. 2013-2017 = Fortschreibung der Bedingungen in den Jahren 2013 bis 2022 bzw. 2013 bis 2017. Bäume = lebende Biomasse der Waldfäche, BWI = 4. Bundeswaldinventur.

A.13 Abfallwirtschaft

A.13.1 Deponieverordnung

Die relevanten rechtlichen Regelungen entstammen insbesondere der Abfallablagerungsverordnung von 2001, die ab dem 1. Juni 2005 die Ablagerung unbehandelter organikhaltiger Abfälle (und damit der für die Ausgasung von Methan verantwortlichen organischen Stoffe) unterbindet und eine anderweitige Behandlung erfordert. Dies ist insbesondere thermische Behandlung durch energetische Verwertung oder mechanisch-biologische Abfallbehandlung. Die Regelungen der Abfallablagerungsverordnung sind 2009 in die Deponieverordnung eingeflossen, welche auch die diesbezüglichen Regelungen der TASi ersetzt.

Für die Ablagerung von vorbehandelten Abfällen auf Deponien wird angenommen, dass diese bezogen auf die Menge je Einwohner unverändert bleiben, in der Summe demzufolge entsprechend der Entwicklung der Einwohnerzahl folgen. Das Multi-Phasen-Abfallmodell berücksichtigt die einzelnen Abfallfraktionen, so dass über deren unterschiedlichen Halbwertszeiten die Emissionen berechnet und anschließend summiert werden. Das kinetische Modell zur Emissionsberechnung aus der Ablagerung von Abfällen auf Deponien bildet neben der Ausgasung der auf Deponien abgelagerten organischen Materialien über die Zeit auch die Erfassung von Deponiegas ab. Der Anteil des Deponiegases wird daher über die Ausgestaltungen zum Deponiegas ermittelt (siehe Abschnitt A.13.4).

A.13.2 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Am 30.3.2011 hat die Bundesregierung die Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes beschlossen. Das Gesetz ist am 1. Juni 2012 in Kraft getreten. Durch Umsetzung der fünfstufigen Abfallhierarchie der EU-Abfallrahmenrichtlinie wird dem Recycling eine höhere Bedeutung als der energetischen Verwertung beigemessen. Dies führt zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen in anderen Sektoren wie dem Industrie- und im Energiesektor. Für die Verringerung der Emissionen des Abfallsektors sind vor allem die organischen Abfälle relevant. Gemäß der Novelle dieser Richtlinie aus dem Jahr 2018 müssen ab dem Jahr 2025 mindestens 55 % aller Siedlungsabfälle recycelt werden. Seit 1.1.2015 sind zudem nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz überlassungspflichtige Bioabfälle aus privaten Haushaltungen flächendeckend getrennt zu erfassen und zu verwerten. Seitdem haben zahlreiche weitere Landkreise und Kommunen die getrennte Bioabfallerfassung und -verwertung neu eingeführt. Eine vollständige Getrenntfassung ist jedoch noch nicht umgesetzt. Bislang sind ca. 55 % der Einwohner Deutschlands an die getrennte Bioabfallerfassung angeschlossen.

Für die Entwicklung der getrennt erfassten Abfallmengen des Bioabfalls werden die Potenzialschätzungen aus der Studie „UBA (2019): BioRest. Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem“ (Fehrenbach et al. 2019) für Biogut und Grüngut aus dem BAU-Szenario für das Jahr 2030 übernommen. Damit wird 2030 für Biogut mit 6,5 Mio. t Frischmasse (FM) (4,19 Mio. t FM 2015) und für Grüngut mit 5,5 Mio. t FM (4,65 Mio. t FM 2015) gerechnet. Alle weiteren Mengen werden gegenüber der aktuellen Statistik konstant gehalten. Annahmen zur Reduktion von Lebensmittelabfällen werden in Abschnitt A.2.2 getroffen.

Entsprechend der Zielsetzung der Klimaneutralität sollte die Verwendung von Rest- und Abfallstoffen für die energetische Nutzung gesteigert werden. Heute wird ein Großteil der Bioabfälle kompostiert. Im Szenario wird daher von einem Anstieg der Vergärung von Bioabfällen bis zu einem Anteil von 70 % ausgegangen. Derzeit werden 38 % vergoren und 62 % kompostiert.

A.13.3 Ausweitung und Beschleunigung der Deponiebelüftung

Seit 2013 wird die direkte Deponiebelüftung zur Reduktion des Methanbildungspotenzials im Rahmen der NKI-Kommunalrichtlinie gefördert. Durch Weiterführung und Intensivierung dieser Maßnahme, wie im Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 beschrieben, insbesondere durch intensivere Information und Motivation der betroffenen Akteure sowie Erhöhung der maximalen Zuwendung, wurden bereits eine Reihe von kleinen Projekten gefördert. Im Rahmen der Kommunalrichtlinie wird die Deponiebelüftung 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. Sollte die finanzielle Förderung im Rahmen der Kommunalrichtlinie nicht im anvisierten Umfang Erfolg haben, kann eine Verpflichtung zur Belüftung geeigneter Deponien in der Deponieverordnung festgeschrieben werden, um die Ziele zu erreichen. Dies kann durch eine Änderung der Deponieverordnung und der verpflichtenden Einführung der Deponiebelüftung auf geeigneten Deponien erfolgen.

Für die Erreichung der Klimaziele ist die Förderung von großen Projekten zur Deponiebelüftung entscheidend (Minderungspotenzial ca. 20.000 t CO₂-Äq./Deponie/a). Da Umfang und Größe der Projekte je nach Deponie variiert wird als Zielwert der Anteil des DDOCm (Abbaubarer organischer Kohlenstoff, massebezogen) definiert. Bis zum Jahr 2030 sollen ca. 30 % des DDOCs

durch Maßnahmen zur Deponiebelüftung abgebaut werden. Da die Maßnahmen auch über 2030 hinauswirken, wird der Zielwert für die Jahre nach 2030 im Rahmen der Modellierung ermittelt.

Die Berechnung der Deponiebelüftung erfolgt nach einer derzeit im Auftrag des UBA ermittelten Methodik zur Berechnung der aeroben In-Situ-Stabilisierung von Deponien. Die Berechnung erfolgt auf Basis des Abfallmodells, welches die ermittelten Einsparungen durch die Deponiebelüftung prozentual auf die Gesamtergebnisse umlegt.

A.13.4 Optimierte Gaserfassung

Im Rahmen der Kommunalrichtlinie wird die optimierte Sammlung der Gase auf Deponien gefördert, wodurch eine Verbesserung der bestehenden Gaserfassung um mindestens 25 % erreicht werden soll, oder mindestens 60 % des anfallenden Gases erfasst werden müssen.

Die Anzahl an Deponien, bei denen dies passiert, soll deutlich erhöht werden. Für die Parametrisierung werden die Annahmen aus dem Klimaschutzprogramm 2030 übernommen. Im Rahmen der Modellierung wird geprüft, welcher Minderungsbeitrag über eine Ausweitung der optimierten Gaserfassung erreichbar wäre.

A.13.5 Optimierte Abwasserbehandlung

Im Rahmen der Arbeiten wird nochmal geprüft, ob es im Bereich der optimierten Abwasserbehandlung weitere Minderungspotenziale gibt. Dazu zählen beispielsweise der Anschluss von Klärgruben an die öffentliche Kanalisation oder auch die optimierte Faulschlammbehandlung. Nach einer ersten Bewertung werden keine quantifizierbaren Minderungspotenziale erwartet. In diesem Fall erfolgt eine qualitative Beschreibung mit Verweis auf mögliche Beispiele.

Die Anschlussraten an die öffentliche Kanalisation sind in Deutschland sehr hoch, so dass nur noch minimale Emissionsminderungen durch den Anschluss verbleibender Klärgruben an die öffentliche Kanalisation zu erwarten sind. Darüber hinaus sind die für die Hebung dieser Minderungspotenziale notwenigen Infrastrukturinvestitionen teilweise prohibitiv hoch, so dass vorerst nicht zu erwarten ist, dass diese angestrebt werden. Nichtdestotrotz kann angenommen werden, dass durch Bevölkerungsrückgang in ländlichen Gebieten und eine weitere Steigerung der Anschlussraten hier noch Minderungen möglich sind.

Die Größe des Potenzials für die optimierte Klärschlammbehandlung ist unklar. Untersuchungen aus der Schweiz (Cunningham et al. 2015) sowie von der TU Kaiserslautern (Gretzschel et al. 2012) zeigen, dass hier noch eine Möglichkeit der Reduktion von Methanemissionen besteht. Da jedoch Unsicherheit sowohl über die tatsächlichen Emissionen als auch über die Reduktionsmöglichkeiten besteht, wird auf eine genaue Parametrisierung dieser Maßnahme vorerst verzichtet. Im Rahmen der detaillierten Szenarienausgestaltung erfolgt eine weitere Recherche und gegebenenfalls die Implementierung von Emissionsminderungen in diesem Bereich.

B Anhang: Verursacherbilanz

Technikwechsel bei der Energienutzung können dazu führen, dass Emissionen aus einem Sektor in einen anderen Sektor verlagert werden. Insbesondere der Wechsel von direkter Brennstoffnutzung hin zu Strom (z. B. durch Elektromobilität und Wärmepumpen) und Fernwärme verlagert Emissionen aus den Endenergiesektoren in die Energiewirtschaft. Letztendlich werden die Emissionen der Energiewirtschaft aber weiterhin durch die Endenergienachfragen verursacht. Daher ist es sinnvoll, zusätzlich zu der Treibhausgasbilanzierung entsprechend den Inventarregeln und KSG-Sektoren die Emissionen in einer Verursacherbilanz nachrichtlich den Endenergiesektoren zuzuordnen.

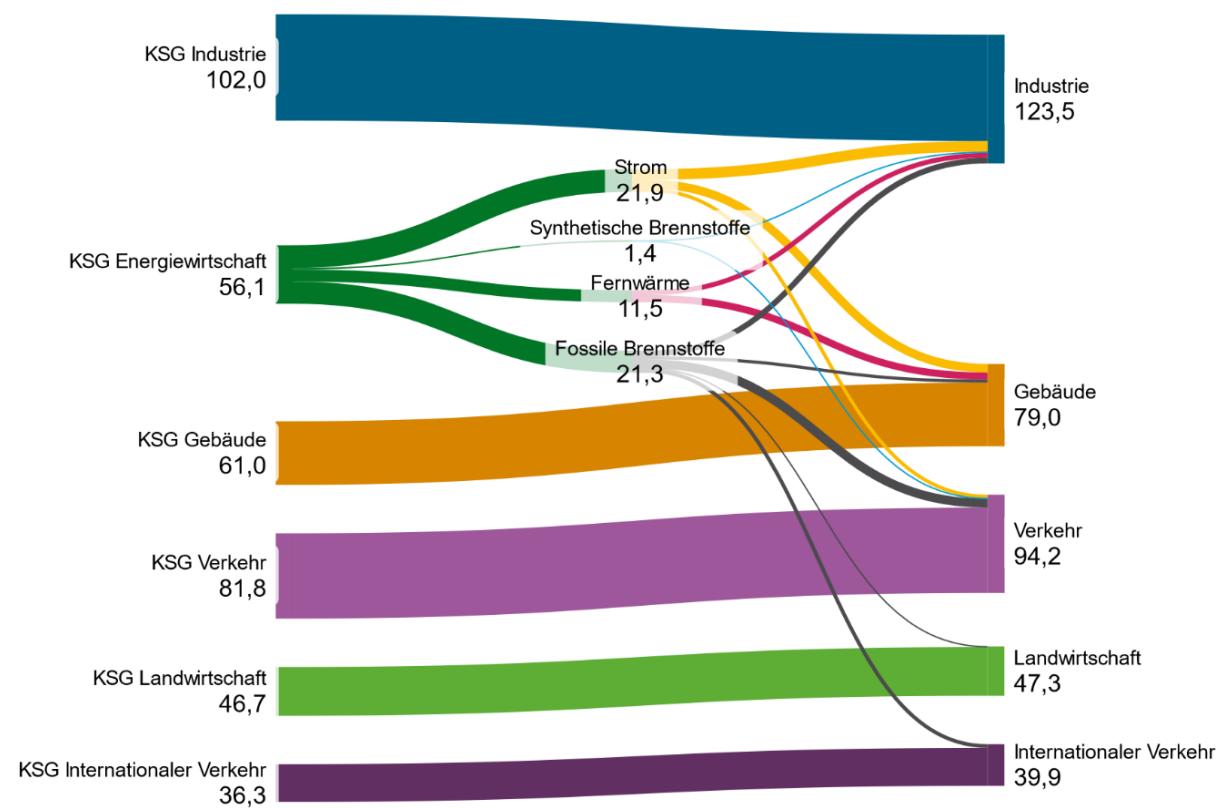
Um eine Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Energieträgern der Endenergiesektoren zu gewährleisten, werden nicht nur die mit der Bereitstellung von Strom und Fernwärme verbundenen Emissionen, sondern die gesamten Emissionen der Energiewirtschaft im Sinne einer Verursacherbilanz auf die KSG-Sektoren Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft sowie den internationalen Luft- und Seeverkehr umgelegt. Da in den KSG-Sektoren Abfallwirtschaft und LULUCF keine Energieverbräuche berichtet werden, werden diesen beiden Sektoren in der Verursacherbilanz keine Emissionen der Energiewirtschaft zugeordnet. Es werden beispielsweise folgende Allokationen vorgenommen:

- ▶ Die Emissionen der Stromscheiben der öffentlichen Kraftwerke werden entsprechend der Stromverbräuche anteilig auf die Sektoren aufgeteilt, wobei auch die Wasserstoffherstellung berücksichtigt wird.
- ▶ Die Emissionen der Wärmescheibe der öffentlichen Kraftwerke sowie der Heizwerke werden entsprechend der Fernwärmeverbräuche aufgeteilt.
- ▶ Die Emissionen der Raffinerien werden entsprechend der anteiligen Verbräuche an Mineralölprodukten auf die Sektoren Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft aufgeteilt.
- ▶ Die Emissionen des Erdgastransport- und -verteilnetzes werden entsprechend der Gasverbräuche aufgeteilt.

Durch den Vergleich der nachrichtlichen Ergebnisse der Verursacherbilanz mit den Ergebnissen der übrigen Emissionsbilanzierung in diesem Bericht und insbesondere in Abschnitt 2.1.1 kann geschlussfolgert werden, wo die relevantesten Emissionsverlagerungen geschehen.

Wie die Emissionen der Energiewirtschaft den übrigen Sektoren zugeordnet werden, veranschaulicht das Sankey-Diagramm in Abbildung 92. Dabei wurde das Jahr 2030 gewählt, da es in diesem Jahr noch nennenswerte Emissionen der Energiewirtschaft gibt.

Abbildung 92: Veranschaulichung der Verursacherbilanz für das Jahr 2030 in CARESupreme



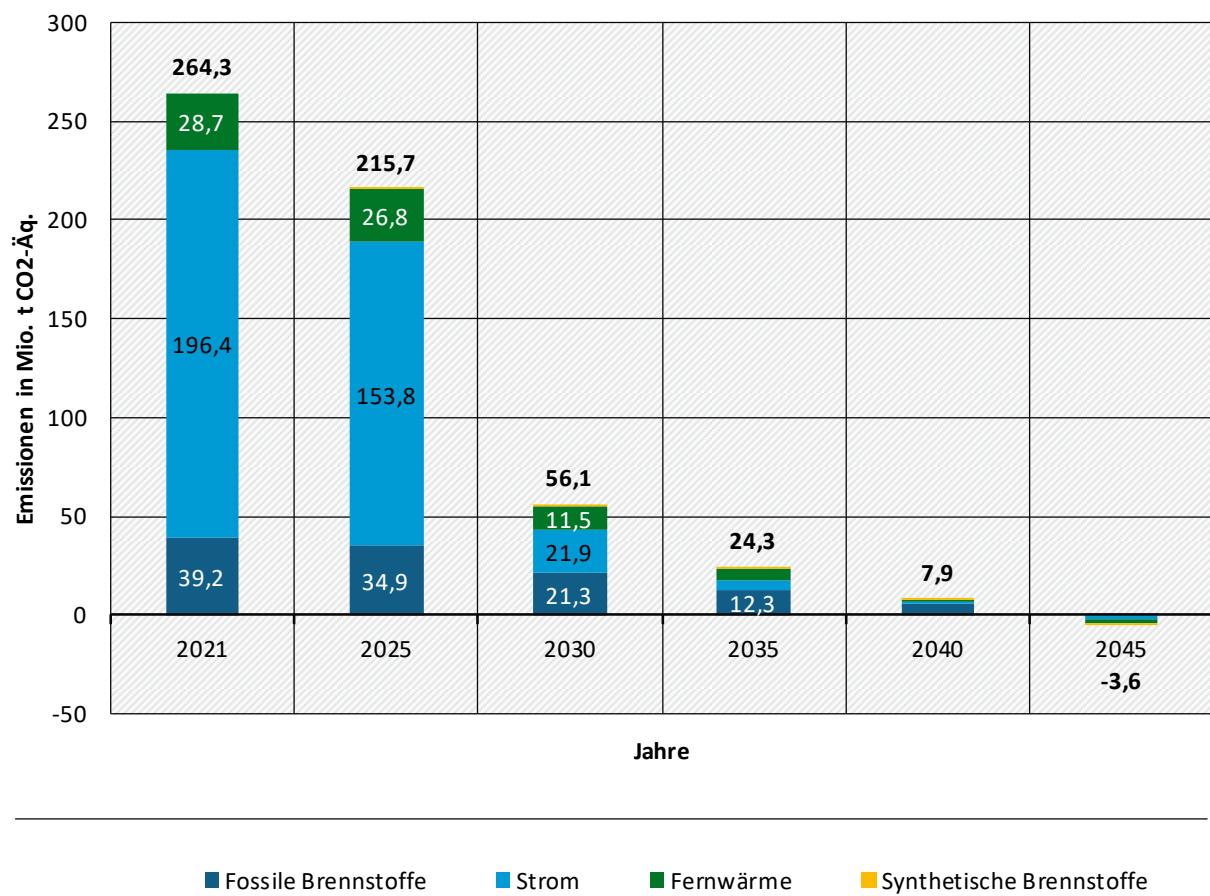
Anmerkung: KSG-Sektoren LULUCF und Abfallwirtschaft nicht dargestellt, da mit diesen keine Energieverbräuche verbunden sind. Werte in Mio. t CO₂-Äq.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, basierend auf Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Im Basisjahr 2021 hat die Stromerzeugung den größten Anteil an den Emissionen der Energiewirtschaft (Abbildung 93). Auf die Fernwärmeerzeugung und die Bereitstellung fossiler Brennstoffe (Mineralöl- und Kohleprodukte sowie Erdgas) entfällt ein deutlich kleinerer Anteil. Die Herstellung synthetischer Brennstoffe (Wasserstoff und PtL-Kraftstoffe) spielt historisch keine Rolle. Die Dekarbonisierung der Energiewirtschaft erfolgt bis 2030 vor allem bei der Stromerzeugung. In der folgenden Dekade gibt es bei allen bisherigen Produktgruppen der Energiewirtschaft wesentliche Emissionsreduktionen. Da die Stromerzeugung noch nicht vollständig dekarbonisiert ist, werden insbesondere um 2035 den synthetischen Brennstoffen Emissionen zugewiesen.

Im letzten Szenarienjahr (2045) von CARESupreme werden WACCS und BECCS angewandt, siehe Kapitel 3. Dadurch hat die Energiewirtschaft dann insgesamt negative Emissionen. Das führt dazu, dass in der Verursacherbilanz dem Verbrauch der Sekundärennergieträger Strom, Wärme und Wasserstoff negative Emissionen zugewiesen werden. Dies bedeutet aber nicht, dass ein zusätzlicher Verbrauch von Strom, Wärme oder Wasserstoff zu einer Erhöhung der Senkenwirkungen führen.

Abbildung 93: Emissionen der Energiewirtschaft nach bereitgestelltem Energieträger in CARESupreme, 2021-2045



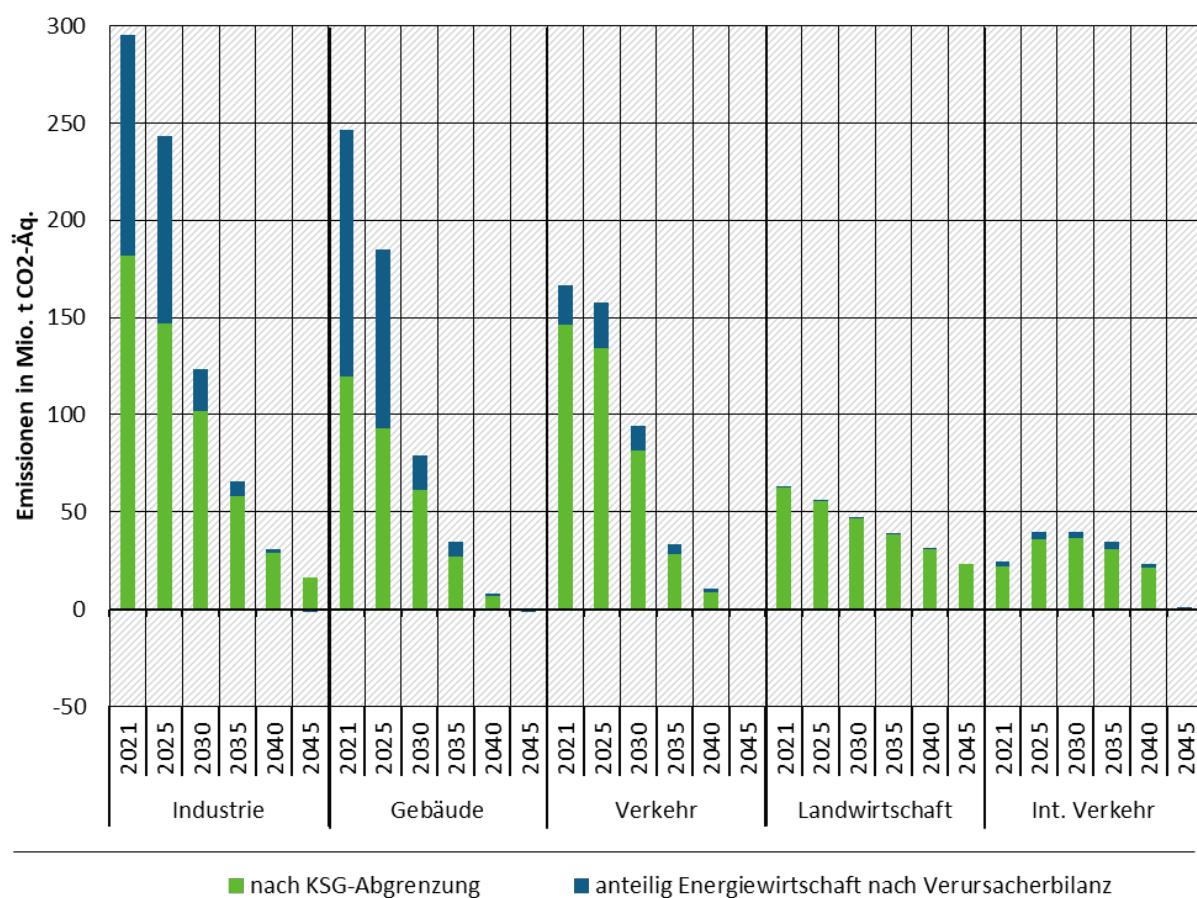
■ Fossile Brennstoffe ■ Strom ■ Fernwärme ■ Synthetische Brennstoffe

Anmerkung: Einzeln beschriftet sind nur Werte größer als 10 Mio. t CO₂-Äq.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, basierend auf Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Abbildung 94 stellt das Ergebnis der Verursacherbilanz grafisch dar, Tabelle 50 listet die entsprechenden Werte auf. Dargestellt sind jeweils die Emissionen nach KSG-Abgrenzung sowie die zusätzlichen Emissionen, die in der Energiewirtschaft verursacht werden.

Abbildung 94: Verursacherbilanz je Sektor im Szenario CARESupreme, 2021-2045



Anmerkung: KSG-Sektoren LULUCF und Abfallwirtschaft nicht dargestellt, da mit diesen keine Energieverbräuche verbunden sind. Für Zahlenwerte siehe Tabelle 50.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, basierend auf Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Tabelle 50: Treibhausgasemissionen nach Verursacherbilanz im Szenario CARESupreme, in Mio. t CO₂-Äq., 2021-2045

	2021	2025	2030	2035	2040	2045
KSG-Sektor Industrie	181,9	146,7	102,0	58,2	28,7	16,3
+ anteilig Energiewirtschaft	113,4	96,4	21,4	7,7	2,0	-1,5
= Industrie nach Verursacherbilanz	295,3	243,0	123,4	65,8	30,6	14,8
KSG-Sektor Gebäude	119,5	93,3	61,0	27,3	6,5	0,3
+ anteilig Energiewirtschaft	127,3	91,5	18,0	7,0	1,5	-1,6
= Gebäude nach Verursacherbilanz	246,8	184,7	79,0	34,3	8,0	-1,4
KSG-Sektor Verkehr	146,1	134,0	81,8	28,0	8,4	0,1
+ anteilig Energiewirtschaft	20,6	23,4	12,5	5,4	2,0	-0,4
= Verkehr nach Verursacherbilanz	166,7	157,5	94,2	33,4	10,3	-0,3
KSG-Sektor Landwirtschaft	62,4	55,4	46,7	38,5	30,5	23,2

	2021	2025	2030	2035	2040	2045
+ anteilig Energiewirtschaft	0,8	0,8	0,6	0,5	0,2	0,0
= Landwirtschaft nach Verursacherbilanz	63,2	56,2	47,3	39,0	30,8	23,2
Internationaler Verkehr	22,1	35,9	36,3	30,9	21,0	0,3
+ anteilig Energiewirtschaft	2,2	3,6	3,6	3,7	2,2	0,0
= Int. Verkehr nach Verursacherbilanz	24,3	39,5	39,9	34,6	23,2	0,3

Anmerkung: KSG-Sektoren LULUCF und Abfallwirtschaft nicht dargestellt, da mit diesen keine Energieverbräuche verbunden sind.

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

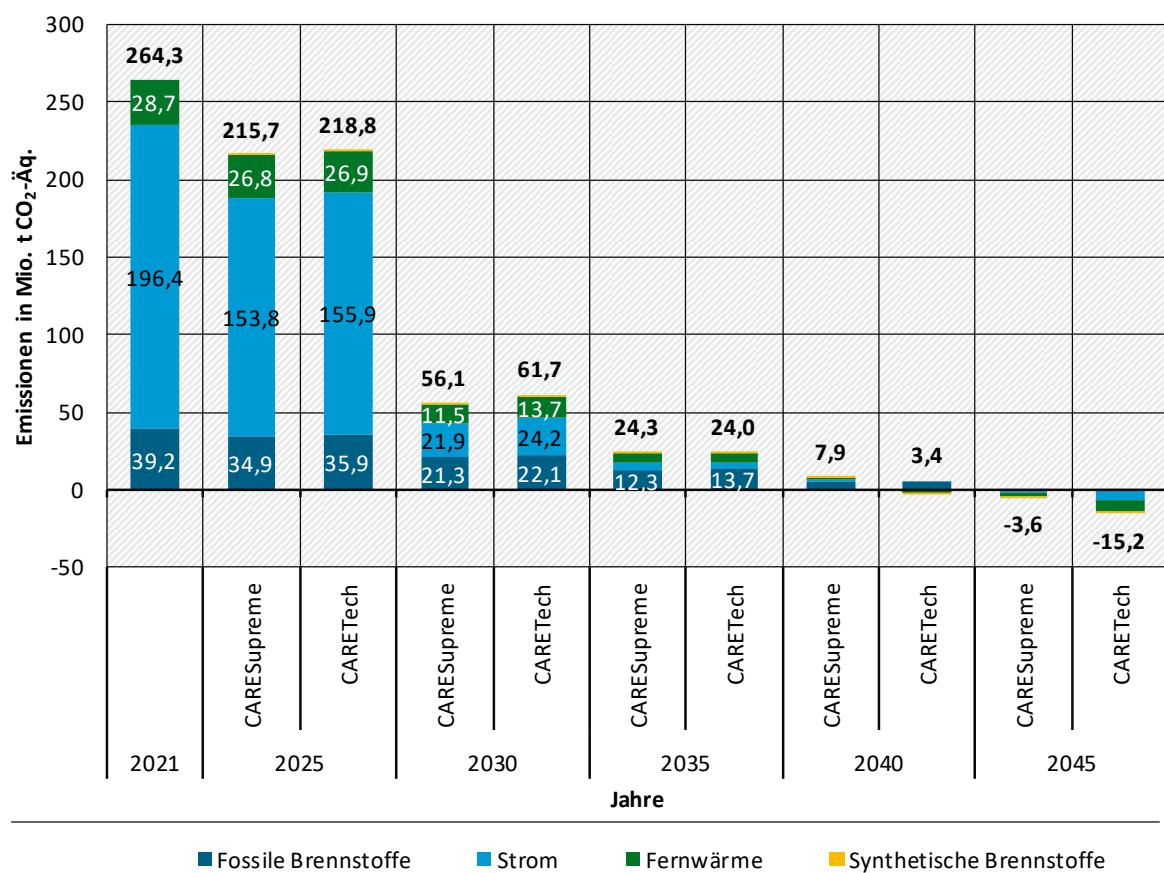
Die Verursacherbilanz zeigt, dass im Basisjahr 2021 der KSG-Sektor Gebäude die meisten Emissionen in der Energiewirtschaft erzeugte, gefolgt von der Industrie. Im Vergleich dazu sind die anteiligen Emissionen des Verkehrs an den Emissionen der Energiewirtschaft um eine Größenordnung kleiner. Dies liegt daran, dass Verkehr hauptsächlich Mineralölprodukte nachfragte, aber wenig Strom und keine Fernwärme. Auf die Landwirtschaft und den internationalen Verkehr entfiel jeweils ein noch einmal um eine Größenordnung kleinerer Anteil der Energiewirtschaftsemisionen.

Im CARESupreme-Szenario sinken im Allgemeinen in allen Sektoren die anteiligen Emissionen der Energiewirtschaft. Das bedeutet, dass die Emissionen in der Energiewirtschaft und dort insbesondere in der Stromerzeugung schneller sinken, als die Stromverbräuche in den Endverbrauchssektoren durch neue Verbraucher wie beispielsweise Wärmepumpen und Elektromobilität ansteigen. Im Verkehr ist lediglich kurzfristig zwischen 2021 und 2025 ein kleiner Anstieg der anteiligen Emissionen der Energiewirtschaft zu sehen, verursacht durch eine fast Vervierfachung des Stromverbrauchs in diesem Zeitraum. Beim internationalen Verkehr führt das Wachstum der Kraftstoffverbräuche zu einem Anstieg der anteiligen Emissionen der Energiewirtschaft bis 2035, wobei der Großteil des Anstiegs bis 2025 geschieht, als Rückkehreffekt nach der Covid-19-Pandemie.

Die negativen Emissionen der Energiewirtschaft im Jahr 2045 führen dazu, dass in der Verursacherbilanz dem Verbrauch der Sekundärenergieträger Strom, Wärme und Wasserstoff negative Emissionen zugewiesen werden. Für die Sektoren Gebäude und Verkehr ist die daraus verteilte anteilige Energiewirtschaftsemissionssenke größer als die direkten Emissionen entsprechend der KSG-Logik. Dies bedeutet, dass diese Sektoren nach Verursacherbilanz vollständig treibhausgasemissionsneutral sind bzw. sogar eine kleine Emissionssenke verursachen. Auch dem Industriesektor ordnet die Verursacherbilanz im Jahr 2045 eine anteilige Energiewirtschaftsemissionssenke zu. Diese sind aber nur knapp ein Zehntel so groß wie die Industrieemissionen in KSG-Abgrenzung. Für Landwirtschaft und den internationalen Verkehr führt die Verursacherbilanz zu kaum einer Änderung der Emissionen.

Im Szenario CARETech ändert sich die Verteilung der Emissionen der Energiewirtschaft auf die Energieträger nur geringfügig. Bis 2030 sind die Emissionen von Strom und Fernwärme etwas höher als in CARESupreme, anschließend etwas geringer. Im Jahr 2045 ist die Emissionssenke der Energiewirtschaft in CARETech deutlich höher als in CARESupreme, dem entsprechend wird auch den einzelnen Energieträgern eine höhere Senkenwirkung zugeordnet.

Abbildung 95: Emissionen der Energiewirtschaft nach bereitgestelltem Energieträger in CARESupreme und CARETech, 2021-2045

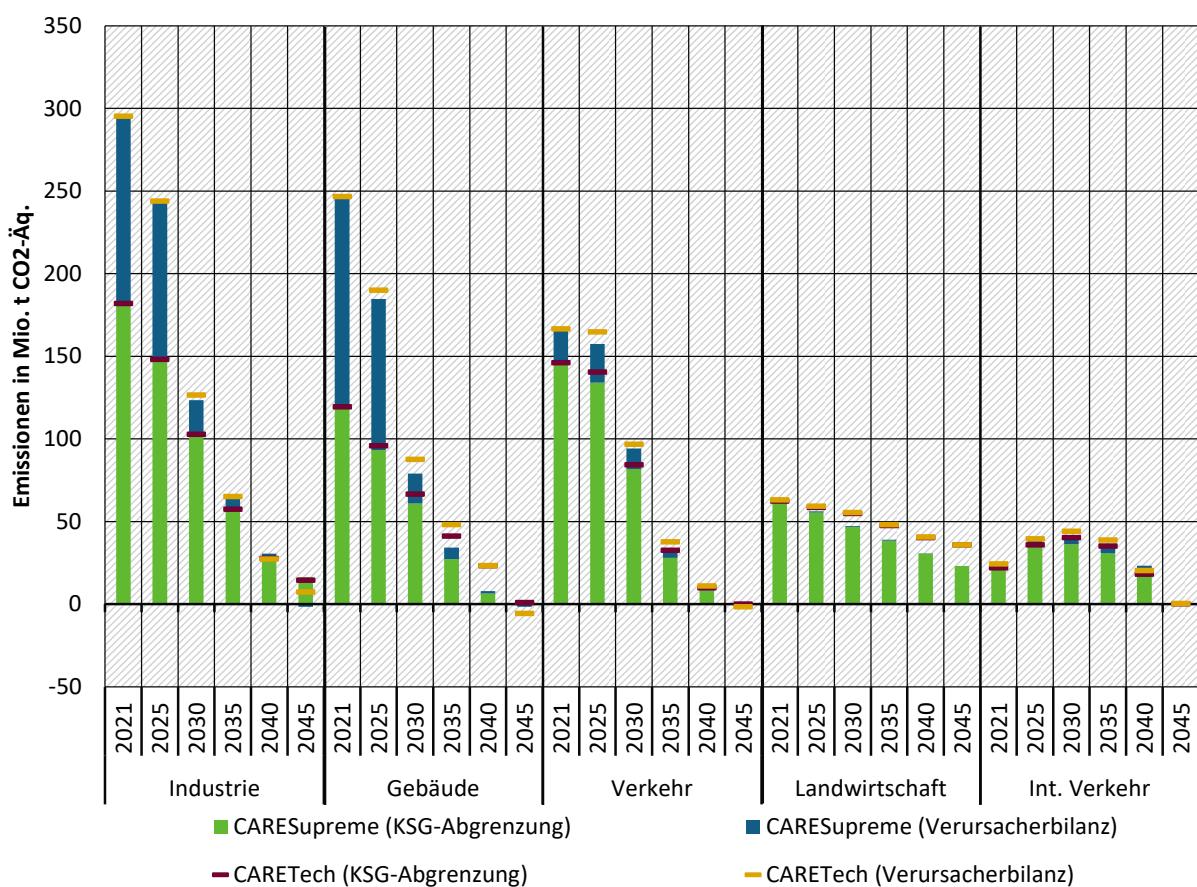


Anmerkung: Einzeln beschriftet sind nur Werte größer als 10 Mio. t CO₂-Äq.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, basierend auf Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Die sektoralen Emissionen aus der Verursacherbilanz als Vergleich der sektoralen Emissionen sind in Abbildung 96 dargestellt. Die zugehörigen Werte befinden sich in Tabelle 50 und Tabelle 51. Generell zeigt sich, dass in den frühen Szenarienjahren die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien bei den anteiligen Energiewirtschaftsemissionen deutlich geringer ist als die Unterschiede bei den Emissionen in der KSG-Logik. In den späten Szenarienjahren hingegen führen die anteiligen negativen Emissionen der Energiewirtschaft dazu, dass die sektoralen Emissionen kleiner bzw. die sektorale Emissionssenke in CARETech größer ist als in CARESupreme. Lediglich in der Landwirtschaft im Jahr 2045 sind Emissionen nach der Verursacherbilanz in CARETech deutlich höher als in CARESupreme. Dies liegt daran, dass die energetischen Emissionen der Landwirtschaft nur einen geringen und im Szenarienverlauf weiter absinkenden Anteil an den gesamten Emissionen des KSG-Sektors Landwirtschaft aufweisen.

Abbildung 96: Verursacherbilanz je Sektor in CARESupreme und CARETech, 2021-2045



Anmerkung: KSG-Sektoren LULUCF und Abfallwirtschaft nicht dargestellt, da mit diesen keine Energieverbräuche verbunden sind. Für Zahlenwerte siehe Tabelle 50 und Tabelle 51.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, basierend auf Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Tabelle 51: Treibhausgasemissionen nach Verursacherbilanz im Szenario CARETech, in Mio. t CO₂-Äq., 2021-2045

	2021	2025	2030	2035	2040	2045
KSG-Sektor Industrie	181,9	148,1	102,8	57,5	27,7	14,6
+ anteilig Energiewirtschaft	113,4	95,9	23,7	7,6	-0,3	-7,2
= Industrie nach Verursacherbilanz	295,3	244,0	126,5	65,1	27,4	7,4
KSG-Sektor Gebäude	119,5	95,9	66,7	42,1	23,2	0,9
+ anteilig Energiewirtschaft	127,3	94,1	20,9	6,9	0,1	-6,4
= Gebäude nach Verursacherbilanz	246,8	190,0	87,6	48,1	23,3	-5,5
KSG-Sektor Verkehr	146,1	140,4	84,3	32,6	9,9	0,1
+ anteilig Energiewirtschaft	20,6	24,4	12,5	5,2	1,1	-1,7
= Verkehr nach Verursacherbilanz	166,7	164,8	96,9	37,8	11,0	-1,5
KSG-Sektor Landwirtschaft	62,4	58,5	54,9	47,7	40,6	35,8
+ anteilig Energiewirtschaft	0,8	0,8	0,7	0,5	0,2	-0,1

	2021	2025	2030	2035	2040	2045
= Landwirtschaft nach Verursacherbilanz	63,2	59,3	55,6	48,1	40,6	35,8
Internationaler Verkehr	22,1	36,0	40,2	35,2	18,1	0,3
+ anteilig Energiewirtschaft	2,2	3,6	3,6	3,8	2,3	0,2
= Int. Verkehr nach Verursacherbilanz	24,3	39,6	44,1	38,9	20,4	0,5

Anmerkung: KSG-Sektoren LULUCF und Abfallwirtschaft nicht dargestellt, da mit diesen keine Energieverbräuche verbunden sind.

Quelle: UBA (2023), Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES