



STUDIE

Klimaneutrales Deutschland

Von der Zielsetzung zur Umsetzung –
Vertiefung der Szenariopfade

**Bitte zitieren als:**

Agora Think Tanks, Prognos AG, Öko-Institut e.V., Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Universität Kassel (2024): Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung – Vertiefung der Szenariopfade.

Studie

Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung – Vertiefung der Szenariopfade.

Erstellt von

Agora Think Tanks
 Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
 T +49 (0)30 700 14 35-000
www.agora-thinktanks.org
info@agora-thinktanks.org

In Kooperation mit

Prognos AG
 Goethestraße 85 | 10623 Berlin
Öko-Institut e.V.
 Borkumstraße 2 | 13189 Berlin
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
 Döppersberg 19 | 42103 Wuppertal
Universität Kassel
 Mönchebergstraße 19 | 34109 Kassel

Die inhaltlichen Eckpunkte der Szenarien und die Ausgestaltung der Politikinstrumente wurden gemeinsam von den Agora Think Tanks und den Kooperationspartner:innen entwickelt. Die Szenariomodellierung und -berechnung erfolgte durch die Kooperationspartner:innen. Prognos war dabei federführend für die übergreifende Ausgestaltung der Szenarien und die inhaltliche Gesamtprojektleitung seitens des Konsortiums. Darüber hinaus verantwortete Prognos die Sektoren Gebäude und Energiewirtschaft und Teile der nicht-energieintensiven Industrie. Das Öko-Institut war zuständig für Verkehr, Landwirtschaft, Abfall und LULUCF. Das Wuppertal Institut bearbeitete gemeinsam mit der Universität Kassel den Sektor Industrie.

Projektleitung

Dr. Corinna Fischer (Agora Energiewende),
 Lea Nesselhauf (Agora Energiewende);
 Inka Ziegenhagen (Prognos), Marco Wünsch (Prognos)

Autorinnen und Autoren

Agora Energiewende: Dr. Corinna Fischer, Lea Nesselhauf, Simon Müller, Philipp Godron, Fabian Huneke, Mathias Koch, Niels Wauer
Agora Industrie: Paul Münnich, Dr. Julia Metz
Agora Agrar: Dr. Wilhelm Klümper, Ivonne Kampermann
Agora Verkehrswende: Dr. Carl-Friedrich Elmer, Marion Vieweg
Prognos AG: Inka Ziegenhagen, Dr. Andreas Kemmler, Aurel Wünsch, Dr. Alexander Piégsa, Elias Althoff, Hans Dambeck, Purnima Kulkarni, Sven Kreidelmeyer, Sebastian Lübbers, Saskia Lengning, Melina Lohmann, Dr. Fabian Muralter, Nils Thamling, Minh Phuong Vu, Marco Wünsch
Öko-Institut e.V.: Margarethe Scheffler, Dr. Klaus Hennenberg, Dr. Mirjam Pfeiffer, Kirsten Wiegmann (alle Bereich Energie und Klimaschutz); Dennis Seibert, Konstantin Kreye, Peter Kasten (alle Bereich Ressourcen und Mobilität)
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH: Dr. Georg Holtz, Dr. Sascha Samadi, Süheyb Bilici, Ylva Kloo, Mathieu Saurat
Universität Kassel: Dr. Clemens Schneider, Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer

Danksagung

Erst das Engagement vieler weiterer Kolleginnen und Kollegen hat diese Studie möglich gemacht. Für die tatkräftige Unterstützung möchten wir uns daher bedanken bei Joshua Grünberg, Katharina Hartz, Janna Hoppe, Frank Jordans, Anna Kraus, Thorsten Lenck, Dr. Jahel Mielke, Aleksandar Nikolic, Alexandra Steinhart, Uta Weiß, Anja Werner, Moritz Zackariat (alle Agora Energiewende); Arnaud Brizay, Dr. Christine Chemnitz, Prof. Dr. Harald Grethe (alle Agora Agrar); Dr. Leandro Janke, Frank Peter, Helen Rolwing, Julian Somers (alle Agora Industrie); Christian Hochfeld, Dr. Philipp Prein, Dr. Wiebke Zimmer (alle Agora Verkehrswende).

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

Deutschland hat sich auf den Weg zur Klimaneutralität gemacht. Trotz wichtiger Erfolge, zum Beispiel beim Ausbau der Erneuerbaren Energien, stehen in der aktuellen Debatte vor allem die Herausforderungen im Vordergrund. Mit der Synthesestudie „Klimaneutrales Deutschland – Von der Zielsetzung zur Umsetzung“ haben wir gezeigt, wie ein ausgewogener Politikmix, eine mutige Investitionsstrategie und sozial gerecht ausgestaltete Politikmaßnahmen die Herausforderungen adressieren können.

Der Synthesestudie liegt eine differenzierte Szenariomodellierung zugrunde. Die hier vorliegende Publikation richtet sich an Leserinnen und Leser,

die die Szenariopfade genauer verstehen möchten. Sie bietet einen vertieften Einblick in die technologischen Entwicklungen und in die wirtschaftlichen und infrastrukturellen Entscheidungen, die zur Klimaneutralität führen. Sie macht Modelle und Annahmen transparent und zeigt zentrale Eckdaten. Zusammen mit der Studie wird ein umfangreicher Datenanhang online veröffentlicht, der es ermöglicht, die Modellannahmen nachzuvollziehen. Damit wollen wir einen Beitrag zum fachlich informierten Austausch über unterschiedliche Zukunftspfade leisten.

Wir wünschen eine angenehme Lektüre.

Simon Müller

Direktor Deutschland, Agora Energiewende

→ Ergebnisse auf einen Blick

- 1 **Zentrale Schritte zur Klimaneutralität sind getan.** Die Klimaziele sind gesetzlich fixiert und Maßnahmen zeigen Wirkung. Die Emissionen etwa in der Energiewirtschaft sind seit 2014 um rund 40 Prozent gesunken. Zugleich gibt es neue Herausforderungen – etwa bei der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und der sozialverträglichen Wende im Gebäude- und Verkehrssektor. Und es gilt, den Beitrag der Landnutzungssektoren zur Klimaneutralität zu gestalten.
- 2 **Das Zusammenspiel von Elektrifizierung und Erneuerbaren-Ausbau schafft Freiräume.** Ein zentraler Hebel für Klimaneutralität ist die Elektrifizierung der Nachfragesektoren. Die Industrie kann dadurch kosteneffizient Emissionen senken. Gebäude- und Verkehrssektor werden unabhängiger von teuren Optionen wie tiefer Sanierung oder CO₂-neutralen Kraftstoffen. Dafür ist ein ambitionierter Erneuerbaren-Ausbau nötig. Dieser senkt im Szenario die Abhängigkeit von Energieimporten bis 2045 um rund 85 Prozent.
- 3 **Die nachhaltige Nutzung von Biomasse sowie neue Technologien sind wichtige Bausteine der Klimaneutralität.** Gehölze auf landwirtschaftlichen Flächen leisten im Szenario einen bedeutenden Beitrag zur Biomasseproduktion. Biomasse wird insbesondere als Baustoff oder chemischer Grundstoff eingesetzt und in Kaskaden genutzt. Eine CO₂-Abscheidung am Produkt-Lebensende ermöglicht im Jahr 2045 Netto-Negativemissionen. Außerdem nutzt das Szenario ein erweitertes Technologieportfolio – etwa saisonale Wärmespeicher, Luft-Luft-Wärmepumpen oder Futterzusätze, die den Methanausstoß von Rindern mindern.
- 4 **Zügige Weichenstellungen und ein kluger Politikmix können die nötigen Investitionen mobilisieren.** Das gilt für große Infrastrukturen wie Wasserstoffnetze, Kraftwerke oder Ladeinfrastruktur genau wie für individuelle Entscheidungen über Heizungskauf oder E-Mobilität. Im Szenario reizt ein verlässlicher CO₂-Preispfad Investitionen an, Marktregulierung sorgt für Planungssicherheit und gezielte Förderung erleichtert die Anfangsinvestitionen.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis / Verzeichnis der Sensitivitätsanalysen	8
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Zusammenfassung	11
2 Einleitung	31
3 Grundsätze des Szenarios	32
3.1 Ziele und Konzeption des Szenarios	32
3.2 Methodik	32
3.3 Rahmendaten	40
4 Ergebnisübersicht	42
5 Ergebnisse für die Sektoren	45
5.1 Energiewirtschaft	45
5.1.1 Übersicht	45
5.1.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage	47
5.1.3 Szenariopfade	48
5.1.4 Treibhausgasemissionen	62
5.1.5 Zentrale Weichenstellungen	62
5.2 Industrie	64
5.2.1 Übersicht	64
5.2.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage	65
5.2.3 Szenariopfade	67
5.2.4 Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen	77
5.2.5 Zentrale Weichenstellungen	81
5.3 Gebäude	82
5.3.1 Übersicht	82
5.3.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage	83
5.3.3 Szenariopfade	85
5.3.4 Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen	92
5.3.5 Zentrale Weichenstellungen	93
5.4 Verkehr	97
5.4.1 Übersicht	97
5.4.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage	98
5.4.3 Szenariopfade	100
5.4.4 Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen	103
5.4.5 Zentrale Weichenstellungen	105
5.5 Landwirtschaft	107
5.5.1 Übersicht	107

5.5.2	Sektorabgrenzung und Ausgangslage	108
5.5.3	Szenariopfade	109
5.5.4	Treibhausgasemissionen	111
5.5.5	Politische Handlungsoptionen	111
5.6	Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Wald (LULUCF)	113
5.6.1	Übersicht	113
5.6.2	Sektorabgrenzung und Ausgangslage	114
5.6.3	Szenariopfade	115
5.6.4	Treibhausgasemissionen	117
5.6.5	Politische Handlungsoptionen	118
5.7	Abfall	119
5.7.1	Übersicht	119
5.7.2	Sektorabgrenzung und Ausgangslage	120
5.7.3	Szenariopfade	120
5.7.4	Treibhausgasemissionen	121
6	Ergebnisse für Querschnittsthemen	122
6.1	Biomasse	122
6.1.1	Relevanz	122
6.1.2	Szenariopfade	122
6.1.3	Politische Handlungsoptionen	124
6.2	Wasserstoff und strombasierte Energieträger	126
6.2.1	Relevanz	126
6.2.2	Szenariopfade	126
6.2.3	Zentrale Weichenstellungen	132
6.3	Carbon Management und Carbon Capture and Storage (CCS)	134
6.3.1	Relevanz	134
6.3.2	Szenariopfade	134
6.3.3	Zentrale Weichenstellungen	138
7	Literaturverzeichnis	140
8	Anhang	145
8.1	Modelle	145
8.1.1	Prognos Strommarktmodell	145
8.1.2	ProgRESS – Prognos Residential Sector Simulation Modell (Private Haushalte)	146
8.1.3	GHD-Nachfrage Modell	148
8.1.4	Verkehrsmodell TEMPS	149
8.1.5	Landwirtschaftsmodell LiSE	150
8.1.6	LULUCF-Modell FABio-Land	152
8.1.7	Abfallmodell Waste Mod	153
8.1.8	Modellierung der Industrie	153
8.2	Kennzahlen	157

Abbildungsverzeichnis

Abb. A	Reduktionspfad der Treibhausgasemissionen bis 2045	12
Abb. B	Maßnahmen im Szenario Klimaneutrales Deutschland – Umsetzung	13
Abb. C	Energiewirtschaftssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	14
Abb. D	Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren	15
Abb. E	Industriesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	17
Abb. F	Gebäudesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	20
Abb. G	Verkehrssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	22
Abb. H	Landwirtschaftssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	24
Abb. I	LULUCF-Sektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	26
Abb. J	Abfallsektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	28
Abb. 1	Reduktionspfad der Treibhausgasemissionen bis 2045	42
Abb. 2	Maßnahmen im Szenario Klimaneutrales Deutschland – Umsetzung	43
Abb. 3	Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren	44
Abb. 4	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern	44
Abb. 5	Energiewirtschaftssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	45
Abb. 6	Stromnachfrage nach Sektoren	48
Abb. 7	Monatlicher Stromverbrauch nach Endverbrauchssektor, 2045	49
Abb. 8	Leistungsentwicklung des Kraftwerksparks, 2023–2045	51
Abb. 9	Zu- und Rückbau der Erneuerbaren Energien	52
Abb. 10	Nettostromerzeugung und Importsaldo	54
Abb. 11	Brennstoffbasierte Kraftwerke und Flexibilitäten, 2045	55
Abb. 12	Saisonale Struktur der Stromerzeugung, 2045	56
Abb. 13	Struktur der brennstoffbasierten Stromerzeugung	57
Abb. 14	Vollkosten der Stromerzeugung – H ₂ - und PtL-Kraftwerke	58
Abb. 15	Netzausbau und Entwicklung der Cross-Border-Kapazitäten, 2025–2045, und Stromaustausch, 2045	59
Abb. 16	Entwicklung und Struktur der Nachfrage nach leitungsgebundener Wärme	60
Abb. 17	Energieträgereinsatz in der Nah- und Fernwärmeerzeugung	60
Abb. 18	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft	63
Abb. 19	Industriesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	64
Abb. 20	Stahlproduktion nach Verfahren	68
Abb. 21	Stahlnachfrage, Stahlschrotteinsatz und Stahlschrottaufkommen nach Branchen	68
Abb. 22	Neuinvestitionen in der Stahlindustrie	69
Abb. 23	Primärenergiebedarf der Stahlerzeugung in Deutschland	69
Abb. 24	Kunststoffnachfrage und inländische Polymerproduktion (inkl. Rezyklate)	70
Abb. 25	Rohstoffbasis für die Kunststoffproduktion	71
Abb. 26	Endenergiebedarf und Dampfbereitstellung in der chemischen Industrie (ohne stoffliche Energieträgerbedarfe)	72
Abb. 27	Minderung des Klinkerbedarfs durch Maßnahmen im Bau und Optimierung des Bindemittelportfolios	74
Abb. 28	Hochlauf der CO ₂ -Abscheidung in der Klinkerproduktion	75
Abb. 29	Endenergieeinsatz für Wärme und Kühlung in der Nahrungsmittelproduktion, im Maschinen- und Fahrzeugbau und sonstigen Branchen	77
Abb. 30	Entwicklung des Endenergieverbrauchs* in der Industrie	78

Abb. 31	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Industrie	78
Abb. 32	Gebäudesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	82
Abb. 33	Entwicklung der Bevölkerung und Haushalte (links) und Entwicklung der Bevölkerung nach Altersgruppen (rechts)	85
Abb. 34	Neu errichtete Wohngebäude im Vergleich mit Wohnungsbedarfsprognose (links) und neu errichtete Nichtwohngebäude (rechts)	86
Abb. 35	Anteil neu errichteter Gebäude mit Holz als überwiegendem Baustoff nach Gebäudetypen	87
Abb. 36	Absatzstruktur Wärmeerzeuger, Bereich Wohngebäude	88
Abb. 37	Beheizungsstruktur im Gebäudebestand nach Gebäudetyp und Heizungssystemen	90
Abb. 38	Modernisierungsrate der Bauteile nach Gebäudetyp (oben), Sanierungsrate (unten links) und nach Sektoren (unten rechts)	91
Abb. 39	Mittlerer spezifischer Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser, nach Gebäudetypen	92
Abb. 40	Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors	93
Abb. 41	Sensitivitätsanalyse: abgeschwächte Gebäudeeffizienz	95
Abb. 42	Verkehrssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	97
Abb. 43	Entwicklung der Personenverkehrsnachfrage	100
Abb. 44	Entwicklung der Güterverkehrsnachfrage	101
Abb. 45	Entwicklung der Neuzulassungen und des Bestands an Pkw	102
Abb. 46	Entwicklung der Neuzulassungen und des Bestands von schweren LKW	103
Abb. 47	Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im nationalen Verkehr	104
Abb. 48	Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im internationalen Verkehr inklusive Nicht-CO ₂ -Effekten	105
Abb. 49	Landwirtschaftssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	107
Abb. 50	Entwicklung des Tierbestands	110
Abb. 51	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft	111
Abb. 52	LULUCF-Sektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	113
Abb. 53	Entwicklung der Flächennutzung	115
Abb. 54	Neue Gehölze auf landwirtschaftlichen Flächen	117
Abb. 55	Treibhausgasbilanz des LULUCF-Sektors	117
Abb. 56	Abfallsektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen	119
Abb. 57	Reduktion der Treibhausgasemissionen im Abfallsektor	121
Abb. 58	Biomasse nach Sektoren: energetischer Einsatz und Feedstock für die stoffliche Nutzung	122
Abb. 59	Inländisches Biomasse-Angebot für den energetischen Einsatz und als Feedstock für die stoffliche Nutzung	124
Abb. 60	Wasserstoffnachfrage und Wasserstoffangebot	127
Abb. 61	Importpotenzial Deutschlands an erneuerbarem Wasserstoff per Pipeline im Jahr 2035 (Szenario Fortgesetzte Anstrengung)	130
Abb. 62	Kosten von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff	131
Abb. 63	Saisonalität der Wasserstoffbereitstellung und -nachfrage, 2045	131
Abb. 64	Einsatz von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten	132
Abb. 65	Restemissionen und deren Kompensation, 2045	135
Abb. 66	Abgeschiedenes und geologisch gespeichertes CO ₂	136
Abb. 67	Bilanzierung von CO ₂ aus Biomasse	139
Abb. A1	Schematischer Überblick – ProgRESS	147
Abb. A2	Übersicht über das Modell TEMPS	150
Abb. A3	Übersicht über den EDM-Modellverbund für Stahl- und Petrochemie	154

Tabellenverzeichnis / Infoboxen / Sensitivitätsanalysen

Tabelle A	Zentrale Weichenstellungen im Sektor Energiewirtschaft	16
Tabelle B	Zentrale Weichenstellungen im Sektor Industrie	19
Tabelle C	Zentrale Weichenstellungen im Gebäudesektor	21
Tabelle D	Zentrale Weichenstellungen im Sektor Verkehr	23
Tabelle 1	Übersicht der im Szenario berücksichtigten Politikinstrumente	33
Tabelle 2	Übersicht der Sensitivitätsanalysen	35
Tabelle 3	Abgrenzung der Sektoren erfolgt nach dem Klimaschutzgesetz	39
Tabelle 4	Rahmendaten	40
Tabelle 5	Endkundenpreise für Strom	50
Tabelle 6	Zentrale Weichenstellungen im Sektor Energiewirtschaft	63
Tabelle 7	Vergleich von Basisszenario und Sensitivität für Importe in der Stahlindustrie	80
Tabelle 8	Vergleich von Basisszenario und Sensitivität für Importe in der Chemieindustrie	80
Tabelle 9	Zentrale Weichenstellungen im Sektor Industrie	81
Tabelle 10	Zentrale Weichenstellungen im Gebäudesektor	96
Tabelle 11	Zentrale Weichenstellungen im Sektor Verkehr	106
Tabelle 12	Zentrale Weichenstellungen für die Wasserstoffwirtschaft	133
Tabelle A1	Übergreifende Kennzahlen	157
Tabelle A2	Kennzahlen Energiewirtschaft	158
Tabelle A3	Kennzahlen Industrie	159
Tabelle A4	Kennzahlen Gebäudesektor	160
Tabelle A5	Kennzahlen Verkehr	161
Tabelle A6	Kennzahlen Landwirtschaft	162
Tabelle A7	Kennzahlen LULUCF	162
Tabelle A8	Kennzahlen Abfallwirtschaft	163
Infobox 1	Was ist inhaltlich neu?	36
Infobox 2	Sektorale Abgrenzung	38
Infobox 3	Strombasierte Energieträger zur Absicherung des Stromsystems	58
Infobox 4	Sensitivitätsanalyse: Was passiert, wenn ... <i>Deutschland verstärkt grünes Eisen und Methanol importiert?</i>	79
Infobox 5	Luft-Luft-Wärmepumpen – ein neuer Baustein in der Wärmeversorgung	89
Infobox 6	Sensitivitätsanalyse: Was passiert, wenn ... <i>die Sanierung weniger stark voranschreitet?</i>	94
Infobox 7	Sensitivitätsanalyse: Was passiert, wenn ... <i>der Klimawandel sich anders auf den Wald auswirkt?</i>	116
Infobox 8	Woher stammen die Importe im Szenario?	128
Infobox 9	Sensitivitätsanalyse: Was passiert, wenn ... <i>CCS entlang der CO₂-Infrastruktur breiter zum Einsatz kommt?</i>	137
Infobox 10	Recarbonatisierung als CO ₂ -Senke	138
Infobox 11	Bilanzierung von CO ₂ aus Biomasse	139

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Abfallbasierte Brennstoffe
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
BDH	Bundesverband der deutschen Heizungsindustrie
BECCS	<i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage</i> (Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (Elektrofahrzeug mit batterieelektrischem Antrieb)
BEW	Bundesförderung für effiziente Wärmenetze
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BWS	Bruttowertschöpfung
CBAM	<i>Carbon Border Adjustment Mechanism</i> (Europäischer Grenzausgleichsmechanismus)
COP	<i>Conference of the Parties</i> (Klimakonferenz)
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> (CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
CCU	<i>Carbon Capture and Utilization</i> (CO ₂ -Abscheidung und -Nutzung)
CDR	<i>Carbon Dioxide Removal</i> (CO ₂ -Entnahme)
Cfd	<i>Contract for Differences</i>
CO₂-Äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
CRF	<i>Common Reporting Format</i> (Kennzeichnung zur Gliederung der Treibhausgasemissionen in den Nationalen Inventarberichten)
DAC	<i>Direct Air Capture</i>
DACCS	<i>Direct Air Carbon Capture and Storage</i> (direkte Kohlenstoffabscheidung aus der Luft und Speicherung)
DSM	<i>Demand Side Management</i> (nachfrageseitiges Lastmanagement)
DRI(-Anlage)	<i>Direct Reduced Iron</i> (direktreduziertes Eisen); Direktreduktionsanlage
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
ETS I	<i>EU Emissions Trading System</i> (Europäischer Emissionshandel für die Bereiche Energiewirtschaft, energieintensive Industrie, innereuropäischer Luftverkehr)
ETS II	<i>EU Emissions Trading System for Buildings and Road Transport</i> (Europäisches Emissionshandelssystem für den Gebäude- und Transportsektor)
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> (Brennstoffzellenfahrzeug)
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GuD(-Kraftwerke)	Gas- und Dampf(kraftwerke)
GW/GWh	Gigawatt/Gigawattstunden
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Treibhauspotenzial)
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i> (Internationale Zivilluftfahrtorganisation)
IMO	<i>International Maritime Organization</i> (Internationale Seeschifffahrtsorganisation)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)

IPCEI	<i>Important Projects of Common European Interest</i> (strategische Förderprojekte der Europäischen Kommission)
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KND	Klimaneutrales Deutschland
KND – Umsetzung:	Bezeichnung für Studie „Klimaneutrales Deutschland – Von der Zielsetzung zur Umsetzung“ (2024)
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KUP	Kurzumtriebsplantage
kW/kWh	Kilowatt/Kilowattstunden
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LL-WP	Luft-Luft-Wärmepumpen
LULUCF	<i>Land Use, Land Use Change and Forestry</i> (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)
LW-WP	Luft-Wasser-Wärmepumpen
Mha	Megahektar
Mio. t CO ₂ -Äq	Millionen Tonnen CO ₂ -Äquivalente
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MW/MWh	Megawatt/Megawattstunden
NIR	<i>National Inventory Report</i> (Nationaler Inventarbericht)
NWG	Nichtwohngebäude
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PEV	Primärenergieverbrauch
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Vehicle</i> (Kraftfahrzeug mit Hybridantrieb)
PHH	Private Haushalte
Pkm	Personenkilometer
PPA	<i>Power Purchase Agreement</i> (Stromliefervertrag zwischen Stromproduzent und größerem Abnehmer)
PtL	<i>Power to Liquid</i> (strombasierter Flüssig-Brenn- oder Kraftstoff)
PtX	<i>Power to X</i> (Sammelbezeichnung für strombasierte Brenn-, Kraft- und Grundstoffe)
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
RED III	<i>Renewable Energy Directive III</i> (Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU) 2023/2413)
RFI	<i>Radiative Forcing Index</i> (Strahlungsantrieb)
RFNBO	<i>Renewable Fuels of Non-Biological Origin</i> (Erneuerbare Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs)
THG(-Emissionen)	Treibhausgas(emissionen)
Tkm	Tonnenkilometer
TW/TWh	Terawatt/Terawattstunden
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Klimarahmenkonvention)
WG	Wohngebäude
WPG	Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz)
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

1 Zusammenfassung

Im Frühjahr 2021 zeigte die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ erstmalig auf, wie Deutschland 2045 klimaneutral werden und dabei seine Wettbewerbsfähigkeit erhalten kann. Daraufhin hat die Große Koalition aus CDU/CSU und SPD dieses Ziel und eine Emissionsminderung von 65 Prozent gegenüber 1990 bis 2030 verbindlich im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verankert. Deutschland ist von der Zielsetzungs- in die Umsetzungsphase eingetreten.

Diese Umsetzungsphase bringt jedoch neue Herausforderungen mit sich: Wie kann der Industriestandort Deutschland gleichzeitig klimaneutral werden und seine Wettbewerbsfähigkeit stärken? Was braucht es, damit die klimaneutrale Modernisierung von Gebäuden und nachhaltige Mobilität für alle erschwinglich und praktisch umsetzbar werden? Und wie kann das Potenzial von Land- und Forstwirtschaft zu Klimaschutz, Biodiversität und gesunder Ernährung voll gehoben werden?

Zugleich haben sich seit der Veröffentlichung des Szenarios „Klimaneutrales Deutschland“ (2021) die technologischen und ökonomischen Bedingungen verändert. So schritt etwa der Ausbau Erneuerbarer Energien schneller voran als erwartet. Und im Sektor Industrie hat sich gezeigt, dass die Elektrifizierung in vielen Bereichen machbar und im Falle der Industriewärmepumpe immer häufiger wettbewerbsfähig ist.

Um in dieser Situation eine aktuelle Orientierung zu geben, beleuchtet „Klimaneutrales Deutschland – Von der Zielsetzung zur Umsetzung“ den Weg zur Klimaneutralität aus drei zentralen Perspektiven: Erstens zeigt die Szenario-Modellierung einen über alle Sektoren hinweg stimmigen und optimierten Pfad in Richtung Klimaneutralität auf. Dabei wurden neue Entwicklungen in den Sektoren und aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse berücksichtigt. Zweitens wurden die dafür notwendigen privaten und öffentlichen Investitionen detailliert

berechnet und Förderbedarfe abgeleitet. Drittens ist das Szenario mit einem umfassenden Maßnahmenpaket verknüpft, das auf Basis einer ausgewogenen Mischung politischer Instrumente die notwendigen Investitionen ermöglicht und dabei sozialen Ausgleich und Teilhabe sichert. Für die einzelnen Sektoren orientiert sich das Szenario an folgenden gesellschaftlichen Zielen:

- Günstige und zuverlässige Energieversorgung: Die Importabhängigkeit Deutschlands sinkt, die Verbraucherpreise sind tragfähig und die Industriepreise wettbewerbsfähig.
- Impulse für eine innovative und wettbewerbsfähige Wirtschaft: Effizienzsteigerungen und neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsketten stärken die deutsche Wirtschaft.
- Gesamtgesellschaftliche Teilhabe beim Wohnen: Ein bedarfsgerechtes Angebot an effizienten und klimaresilienten Wohn- und Nichtwohngebäuden ist verbunden mit sauberen und bezahlbaren Heiztechnologien.
- Saubere und zugängliche Mobilität für alle: Durch einen Ausbau des öffentlichen Verkehrs sowie der Infrastruktur für Rad- und Fußverkehr verbessert sich das Mobilitätsangebot für alle; der Einstieg in die Elektromobilität wird finanziell ermöglicht.
- Eine produktive und resiliente Land- und Forstwirtschaft: Die Landwirtschaft leistet Beiträge zur Nachhaltigkeit, die durch veränderte politische Rahmenbedingungen zu einer ökonomischen Chance werden.

Die vorliegende Publikation bietet einen vertieften Einblick in die techno-ökonomischen Szenariopfade, eine transparente Darstellung der verwendeten Methoden und Modelle sowie zentrale Daten und Kernindikatoren. Eine kompakte Übersicht über Szenariopfade, Investitionsbedarfe und Politikinstrumente findet sich in der Synthesepublikation (Agora Think Tanks 2024). Eine vertiefte Analyse der Investitions- und Förderbedarfe bietet (Agora Energiewende 2024).

1.1 Übersicht

Das Szenario erfüllt die verfassungsrechtliche Vorgabe, in Deutschland zeitnah Klimaneutralität herzustellen und dadurch Emissionsminderungen nicht zulasten künftiger Generationen in die Zukunft zu verschieben. Die Emissionsminderungsziele des Klimaschutzgesetzes (KSG) werden eingehalten. Ein Großteil der Emissionsminderungen erfolgt bis 2040 – zu diesem Zeitpunkt sind, angereizt durch die Entwicklung im Europäischen Emissionshandel (ETS I), sowohl Energiewirtschaft als auch Industrie nahezu vollständig klimaneutral. Abbildung A und B zeigen

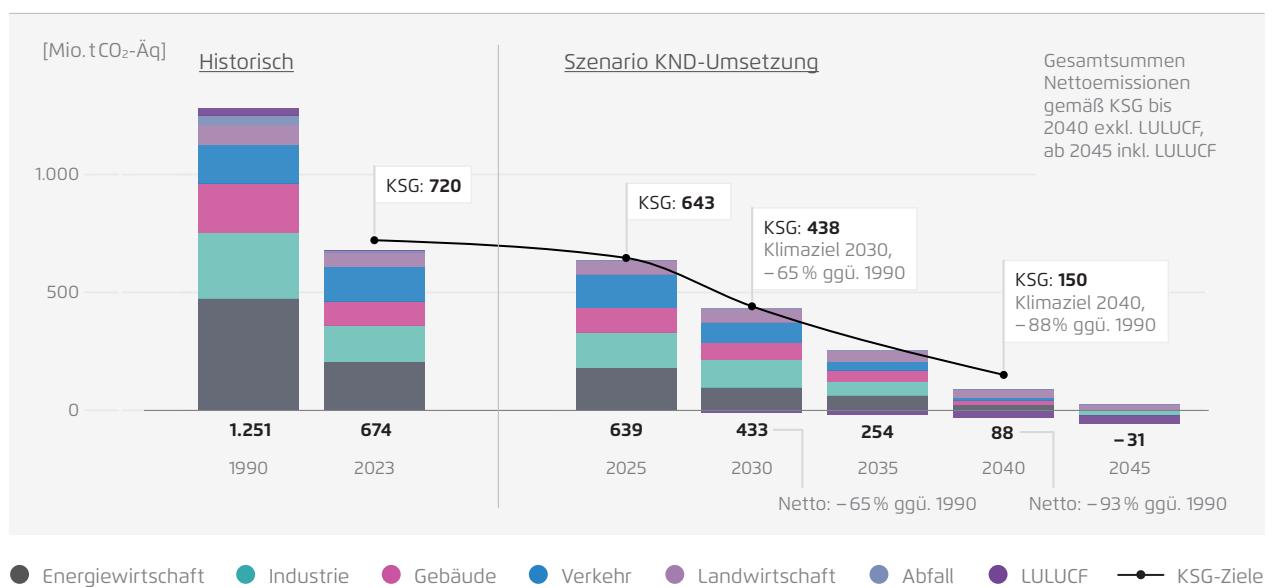
den Treibhausminderungspfad und durch welche Maßnahmen die Minderungen zustande kommen.

Mit den Treibhausgasemissionen sinkt auch der Endenergieverbrauch, also der Energiebedarf der Letztverbraucher wie beispielsweise der Industrie oder der privaten Haushalte (Abbildung D).

Die Entwicklungen in den einzelnen Sektoren und Querschnittsbereichen werden im Folgenden beschrieben.

Reduktionspfad der Treibhausgasemissionen bis 2045

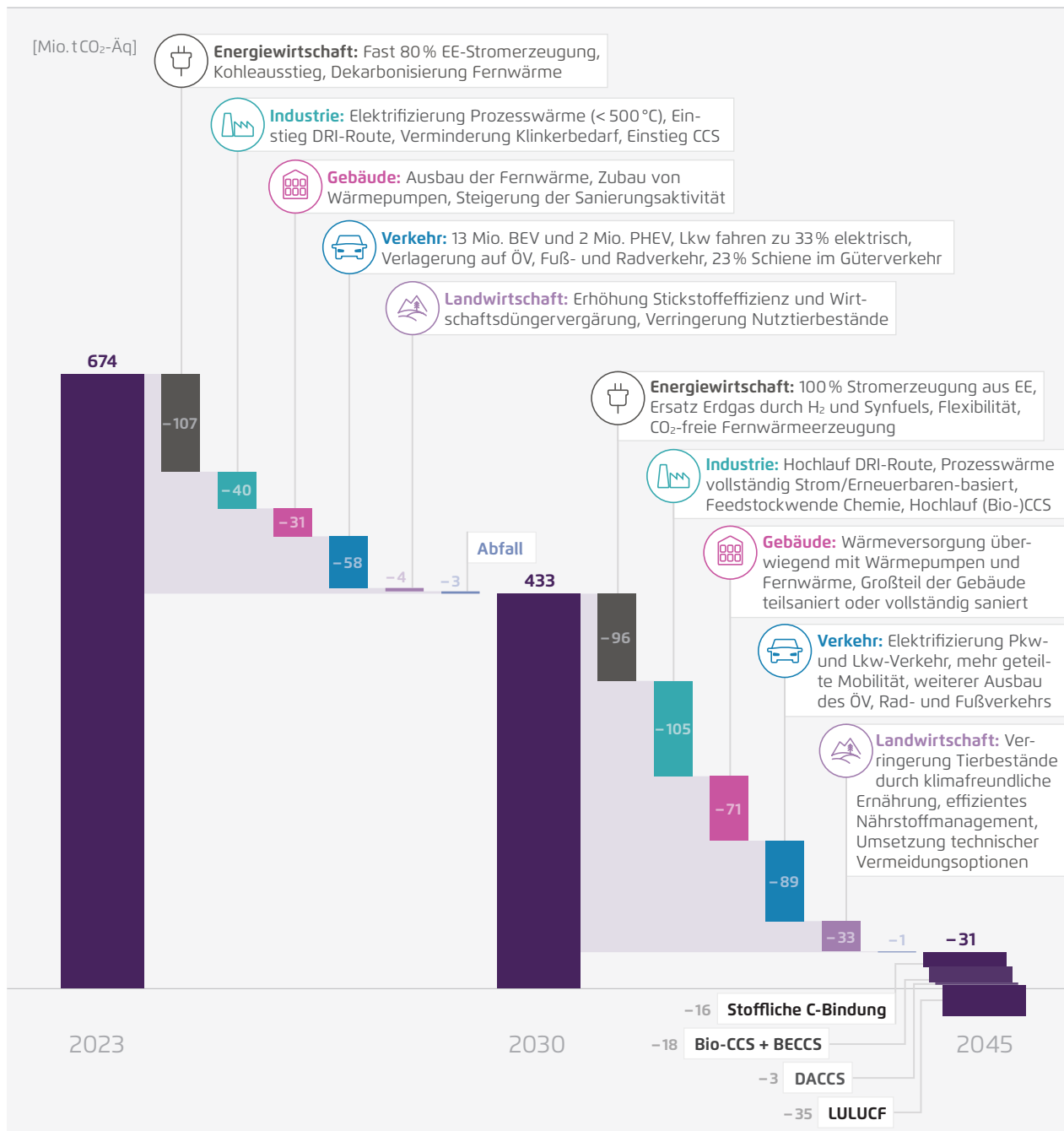
→ Abb. A



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024), historische Daten: Umweltbundesamt (2024)

Maßnahmen im Szenario Klimaneutrales Deutschland – Umsetzung

→ Abb. B



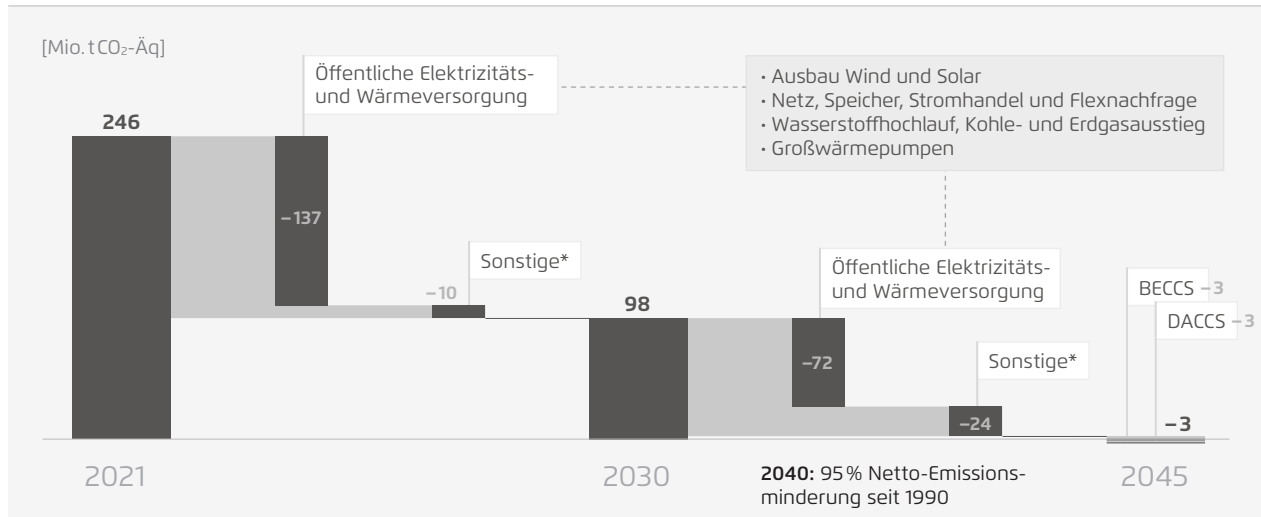
Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). BEV = Batterieelektrische Fahrzeuge; C = Kohlenstoff; CCS = Carbon Capture and Storage; DACCS = Direct Air Carbon Capture and Storage; DRI = Stahlproduktion: Direktreduktion von Eisenerz durch Wasserstoff und Erdgas; EE = Erneuerbare Energien; H₂ = Wasserstoff; LULUCF = Land Use, Land Use Change, and Forestry; ÖV = Öffentlicher Verkehr; PHEV = Plugin-Hybride

1.2 Energiewirtschaft

1.2.1 Szenariopfade

Energiewirtschaftssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. C



Agora Energiewende und Prognos (2024). * Mineralölraffinerien (CRF 1.A.1.b), Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger (CRF 1.A.1.c), diffuse Emissionen (1.B), Pipelinetransporte (1.A.3.e); BECCS = Bioenergy with Carbon Capture and Storage; DACCS = Direct Air Carbon Capture and Storage

Der Schlüssel zur bezahlbaren Klimaneutralität ist im Strombereich die Defossilisierung der Stromerzeugung bei gleichzeitiger Elektrifizierung der Nachfragesektoren. Bei der Wärme gilt es die Wärmenetze auszubauen und aus der Erdgasnutzung auszusteigen.

Die Erneuerbaren Energien werden als günstigste Erzeugungsform bis 2045 auf 180 GW Onshore-Wind, 73 GW Offshore-Wind und rund 470 GW Photovoltaik ausgebaut. Gegenüber 2023 ist das bei Onshore-Wind eine Verdreifachung, bei Offshore-Wind eine Verneunfachung und bei Photovoltaik eine Versechsfachung. Der Ausbau von Photovoltaik erfolgt relativ gleichmäßig, während sich das Zubautempo bei Wind um das Jahr 2030 noch einmal stark erhöht.

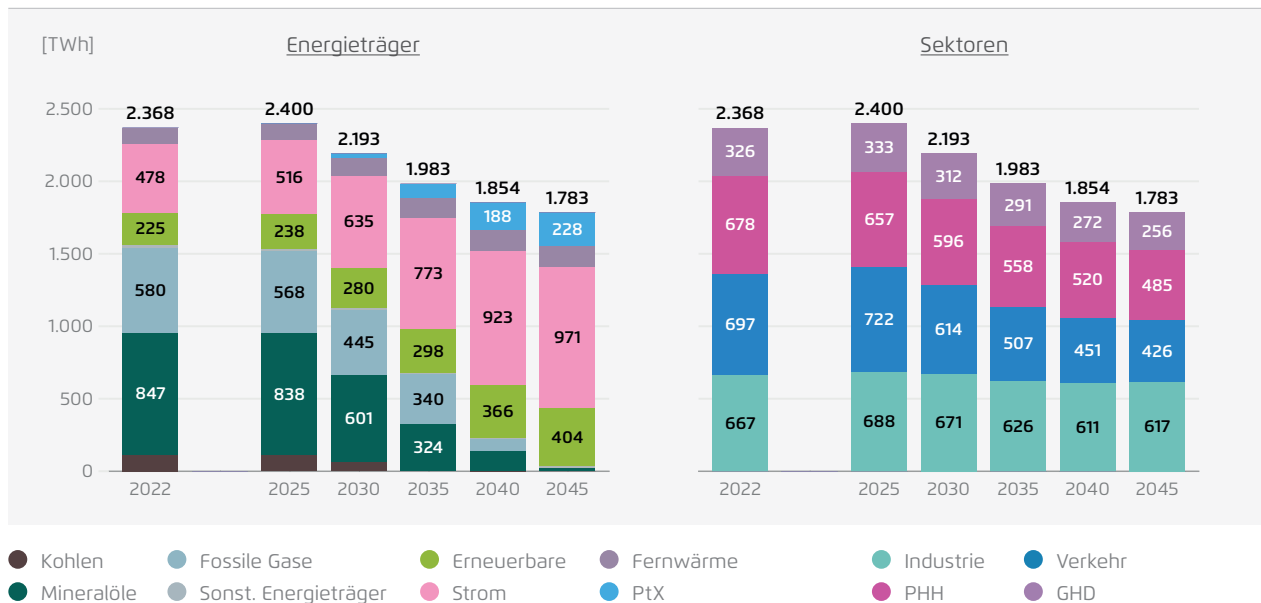
Dementsprechend wächst der Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung stark: Die Stromerzeugung aus Wind-, Solar- und Wasserkraft

verfünffacht sich von 219 TWh im Jahr 2023 auf über 1.100 TWh bis 2045. Parallel steigt die Stromnachfrage von 553 TWh 2022 auf 1.267 TWh. Davon entfallen rund 221 TWh auf den Verkehrssektor, vor allem durch die Elektrifizierung des Pkw- und Lkw-Verkehrs. In der Industrie verdoppelt sich der Stromverbrauch durch die Umstellung von brennstoffbasierten auf strombetriebene Prozesse auf knapp 450 TWh. Im Gebäudesektor steigt der Stromverbrauch bis 2045 trotz weitgehender Elektrifizierung der Wärmeerzeugung nur leicht auf rund 300 TWh an¹. Der vergleichsweise geringe Anstieg ist auf Energieeffizienzmaßnahmen sowie auf den Ersatz konventioneller Elektroheizungen und Warmwasserbereiter durch Wärmepumpen zurückzuführen.

1 Die Abweichung von rund 20 TWh zum in Kapitel 5.3.4 angegebenen Stromverbrauch ergibt sich aus unterschiedlichen sektoralen Abgrenzungen. Die dort angegebenen rund 280 TWh enthalten nicht den Energieverbrauch der Landwirtschaft.

Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren

→ Abb. D



Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). Sektorabgrenzung nach Energiebilanz (Verkehr mit intern. Luftverkehr, ohne intern. Seeverkehr. GHD einschließlich Landwirtschaft). PtX = Power to X; PHH = Private Haushalte, GHD = Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Anreize zur Elektrifizierung stellen sicher, dass Angebot und Nachfrage sich im Gleichtakt entwickeln. So bleiben die Kosten pro Kilowattstunde Strom bis 2030 mit durchschnittlich 16 ct/kWh weitgehend konstant und sinken danach bis 2045 auf durchschnittlich weniger als 13 ct/kWh. Der Strompreis für den Betrieb von Wärmepumpen bleibt dabei zwischen 20 und 30 Prozent unterhalb des Preises für Haushalte.

Das Stromsystem entwickelt im Szenario ein hohes Maß an Flexibilität. In Zeiten mit viel Wind- und Sonnenstrom werden Stromspeicher und E-Autos geladen, (Groß-)Wärmepumpen laden Wärmespeicher, Elektrolyseure erzeugen Wasserstoff und Power to Heat-Anlagen erzeugen (speicherbare) Hochtemperaturwärme für die Industrie. Außerdem wird Strom an Kunden außerhalb Deutschlands geliefert. In kurzen Zeiten mit wenig Wind- und Sonnenstrom decken häufig Stromspeicher die Stromnachfrage. E-Autos und zum Teil auch Wärmepumpen flexibilisieren ihre Betriebszeit. Bei längeren Zeiträumen, oft sind dies Dunkelflauten im Winter, gewährleisten Wasserstoff-, Biomasse-beziehungsweise Synfuel-basierte Kraftwerke die Stromversorgung. Stromimporte ergänzen die inländische Erzeugung. Der Importsaldo beträgt

9 TWh im Jahr 2030 und 21 TWh im Jahr 2045. Da parallel die Nutzung importierter fossiler Energien nach und nach eingestellt wird, reduziert sich die Abhängigkeit von Energieimporten bis 2045 insgesamt um rund 85 Prozent.

Wärmenetze werden deutlich ausgebaut. Die Zahl der an Wärmenetze angeschlossenen Gebäude verdreifacht sich bis 2045 in etwa auf 3,8 Millionen. Die Nachfrage nach Nah- und Fernwärme im Gebäudesektor steigt dabei von 59 TWh im Jahr 2020 auf etwa 124 TWh bis 2045.

Gasnetze werden in großem Umfang stillgelegt: Der Erdgasverbrauch geht bis zum Jahr 2030 gegenüber 2021 um 16 Prozent auf 739 TWh zurück, insbesondere durch den Übergang zu Wärmepumpen und Fernwärme. Wegen der Verknappung der Zertifikate im ETS I steigt auch die Industrie bis 2040 nahezu vollständig aus der Erdgasnutzung aus. Damit diese Entwicklungen geordnet vonstattengehen, wird der Ordnungsrahmen für Gasverteilnetze überarbeitet, um den Netzbetreibern bei angemessenem Vorlauf Stilllegungen von Teilen der Verteilnetze zu ermöglichen. Somit wird der Großteil der Gasverteilnetze bis 2045 stillgelegt. Auch die Mineralölverarbeitung

wird bis 2045 eingestellt, da der Bedarf an Kraftstoffen und Heizöl abnimmt.

Bis 2030 sinken die Treibhausgasemissionen um 79 Prozent gegenüber 1990, maßgeblich durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung. 2045 emittiert die Energiewirtschaft noch 2,4 Mio. t CO₂-Äq an Treibhausgasen, die jedoch durch CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) und Negativemissionen

überkompensiert werden, so dass sich insgesamt 3,3 Mio. t CO₂-Äq an Negativemissionen ergeben.

1.2.2 Zentrale Weichenstellungen

Tabelle A zeigt zentrale politische Weichenstellungen, die vorausgesetzt werden, damit die Entwicklungen im Szenario eintreten.

Zentrale Weichenstellungen im Sektor Energiewirtschaft

→ Tabelle A

Weichenstellung	Zeitpunkt spätestens
Phase-in dynamischer Netzentgelte und Tarifmodelle	2025*
Flächendeckend günstige Strompreise für Wärmepumpen, getrieben durch Reform von Steuern und Umlagen sowie ermäßigte Netzentgelte	2025*
Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes zur Absicherung der Wirtschaftlichkeit großer Erneuerbaren-Projekte, Stärkung der marktbasierten Erneuerbaren-Finanzierung (<i>Power Purchase Agreements</i> , PPA) und Förderung der Dach-PV	2026
Ende staatlicher CO ₂ -Zertifikatsausgabe 2039 (ETS I) und Ausschreibungen steuerbarer Backup-Kraftwerke	2026
Fortführung der Bundesförderung Effiziente Wärmenetze. Durch Stromsteuersenkung und zeitvariable Netzentgelte Reduktion der Stromkosten für Großwärmepumpen und Förderung ihres systemdienlichen Betriebs	2026
Gasverteilnetze: Stilllegungen ermöglichen; Stranded Assets und unverhältnismäßige Anstiege der Netznutzungsentgelte vermeiden	2026
Verpflichtung der Stromversorger, die Versorgungssicherheit ihrer Kunden zu garantieren (dezentraler Markt oder Hedging-Modell)	2028
Abschaffung einheitlicher Strompreiszonen und Einführung lokaler Strompreissignale	2030

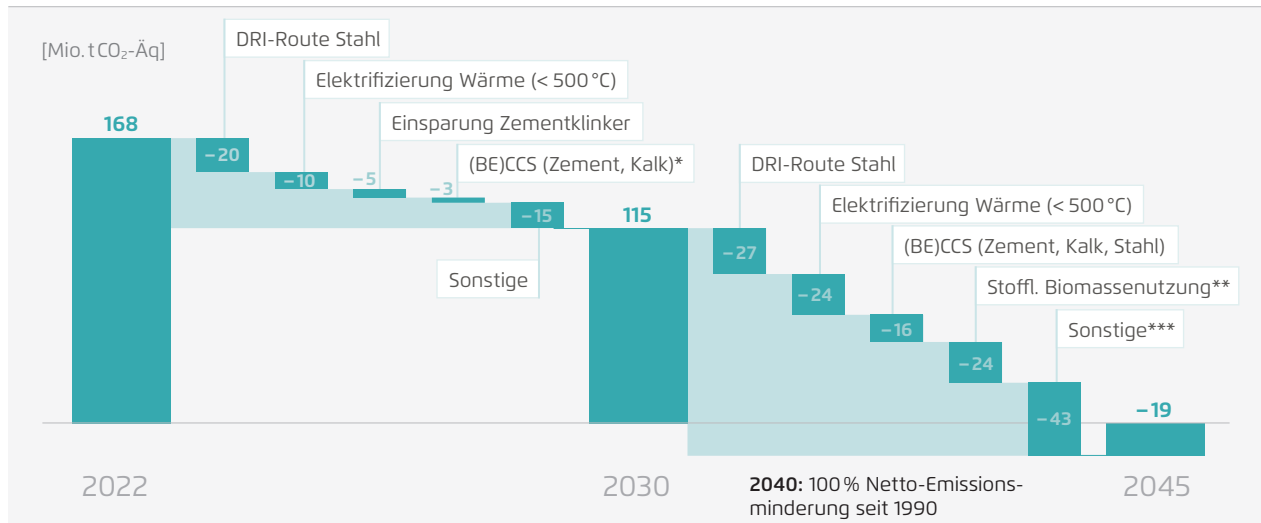
Agora Energiewende und Prognos. *Modellierter Maßnahmenbeginn ist 2026. Politische Vorbereitung muss früher erfolgen.

1.3 Industrie

1.3.1 Szenariopfade

Industriesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. E



Agora Industrie, Wuppertal Institut, Universität Kassel und Prognos (2024). * (BE)CCS = Abscheidung und Speicherung von Prozessemissionen und von CO₂ aus der Nutzung von Bioenergie; **stoffliche Biomassenutzung umfasst auch die Abscheidung und Speicherung überschüssiger CO₂-Mengen in der Biomasseverarbeitung; *** Sonstige: Elektrifizierung > 500 °C sowie weitere Energieträgerwechsel und Maßnahmen zur Treibhausgasvermeidung

Zentraler Handlungsansatz bei der Energieversorgung ist die Einbindung von Strom aus Erneuerbaren Energien, zum Beispiel zur Bereitstellung von Prozesswärme. Kunststoffe und weitere Chemikalien, die heute aus fossilem Öl bestehen, müssen in Zukunft aus erneuerbaren Quellen wie Biomasse hergestellt werden. Dadurch entstehen neue Wertschöpfungsketten, zum Beispiel indem bislang importierte fossile Rohstoffe in der Chemieindustrie durch im Inland nachhaltig angebaute Biomasse ersetzt werden. Ergänzende Handlungsansätze sind eine verstärkte Kreislaufwirtschaft und die Abscheidung und Speicherung verbleibender CO₂-Mengen.

Stahlindustrie: Die Transformation der Stahlproduktion erfolgt zum einen durch verstärkten Einsatz von Sekundärstahl, zum anderen durch neue Direktreduktionsanlagen (DRI-Anlagen). So wird bis 2035 der vollständige Ausstieg der Stahlbranche aus der emissionsintensiven Hochofenroute – und damit auch aus der Kohle – ermöglicht. Die DRI-Anlagen werden 2030 mit 4 TWh Erdgas und 12,5 TWh erneuerbarem

Wasserstoff betrieben. Bis 2040 wird Erdgas als Energieträger und Rohstoff dann vollständig von Wasserstoff und Synthesegas aus Biomasse abgelöst.

Chemische Industrie: Die Chemiebranche „defossilisiert“ ihre Rohstoffbasis: Anstelle von Erdöl als Rohstoff und Kohlenstoffquelle wird zunehmend Biomasse eingesetzt, die über die Gasifizierung erst zu Methanol und dann zu Kunststoffen weiterverarbeitet wird. Mechanisches und ergänzend chemisches Recycling sorgen dabei für eine effiziente Kreislaufführung. Dadurch wird der Bedarf an fossilen Rohstoffen bis 2045 auf etwa 1,5 Mio. Tonnen gesenkt (zehn Prozent des heutigen Bedarfs). Bis 2050 beendet die Chemieindustrie den Einsatz von fossilen Rohstoffen. In den Bereichen und Prozesswärme gewinnen hocheffiziente Wärmepumpen und Elektrodenkessel stark an Bedeutung.

Zementindustrie: Durch Effizienzmaßnahmen und Reduktion des Klinkeranteils im Zement (von im Schnitt 71 Prozent auf rund 60 Prozent bis 2045)

sowie durch alternative Brennstoffe wird der CO₂-Ausstoß gesenkt. Bis 2030 werden 90 Prozent des Energiebedarfs aus Abfallstoffen gedeckt. Zur Abscheidung unvermeidbarer prozessbedingter Emissionen wird *Carbon Capture and Storage* (CCS)-Technologie schrittweise eingeführt; der Hochlauf ist bis 2040 abgeschlossen.

Andere energieintensive Branchen: Glas-, Kalk- und Papierindustrie reduzieren Emissionen durch Elektrifizierung und Verwendung alternativer Brennstoffe. Die Glasindustrie elektrifiziert die Wärmbereitstellung und setzt CO₂-neutrale Brenngase ein. Die Kalkindustrie steigt bis 2040 vollständig aus fossilen Brennstoffen aus und erreicht 2045 CO₂-Negativemissionen von 1 Mio. t. Die Papierindustrie reduziert ihre CO₂-Emissionen vornehmlich durch den Einsatz von Wärmepumpen.

Restliches verarbeitendes Gewerbe: Branchen wie Lebensmittel, Maschinen- und Fahrzeugbau nutzen verstärkt Hochtemperatur-Wärmepumpen. Das betrifft auch neue Industriezweige. So erzeugt die geplante Batteriezellproduktion einen zusätzlichen Strombedarf von 37 TWh.

Der Endenergieverbrauch der Industrie sinkt durch Elektrifizierung und Effizienzmaßnahmen bis 2045 leicht. Der Stromanteil steigt dabei von 30 Prozent (2022) auf 73 Prozent (2045), während fossile Brennstoffe bis 2040 vollständig ersetzt werden. Die Treibhausgasemissionen der Industrie sinken bis 2030 auf 115 Mio. t CO₂-Äq und erreichen bis 2040 Netto-Klimaneutralität – rechtzeitig zum Ende der Ausgabe von Emissionszertifikaten im ETS I. Durch zusätzliche Negativemissionen wird 2045 eine Nettobilanz von -19 Mio. t CO₂-Äq erreicht.

Sensitivitätsanalyse:

Import von grünem Eisen und Methanol

Das Alternativszenario bildet die Möglichkeit ab, dass sich zügig internationale Märkte für klimaneutrale energieintensive Vorprodukte bilden. Somit werden direkt reduziertes Eisen (DRI) und erneuerbares Methanol für die Produktion von Chemikalien verstärkt importiert. Hierdurch lässt sich der

inländische Wasserstoffeinsatz im Jahr 2035 um 3 TWh senken (acht Prozent des industriellen Wasserstoffbedarfs im Basisszenario). 2045 liegt die Einsparung bei 35 TWh (35 Prozent). Zudem verringern sich die Anforderungen an die CO₂-Infrastruktur.

1.3.2 Zentrale Weichenstellungen

Tabelle B zeigt eine Auswahl der wichtigsten Schritte, damit die Entwicklungen im Szenario umgesetzt werden können.

Zentrale Weichenstellungen im Sektor Industrie

→ Tabelle B

Weichenstellung	Zeitpunkt spätestens
Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Elektrifizierung von Wärme durch Investitionsförderung	2025–2027*
Fortführung der Klimaschutzverträge, ausreichende Finanzierung, Erweiterung auf weitere Anwendungsbereiche (bspw. Dampferzeugung) und um vereinfachte Variante für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)	2025–2027*
Entlastung des Strompreises durch Fortführung der Stromsteuersenkung und Fortführung der Strompreiskompensation	2025–2027*
Stärkung des mechanischen Recyclings durch Quoten, ergänzend Einführung chemischen Recyclings. Anreize für Recycling und Recycling-gerechtes Produktdesign	2025–2027*
Priorisierung der Nutzung von Biomasse für stoffliche Nutzung und Hochtemperaturwärme. Harmonisierung bestehender Regularien und Strategien	2025–2027*
Entwicklung eines konsistenten regulatorischen Rahmens, der CCS ermöglicht und Klarheit über zukünftige CO ₂ -Infrastruktur schafft	2025–2027*
Einführung von Preissignalen für die Substitution fossiler Rohstoffe kurzfristig durch Recycling und mittelfristig durch Biomasse. Langfristig Pönalisierung der Nutzung fossiler Rohstoffe	2025–2029
Wasserstoffpipelines erreichen erste Stahlwerke; Bereitstellung ausreichender Mengen erneuerbaren Wasserstoffs	2027–2033
Schaffung von Absatzmärkten für klimafreundlich hergestellte Produkte, Mindestanforderungen für Produktgruppen und Vorgaben für die öffentliche Beschaffung	2027–2033
Ende der CO ₂ -Zertifikatsausgabe im EU-ETS	2039

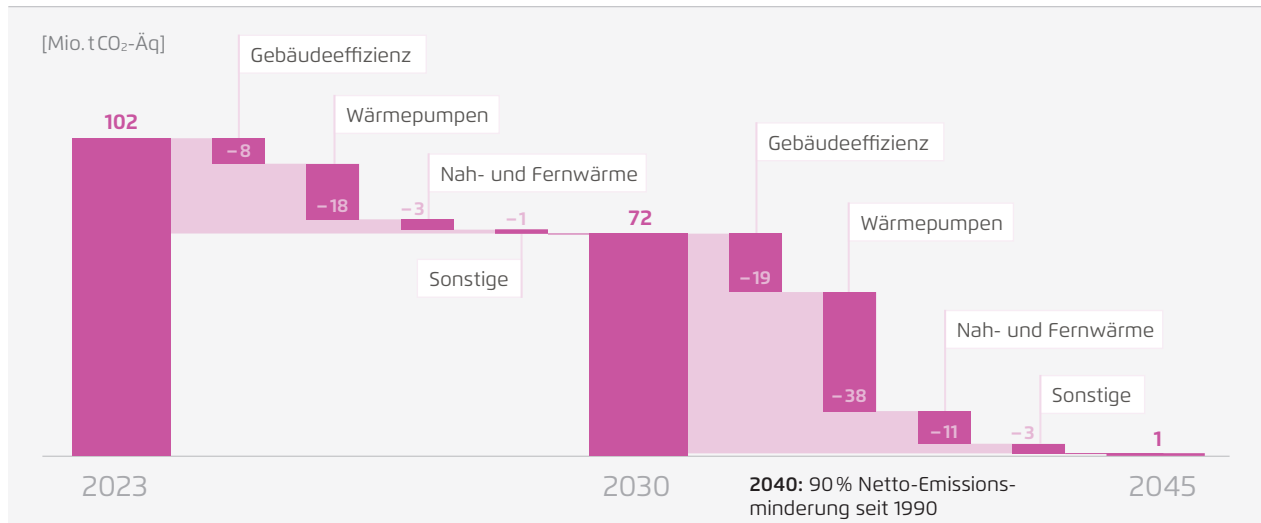
Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel. *Modellierter Maßnahmenbeginn ist 2026.

1.4 Gebäude

1.4.1 Szenariopfade

Gebäudesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. F



Agora Energiewende und Prognos (2024)

Zentrale Handlungsansätze im Gebäudesektor sind bedarfsgerechtes Bauen, Umstellung der Wärmeversorgung auf Erneuerbare Energien sowie die Senkung des Energieverbrauchs von Bestandsgebäuden.

Der Wohnungsneubau orientiert sich an mittleren Prognosen zum Wohnungsbedarf. Rund zehn bis fünfzehn Prozent der neuen Wohnungen werden in bestehenden Gebäuden realisiert. Der Bedarf an Nichtwohngebäuden bleibt ab 2025 stabil. Holz gewinnt als klimafreundlicher Baustoff an Bedeutung.

Die Wärmeversorgung wird – getrieben vor allem über das Gebäudeenergiegesetz und die Bundesförderung für effiziente Gebäude – mittels Wärmenetzen und Wärmepumpen dekarbonisiert. Der jährliche Zubau an Wärmenetzanschlüssen steigt von aktuell rund 40.000 Gebäuden auf rund 90.000 im Jahr 2030 und auf bis zu 110.000 bis 2040; anschließend ist er rückläufig. Das Ziel von jährlich 500.000

eingebauten Wärmepumpen wird ab dem Jahr 2026 erreicht. Ab 2028 liegt der jährliche Absatz jeweils bei rund 600.000 bis 650.000 Stück, was dem bisherigen Absatz von Gasheizungen entspricht. Bis 2045 sind 82 Prozent der Ein- und Zweifamilienhäuser mit Wärmepumpen beheizt, während Mehrfamilienhäuser und Nichtwohngebäude überwiegend auf Wärmenetze setzen.

Energetische Sanierungen senken den Wärmebedarf, stärken die Resilienz gegen Hitzewellen und führen gleichzeitig zu einer Wertsteigerung des Gebäudebestands. Im Szenario werden sie unter anderem durch Mindesteffizienzstandards und Anreize der EU-Taxonomie angestoßen. Es werden überwiegend einzelne Bauteile saniert. Umgerechnet in Vollsanierungsäquivalente steigt die Sanierungsrate nach 2025 auf rund 1,6 Prozent an. Anforderungen an die Effizienz der neu eingesetzten Bauteile gewährleisten, dass diese näherungsweise kompatibel mit Gebäudeeffizienzklasse B sind. Der mittlere spezifische Energieverbrauch für Raumwärme und

Warmwasser verringert sich bis zum Jahr 2045 auf rund 80 kWh/m².

Der Endenergieverbrauch im Gebäudesektor sinkt bis 2045 auf 700 TWh. Der Verbrauch von fossilen Energieträgern endet 2045. Der Stromverbrauch bleibt aufgrund von Effizienzmaßnahmen nahezu konstant bei knapp 280 TWh. Die Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors betragen 2030 noch knapp 72 Mio. t CO₂-Äq und 2045 nur noch 1 Mio. t CO₂-Äq, größtenteils aus Restemissionen von Biomasseheizungen.

Sensitivitätsanalyse: abgeschwächte Gebäudeeffizienz

In einer Sensitivitätsanalyse wurde die Sanierungsrate auf dem Niveau von 2020 belassen. Unter diesen Bedingungen liegt der Energieverbrauch

2045 bei 733 TWh und damit etwa vier Prozent höher als im Hauptszenario. Diese Differenz entsteht vor allem durch höhere Raumwärmebedarfe. Da sie vorwiegend im Winter auftreten, wenn die Erzeugung aus Erneuerbaren Energien geringer ist, erfordern sie den Einsatz teurer Technologien wie Wasserstoffkraftwerke.

1.4.2 Zentrale Weichenstellungen

Um die Entwicklungen im Szenario zu ermöglichen, wird eine Kombination aus verlässlichen ökonomischen Anreizen, Planungssicherheit durch einen ordnungsrechtlichen Rahmen sowie ausreichender und sozial gestaffelter Förderung eingesetzt. Tabelle C zeigt, welche Schritte angenommen werden, damit die Entwicklungen im Szenario Wirklichkeit werden können.

Zentrale Weichenstellungen im Gebäudesektor

→ Tabelle C

Weichenstellung	Zeitpunkt spätestens
Gesetzliche Regelung zur Stilllegung von Gasverteilnetzen werden geschaffen	2025*
Reform der Bundesförderung für effiziente Gebäude tritt in Kraft	2026
Abschluss der kommunalen Wärmeplanung	2026/2028
Mindeststandards für Nichtwohngebäude treten in Kraft	2028
Regelungen für Komponenten bei Teilsanierungen treten in Kraft	Vor 2030
Mindeststandards für Wohngebäude treten in Kraft	2030

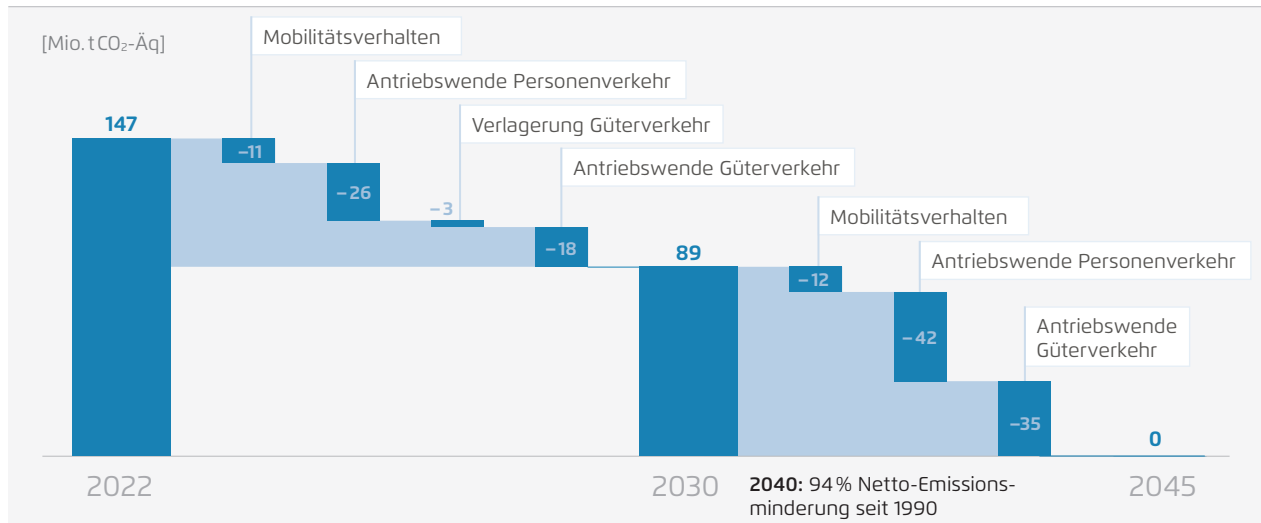
Agora Energiewende. *Modellierter Maßnahmenbeginn ist 2026. Politische Vorbereitung muss früher erfolgen.

1.5 Verkehr

1.5.1 Szenariopfade

Verkehrssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. G



Agora Verkehrswende und Öko-Institut (2024)

Die Dekarbonisierungsstrategie für den Verkehrssektor ruht auf zwei tragenden Säulen: zum einen der Verlagerung von Pkw und Lkw auf umweltverträglichere Verkehrsmittel, zum anderen der Elektrifizierung des verbleibenden Straßenverkehrs.

Im Personenverkehr bleibt die Nachfrage pro Kopf bis 2045 weitgehend konstant, doch der Anteil von öffentlichen Verkehrsmitteln, Rad- und Fußverkehr steigt. Investitionen in Schieneninfrastruktur und das Angebot im öffentlichen Verkehr sowie eine ab 2029 schrittweise eingeführte, fahrleistungsabhängige Pkw-Maut fördern diese Verlagerung. Im Güterverkehr steigt die Verkehrsnachfrage moderat. Durch Investitionen in die Schieneninfrastruktur sowie preisliche Impulse im Straßengüterverkehr steigt der Anteil des Schienengüterverkehrs an der Güterverkehrsleistung bis 2030 auf 23 Prozent (2019: 19 Prozent). Nach 2030 verändert sich die Güterverkehrsleistung auf der Schiene nur noch geringfügig.

83 Prozent aller Pkw-Neuzulassungen sind 2030 batterieelektrische Fahrzeuge. Deren Anzahl im

Gesamtbestand steigt auf 12,6 Millionen, sodass das Ziel von 15 Millionen erst mit einem Jahr Verzug erreicht wird. Im Jahr 2045 sind fast ausschließlich batterieelektrische Pkw auf den Straßen.

Im Lkw-Bereich treiben die CO₂-differenzierte Maut und die EU-Flottenziele die Umstellung auf emissionsfreie Fahrzeuge voran. Ein hinreichend schneller und umfangreicher Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur sowie der Ladepunkte im Depot sind Voraussetzung. Im Jahr 2030 sind 71 Prozent der Neuzulassungen Nullemissionsfahrzeuge (vorwiegend batterieelektrisch, aber auch brennstoffzellenbetrieben). Ab 2040 werden praktisch keine dieselbetriebenen Lkw mehr neu zugelassen, und im Bestand sind sie nur noch in sehr geringer Zahl vorhanden.

Der Endenergiebedarf des Verkehrs liegt im Jahr 2045 bei knapp 280 TWh und beträgt damit weniger als die Hälfte des Endenergiebedarfs des Jahres 2022. Der fossile Endenergiebedarf verringert sich zwischen 2022 und 2030 bereits um 40 Prozent. Im Jahr 2045

wird der Endenergiebedarf des Sektors mit 221 TWh zu über 80 Prozent durch Strom gedeckt. Weitere 32 TWh liefert Wasserstoff, 22 TWh liefern strombasierte Kraftstoffe.

Die Treibhausgasemissionen des Sektors sinken zwischen 2022 und 2030 um 40 Prozent von 147 auf 89 Mio. t CO₂-Äq. Das Sektorziel des KSG für 2030 – ursprünglich in Höhe von 85 Mio. t CO₂-Äq und durch Zielverfehlungen der vergangenen Jahre zwischenzeitlich auf 82 Mio. t CO₂-Äq angepasst – verfehlt der Verkehr dennoch. Aufgrund des noch nicht vollständig aus Erneuerbaren Energien gewonnenen Kraftstoffmixes im inländischen Luftverkehr fallen

im Jahr 2045 sehr geringe Restemissionen von weniger als 0,1 Mt CO₂-Äq an.

1.5.2 Zentrale Weichenstellungen

Notwendige Weichenstellungen betreffen insbesondere die Anpassung der fiskalischen Rahmenbedingungen für die Pkw-Elektrifizierung, den Kapazitätsaufbau im öffentlichen Verkehr sowie den Ausbau der Ladeinfrastruktur. Tabelle D zeigt, welche Schritte bis wann eingeleitet werden müssen, damit die Entwicklungen im Szenario Wirklichkeit werden können.

Zentrale Weichenstellungen im Sektor Verkehr

→ Tabelle D

Weichenstellung	Zeitpunkt spätestens
Anpassung der fiskalischen Rahmenbedingungen für die Pkw-Elektrifizierung (Reform der Kfz-Steuer und Dienstwagen-Besteuerung)	2025*
Kaufförderung bzw. Finanzierungsunterstützung für E-Autos – mit ökologischer und sozialer Staffelung	2025*
Steigerung und Verstetigung der Mittel sowie Beschleunigung der Planung für einen schnellen Ausbau von öffentlichem Verkehr, Fuß- und Radverkehrsinfrastruktur	2025*
Ausweisung von öffentlichen Flächen für Ladepunkte sowie Standardisierung von Ladeeinrichtungen	2025*
Förderung der öffentlichen Ladeinfrastruktur – insbesondere für Lkw – sowie der Ladepunkte im Depot	2025*
Energiebesteuerung von Kraftstoffen im innereuropäischen Luftverkehr sowie Anhebung der Ticketsteuer	2025*
Schrittweise Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut	Ab 2029
Vollständige Abschaffung der freien Zuteilung und Berücksichtigung von Nicht-CO ₂ -Effekten im Emissionshandel	Ab 2030

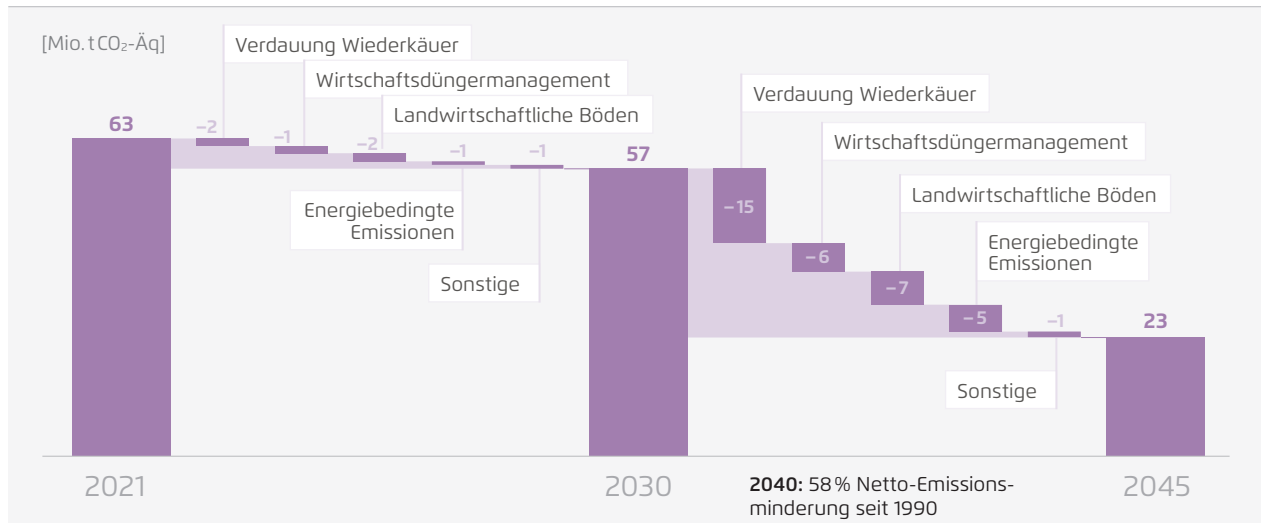
Agora Verkehrswende und Öko-Institut. * Modellierter Maßnahmenbeginn ist 2026. Politische Vorbereitung muss früher erfolgen.

1.6 Landwirtschaft

1.6.1 Szenariopfade

Landwirtschaftssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. H



Agora Agrar und Öko-Institut (2024) basierend auf Umweltbundesamt (2023), Agora Agriculture (2024) und Umweltbundesamt (2024)

Ein wichtiger Handlungsansatz für einen größeren Beitrag der Landwirtschaft zum Klimaschutz ist die Förderung einer klimafreundlicheren Nutztierhaltung. Dies wird durch eine Verringerung der Nutztierbestände und die Nutzung von Treibhausgasminderungstechnologien in der Nutztierhaltung erreicht. Eine stärker pflanzenbasierte Ernährung garantiert dabei die Vermeidung von Verlagerungseffekten. Im Bereich von Landnutzung und Ackerbau ist die Förderung von strukturvieldältigen Agrarlandschaften, die mehr Gehölze enthalten, ein zentraler Ansatz für den Klimaschutz. Hierdurch wird zugleich Biomasse als Baustoff und Rohstoff für die Industrie produziert.

Bis 2030 nimmt die Nachfrage nach tierischen Produkten im Einklang mit den bestehenden Trends weiter ab; parallel setzt sich der seit 2018 bestehende Rückgang der Nutztierbestände fort. Ab 2030 erleichtern faire Ernährungsumgebungen es den Konsumentinnen und Konsumenten zunehmend, sich gesund und nachhaltig zu ernähren. Bis 2045 halbiert sich der Konsum tierischer Produkte im Vergleich zu 2021, was eine Halbierung der Nutztierbestände ermöglicht. Um

den Verlust an Einkommen für tierhaltende Betriebe abzufedern, werden höhere Tierwohlstandards finanziell honoriert. Zusätzlich kommen ab 2030 technische Minderungsmaßnahmen verstärkt zum Einsatz, um Emissionen weiter zu senken.

Die Agrarlandschaft wird bis 2045 durch eine größere Vielfalt an Kulturpflanzen und den Einsatz von Agroforstsystemen sowie Streifenanbau strukturreicher gestaltet. Gehölzpflanzungen wie Kurzumtriebsplantagen speichern Kohlenstoff in der Biomasse und im Wurzelsystem, fördern die Biodiversität und liefern Biomasse, die fossile Rohstoffe ersetzt. Der Kohlenstoffgehalt in Böden bleibt stabil, unterstützt durch humuserhaltende Fruchtfolgen und Zwischenfrüchte. Die Stickstoffbilanzüberschüsse und Lachgasemissionen aus der Düngung sinken bis 2045 deutlich, da mit den abnehmenden Nutztierbeständen auch weniger Wirtschaftsdünger anfällt und die Stickstoffnutzungseffizienz gesteigert wird.

Die energiebedingten Emissionen der Landwirtschaft werden durch verbesserte Energieeffizienz und den

Einsatz Erneuerbarer Energien bis 2045 nahezu vollständig vermieden.

Bis 2030 sinken die landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen (inklusive energiebedingter Emissionen in der Landwirtschaft) auf 56,7 Mio. t CO₂-Äq. Viele Maßnahmen entfalten jedoch erst ab 2030 ihre volle Wirkung. Bis 2045 können die Emissionen des Landwirtschaftssektors um 63 Prozent gegenüber 2021 auf 23,4 Mio. t CO₂-Äq sinken. Klimaneutral wird die Landwirtschaft wegen der unvermeidlichen Emissionen aus Böden und aus der Verdauung der Wiederkäuer jedoch nicht. Daher ist eine Kompensation durch Negativemissionen erforderlich.

1.6.2 Politische Handlungsoptionen

Die Potenziale der Landwirtschaft können dann mobilisiert werden, wenn die Beiträge zur Nachhaltigkeit durch veränderte politische Rahmenbedingungen zu einer ökonomischen Chance für Landwirtinnen und Landwirte werden. Eine wichtige Handlungsoption ist eine umfassende Klimapolitik für die Landwirtschaft und landwirtschaftlich genutzte Moore. Bis 2030 sollten die Eckpfeiler

stehen. Dazu gehören unter anderem klare Zielvereinbarungen über die Höhe der Treibhausgasemissionen für die Jahre 2040 und 2045. Die Bepreisung von Emissionen, aber auch die Entlohnung negativer Emissionen setzen Anreize für den Klimaschutz.

Die Honorierung der Bereitstellung öffentlicher Güter ist ein wichtiges Element eines förderlichen politischen Rahmens. Ein Instrument hierfür ist die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) der EU. Die Ausweitung der landwirtschaftlichen Flächen mit Gehölzen kann durch Investitionszuschüsse und gegebenenfalls Erhaltungsprämien für Kohlenstoff- oder Biodiversitätsleistungen unterstützt werden. Tierwohlleistungen sollten mit staatlichen Tierwohlprämien unterstützt werden.

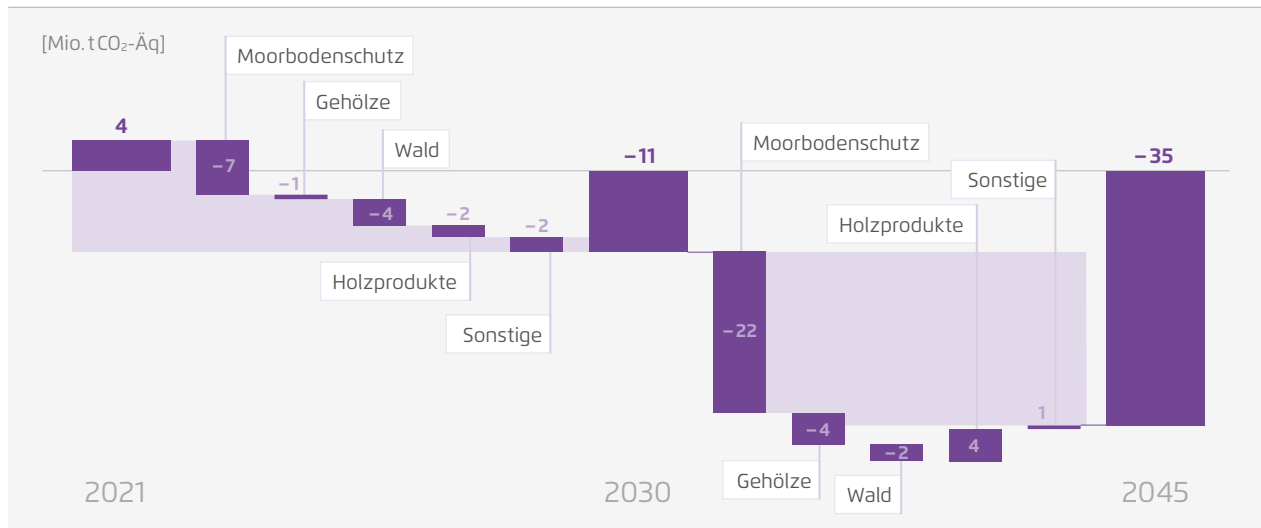
Faire Ernährungsumgebungen tragen dazu bei, dass eine gesunde und nachhaltige Ernährung zugänglich und erschwinglich für alle Bürgerinnen und Bürger ist. Hierzu gehört unter anderem, dass öffentliche Einrichtungen eine Verpflegung anbieten, die an gesundheitliche Qualitätsstandards gebunden ist. Anreize für eine stärker pflanzliche Ernährung können auch durch eine veränderte Besteuerung von Lebensmitteln gesetzt werden.

1.7 Land Use, Land Use Change, and Forestry (LULUCF)

1.7.1 Szenariopfade

LULUCF-Sektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. I



Agora Agrar und Öko-Institut (2024)

Im Szenario werden die Emissionen im LULUCF-Sektor vor allem durch Moorbodenschutz gesenkt. Durch eine angepasste Waldbewirtschaftung, den Waldumbau und zusätzliche Gehölze auf landwirtschaftlichen Flächen verbessert sich die Senkenleistung dieses Sektors.

Bis 2045 sollen etwa 80 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Moorböden voll wiedervernässt sein. Dadurch werden die jährlichen Emissionen bis 2030 um 7 Mio. t CO₂-Äq und bis 2045 um 22 Mio. t CO₂-Äq reduziert. Ab 2040 wird der Torfabbau vollständig eingestellt.

Die Waldsenke wird durch reduzierte Holzentnahme und klimaangepasstes Waldmanagement gestärkt. Hierzu gehören der Umbau von Nadelwäldern in resilientere Mischwälder und leichte Aufforstungen (0,3 Mio. ha bis 2045). Holzprodukte im Bauwesen speichern zusätzlich Kohlenstoff, was durch Anreize für langlebige Nutzung gefördert wird.

Zusätzliche Treibhausgase werden durch Gehölze auf 1,7 Mio. ha landwirtschaftlicher Fläche, in Form von Agroforstsystemen, Kurzumtriebsplantagen und Hecken gebunden. Sie reduzieren zudem den Druck auf Wälder als Biomasselieferanten. Diese Maßnahmen erzielen zusammen mit den Maßnahmen zum Schutz der Waldsenke und der Ausweitung des Holzproduktespeichers bis 2030 eine Minderung von weiteren 7 Mio. t CO₂-Äq jährlich.

Im Jahr 2045 erreicht der LULUCF-Sektor eine Netto-Senkenleistung von -35 Mio. t CO₂-Äq. Damit verfehlt er das Klimaschutzgesetz-Ziel von -40 Mio. t CO₂-Äq leicht, was allerdings auch auf veränderte Berechnungsgrundlagen zurückzuführen ist.

Sensitivitätsanalyse: höhere oder niedrigere natürliche Störungen

Die Senkenleistung des Waldes hängt davon ab, wie sich der Klimawandel zukünftig auf die Wälder auswirkt. Aufgrund der großen Unsicherheiten in diesem Bereich wurden neben dem Szenario, in dem ein

mittleres Niveau natürlicher Störungen für den Wald angenommen wurde, zwei Sensitivitätsanalysen mit geringen beziehungsweise hohen Störungen durchgeführt. Demnach ergibt sich bei geringen Störungen für den LULUCF-Sektor im Jahr 2045 eine Netto-Senkenleistung von -53 Mio. t CO₂-Äq, bei hohen Störungen von nur -18 Mio. t CO₂-Äq.

1.7.2 Politische Handlungsoptionen

Um den Waldumbau und die Moorwiedervernässung erfolgreich zu gestalten, braucht es ausreichend Zeit und Planungssicherheit. Daher ist es wichtig, die notwendigen politischen Maßnahmen möglichst frühzeitig zu beschließen. Außerdem sollten die politischen Rahmenbedingungen so gestaltet sein, dass die Beiträge zu Klimaschutz und Nachhaltigkeit wirtschaftlich attraktiv für Landnutzerinnen und Landnutzer sind.

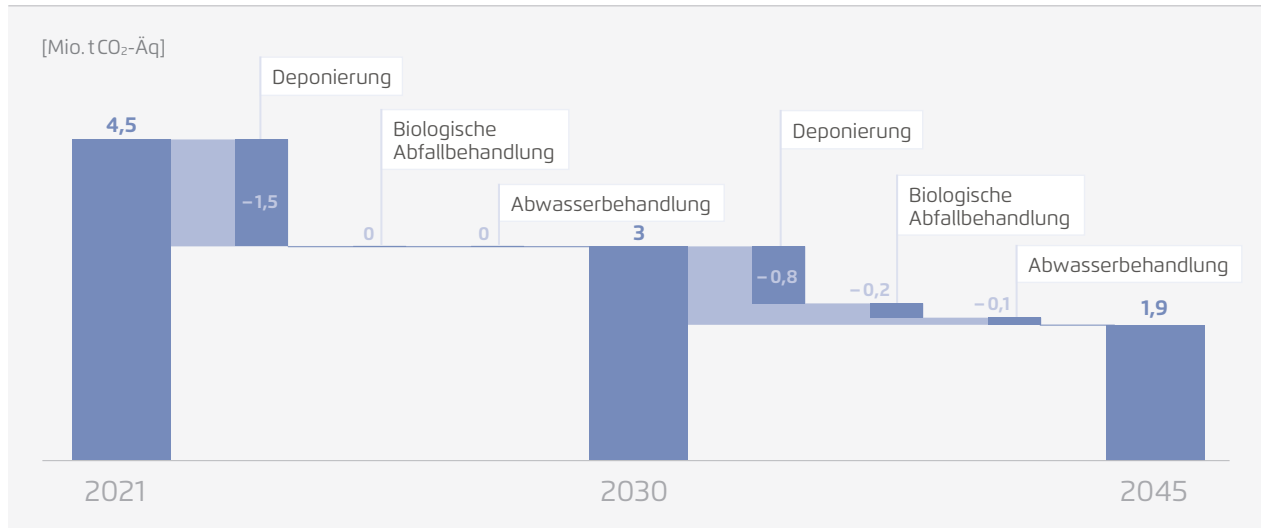
Verschiedene Instrumente können die Moorwiedervernässung fördern wie beispielsweise Wiedervernässungsprämien für Landwirtinnen und Landwirte, Investitionsförderung für den Anbau von Paludikulturen oder die Förderung neuer Wertschöpfungsketten für Produkte aus Paludikulturen. Eine weitere Option ist die Bepreisung und Einbeziehung von Emissionen aus entwässerten Moorböden in ein mögliches EU-Emissionshandelssystem für die Landwirtschaft und landwirtschaftlich genutzte Moore.

Die Senkenleistung des Waldes hat einen gesellschaftlichen Wert, und Maßnahmen zu ihrer Stärkung sollten daher durch öffentliche Gelder entlohnt und gefördert werden. Für die Finanzierung können sowohl reguläre Haushaltsmittel als auch Einnahmen aus einem ETS oder aus freiwilligen Kohlenstoffmärkten genutzt werden.

1.8 Abfall

Abfallsektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. J



Agora Energiewende und Öko-Institut basierend auf Umweltbundesamt (2023). Müllverbrennung wird im Sektor Energiewirtschaft bilanziert

Bis zum Jahr 2045 sinken die Emissionen des Abfallsektors von 4,5 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2021 um weitere 2,5 Mio. t CO₂-Äq. Es verbleiben Restemissionen in Höhe von 1,9 Mio. t CO₂-Äq. Der Großteil der Reduktion entfällt auf die Minderung der CH₄-Emissionen aus der Deponierung durch Maßnahmen zur Deponiebelüftung, aber auch aus dem anhaltenden Rückgang der Emissionen aufgrund des Deponierungsverbots von unbehandelten organischen Abfällen.

Im Bereich der biologischen Abfallbehandlung bestimmen Bevölkerungsentwicklung, die Verpflichtung zur getrennten Erfassung von Bioabfällen und die Reduktion der Lebensmittelabfälle das Abfallaufkommen. Durch eine Verbesserung der Anlagen (beispielsweise Reduktion von Leckagen bei Biogasanlagen, Abdeckung der Lager) können die Emissionen weiter reduziert werden. Zudem kann durch eine gesteigerte Behandlung der Bioabfälle in Vergärungsanlagen der Anteil der Reststoffnutzung für Bioenergie weiter erhöht werden.

1.9 Biomasse

Biomasse wird bei einem leicht steigenden Angebot (286 TWh 2020 und 294 TWh 2045) nachhaltiger bereitgestellt als heute. Eine verstärkte Nutzung von Rest- und Abfallstoffen wird durch nachhaltige Quellen wie Gehölze auf Agrarflächen und Biomasse von wiedervernässten Mooren ergänzt.

Der **stoffliche Einsatz**, vor allem als nachhaltige Kohlenstoffquelle für die Kunststoffherstellung in der Industrie, gewinnt mit 74 TWh 2045 deutlich an Bedeutung. Auch im Gebäudebereich ist Biomasse bedeutend: Der Anteil des Holzbaus steigt bei Ein- und Zweifamilienhäusern auf 35 Prozent und bei Mehrfamilienhäusern auf bis zu 20 Prozent, wodurch biogenes CO₂ langfristig in Gebäuden gespeichert wird.

Die **energetische Nutzung** geht zugunsten der stofflichen Nutzung zurück. Die Entnahme von Holz aus dem Wald zur energetischen Nutzung sinkt gegenüber 2022 um 31 Prozent, während Reststoffe und Abfälle eine zunehmende Rolle spielen. Im Verkehrssektor werden Biokraftstoffe bis 2029 in gleichem Umfang

wie heute genutzt, danach sinkt die Nachfrage durch Elektrifizierung im Straßenverkehr. Der Bedarf nach Biokraftstoffen kommt dann zunehmend aus dem internationalen Luft- und Schiffsverkehr und liegt im Szenario im Jahr 2030 bei 6 TWh, 2045 bei 31 TWh. Die Nutzung von Biomasse zu Heizzwecken geht zurück, da Wärmepumpen kostengünstiger sind.

Politische Maßnahmen zielen darauf ab, die knappen Biomasseressourcen in die stoffliche Nutzung zu lenken und energetisch nur dort einzusetzen, wo keine effizienteren Alternativen bestehen. Mögliche Maßnahmen sind etwa Quoten für biogenen Kohlenstoff, die Bepreisung fossiler Rohstoffe, die Beseitigung von Fehlanreizen (etwa der pauschalen Kohlenstoffneutralität der energetischen Nutzung im EU-Emissionshandel) sowie eine verlässliche Finanzierung für Landwirtinnen und Landwirte, die nachhaltige Produktionssysteme aufbauen. Langfristige Strategien wie die Nationale Biomassestrategie (NABIS) können die Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Biomasseproduktion und -verwendung sichern.

1.10 Wasserstoff und strombasierte Energieträger

Wasserstoff kommt aus Kosten- und Effizienzgründen vor allem als saisonaler Energiespeicher im Stromsektor und in bestimmten Industrieprozessen in der Stahl- und Chemieindustrie zum Einsatz.

Im Szenario steigt die Nachfrage nach klimaneutralem Wasserstoff bis 2045 auf 268 TWh pro Jahr, davon 230 TWh für energetische und 38 TWh für stoffliche Anwendungen. Davon fließen 133 TWh in die Energiewirtschaft, vor allem für den Betrieb regelbarer Kraftwerke. 103 TWh benötigt die Industrie, insbesondere in der Stahlproduktion und für chemische Prozesse. Der Verkehrssektor, vor allem der Güterverkehr, verbraucht bis 2045 etwa 32 TWh.

Der Bedarf an grünem Wasserstoff wird künftig durch Wasserelektrolyse gedeckt. Die Wasserstoffproduktion ist somit integraler Bestandteil des

künftigen Stromsystems. Da die inländische preisgünstige Erzeugungskapazität limitiert ist, werden etwa zwei Drittel der Wasserstoffmenge importiert.

Bis 2032 sollen große Teile des geplanten 9.000 km langen Wasserstoffkernnetzes stehen. Zudem sind im Jahr 2045 unter Berücksichtigung eines Resilienzpuffers etwa 80 TWh Speicherkapazität erforderlich, was einem Drittel des Jahresbedarfs entspricht.

Zusätzlich wird 2045 ein Bedarf an strombasierten flüssigen Energieträgern (*Power to Liquids*, PtL) von 155 TWh erwartet. Sie werden für Flug- und Schiffsverkehr sowie in geringen Mengen für die stoffliche Nutzung in der Industrie verwendet (grünes Naphtha). Diese Produkte werden nicht in Deutschland hergestellt, sondern importiert. Insgesamt beläuft sich der Bedarf an Wasserstoff und PtL auf 423 TWh, wovon 339 TWh importiert werden.

1.11 Carbon Management und Carbon Capture and Storage

Der Einsatz von CCS wird in zwei Kontexten notwendig: zum einen, um verbleibende prozessbedingte und fossile Restemissionen im Industrie- und Abfallsektor abzuscheiden und dauerhaft zu speichern; zum anderen, um Restemissionen vor allem aus der Landwirtschaft auszugleichen. Eine breitere Anwendung von CCS bei fortdauernder fossiler Energieerzeugung ist mit erheblichen Nachteilen und Risiken verbunden, weshalb sie im Szenario nicht berücksichtigt wird. Erstens vergrößert eine Weiternutzung fossiler Energien die notwendigen Anstrengungen bei der Entwicklung von Kapazitäten zur CO₂-Einspeicherung. Zweitens entstehen entlang der Wertschöpfungskette von Kohle, Öl und Erdgas Methanemissionen, die zusätzlich kompensiert werden müssen. Drittens stellen die verfügbaren Injektionskapazitäten zumindest mittelfristig einen relevanten Engpass dar.

CCS wird im Szenario zum einen an verbleibenden fossilen Punktquellen im Industrie- und Abfallsektor eingesetzt (rund 24 Mio. t). Dazu zählen Prozessemissionen vor allem in der Zement- und Kalkproduktion,

der nicht-biogene Anteil der Abfallverbrennung sowie CO₂-Mengen, die beim chemischen Recycling von Kunststoffabfällen entstehen.

Zum anderen kommt CCS in Kombination mit biogenem CO₂ zum Einsatz, um Restemissionen insbesondere aus der Landwirtschaft auszugleichen. Das geschieht im Umfang von 8 Mio. t CO₂ bei der Biomassenutzung in der chemischen Industrie (Bio-CCS) und 10 Mio. t bei der energetischen Nutzung von Biomasse in der Industrie, beispielsweise bei der Zement- und Kalkherstellung (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage*, BECCS).

Ein kleiner Teil der CO₂-Reduktion erfolgt zudem über die direkte Luftabscheidung (*Direct Air Carbon Capture and Storage*, DACCS), die im Jahr 2045 rund 3 Mio. Tonnen CO₂-Äq bindet. Insgesamt beläuft sich die eingespeicherte Menge 2045 auf rund 45 Mio. t CO₂.

Zusätzlich zum CCS-Einsatz wird ein Teil des Kohlenstoffs in langlebigen Produkten vorübergehend gespeichert, was etwa 16 Mio. Tonnen CO₂-Äq kompensiert. Die Senkenleistung von Wäldern, Mooren und Agroforstsystemen trägt entscheidend zur Gesamtbilanz bei und bindet 35 Mio. Tonnen CO₂-Äq pro Jahr. Diese Senken werden durch Aufforstung, Moor-Renaturierung und die Schaffung von Holzproduktspeichern gestärkt. Insgesamt kann Deutschland im Jahr 2045 so Netto-Negativemissionen von -31 Mio. t CO₂-Äq erreichen.

Um den Hochlauf von CCS zu unterstützen, sind umfangreiche CO₂-Transport- und Speicherinfrastrukturen erforderlich. Bis 2045 wird in Deutschland eine CO₂-Speicherkapazität von mehreren Millionen Tonnen benötigt.

Sensitivitätsanalyse: mehr CCS

In einer Szenariovariante wurde untersucht, wie sich ein verlängerter Einsatz von Erdgas in Verbindung mit CCS an Standorten der Stahlindustrie und chemischen Industrie auswirken könnte. Zwei Einsatzbereiche wurden für einen vorübergehend ausgeweiteten Einsatz von CCS betrachtet: DRI-Anlagen in der Stahlproduktion und Erdgas-Kraft-Wärme-Koppelung (KWK)-Anlagen in der Chemie.

In dieser Szenariovariante liegt der Wasserstoffbedarf insgesamt für die Industriekraftwerke im Jahr 2045 um 23 TWh und für die DRI-Anlagen um 37 TWh niedriger. Diese verringerte Nachfrage ist mit Risiken für den Wasserstoffhochlauf verbunden. In Summe würde ein vorübergehend ausgeweiteter Einsatz von CCS nicht nur zusätzliche CO₂-Speicherbedarfe für das abgeschiedene CO₂ erfordern, sondern auch für die Kompensation der Vorkettenemissionen und der Restemissionen, die durch unvollständige Abscheideraten entstehen. Damit wäre diese Technologieoption mindestens ebenso kostenintensiv wie der Einsatz von Wasserstoff.

2 Einleitung

Im Frühjahr 2021 zeigte die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ erstmalig auf, wie Deutschland bis 2045 klimaneutral werden und dabei seine Wettbewerbsfähigkeit erhalten kann. Daraufhin hat die Große Koalition aus CDU/CSU und SPD dieses Ziel und eine Emissionsminderung von 65 Prozent gegenüber 1990 bis 2030 verbindlich im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verankert. Deutschland ist von der Zielsetzungs- in die Umsetzungsphase eingetreten.

Diese Umsetzungsphase bringt jedoch neue Herausforderungen mit sich: Wie kann der Industriestandort Deutschland gleichzeitig klimaneutral werden und seine Wettbewerbsfähigkeit stärken? Was braucht es, damit die klimaneutrale Modernisierung von Gebäuden und nachhaltige Mobilität für alle erschwinglich und praktisch umsetzbar werden? Und wie kann das Potenzial von Land- und Forstwirtschaft zu Klimaschutz, Biodiversität und gesunder Ernährung voll gehoben werden?

Um diesen Fragen zu begegnen, beleuchtet „Klimaneutrales Deutschland – Von der Zielsetzung zur Umsetzung“ den Weg zur Klimaneutralität aus drei zentralen Perspektiven: Erstens zeigt die Szenario-Modellierung einen über alle Sektoren hinweg stimmigen und optimierten Pfad in Richtung

Klimaneutralität auf. Dabei wurden neue Entwicklungen und wissenschaftliche Erkenntnisse in den Sektoren berücksichtigt. Zweitens werden die dafür notwendigen privaten und öffentlichen Investitionen detailliert berechnet und Förderbedarfe abgeleitet. Drittens ist das Szenario mit einem umfassenden Maßnahmenpaket verknüpft, das auf Basis einer ausgewogenen Mischung politischer Instrumente die notwendigen Investitionen ermöglicht und dabei sozialen Ausgleich und Teilhabe sichert.

Die im Oktober 2024 veröffentlichte Synthesepublikation „Klimaneutrales Deutschland – Von der Zielsetzung zur Umsetzung“ (Agora Think Tanks 2024; kurz: „KND – Umsetzung“) skizziert ein integriertes und umsetzungsorientiertes Bild der verschiedenen Pfade des Szenarios, der Politikinstrumente, Investitionen und sozialen Ausgleichsmaßnahmen. Ergänzend dazu erläutert die hier vorliegende Publikation die technischen und ökonomischen Entwicklungen in den einzelnen Sektoren für fachlich interessierte Leserinnen und Leser detailliert und transparent. Zudem veröffentlicht sie zentrale Kennzahlen. Ein umfangreicher, online veröffentlichter Datenanhang begleitet die Studie. <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-szenariopfade>

3 Grundsätze des Szenarios

3.1 Ziele und Konzeption des Szenarios

Deutschland hat sich verpflichtet, bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu werden. Gleichzeitig müssen die im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) festgelegten Ziele für die Senkung der Treibhausgasemissionen in den Zwischenjahren sowie das Emissionsgesamtbudget eingehalten werden. Damit verknüpft sind der Schutz der Gesundheit und des Wohlergehens der Bevölkerung, der Schutz des Eigentums von Unternehmen und Privatpersonen sowie eine Stärkung der Biodiversität. Ohne eine leistungsfähige Wirtschaft ist diese Entwicklung nicht möglich: Integraler und notwendiger Bestandteil des Weges ist daher eine Stärkung der Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft. Ebenso gilt es, Energieversorgung und Lieferketten resilient gegenüber externen Schocks aufzustellen. Schließlich muss die Umstellung auf Klimaneutralität für alle Bürgerinnen und Bürger finanziell tragfähig sein und sozial gerecht erfolgen.

Dieser Weg erfordert entschlossenes politisches Handeln und eine zielkompatible Instrumentierung. Dabei gilt es, die richtige Balance zwischen Stabilität und Flexibilität zu wahren: Einerseits sind verlässliche und planbare Rahmenbedingungen unabdingbar. Andererseits sind Freiräume erforderlich, damit technische und soziale Innovationen weiterentwickelt und erprobt werden können. Mögliche Fehlentwicklungen sollten bereits bei der Planung der jeweiligen Steuerungsinstrumente berücksichtigt werden, um zügiges Nachsteuern zu ermöglichen. All dies erfordert in einem demokratischen System Mehrheitsfähigkeit und eine breite gesellschaftliche Trägerschaft.

Deshalb enthält diese Studie folgende konzeptionelle Elemente:

→ Alle technischen und ökonomischen Entwicklungen wurden mit konkreten politischen Instrumenten hinterlegt.

- Der notwendige Investitionsbedarf für die Transformation wurde berechnet und nach Sektoren und Technologien aufgeschlüsselt. Für ausgewählte zentrale Technologiebereiche wurde zudem der Förderbedarf abgeschätzt (vgl. dazu Agora Energiewende 2024).
- Maßnahmen zur sozial gerechten Verteilung der Investitionskosten und zum sozialen Ausgleich bei übermäßig hohen Energiekosten wurden beschrieben (vgl. dazu Agora Energiewende 2024).
- Um Unsicherheiten und mögliche alternative Entwicklungen zu berücksichtigen und einen resilienten Pfad beschreiben zu können, wurden verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Die Sensitivitätsanalysen stellen dar, was geschieht, wenn sich Rahmenbedingungen anders entwickeln als im Szenario angenommen oder wenn andere Entscheidungen getroffen werden. Sie ermöglichen, einzuschätzen, inwieweit die Szenariopfade stabil sind oder ob sie angepasst werden müssen beziehungsweise können. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die berücksichtigten Entwicklungen.

3.2 Methodik

Das aktualisierte Szenario „Klimaneutrales Deutschland – Von der Zielsetzung zur Umsetzung“ wurde von den vier Instituten Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel entwickelt und modelliert. Die Federführung der einzelnen Sektoren war wie folgt verteilt: Das Öko-Institut hat die Sektoren Verkehr, Landwirtschaft, Abfall und LULUCF (*Land Use, Land Use Change, and Forestry*) federführend bearbeitet, das Wuppertal Institut und die Universität Kassel die Industrie. Prognos verantwortet die Bereiche Gebäude, Energiewirtschaft und den konventionellen Strombedarf der nicht-energieintensiven Industrie und hat die Gesamtprojektleitung übernommen. Die Teams von Agora Energiewende, Agora Industrie, Agora Agrar und

Übersicht der im Szenario berücksichtigten Politikinstrumente

→ Tabelle 1

Marktregulierung	Preisbasierte Anreize	Finanzielle Unterstützung
Übergeordnet		
	<ul style="list-style-type: none"> → ETS I: Ende staatlicher CO₂-Zertifikatsausgabe 2039; CO₂-Preispfad 132 EUR₂₀₂₂/t (2030) und 194 EUR₂₀₂₂/t (2045) → ETS II: Einführung eines nationalen CO₂-Mindestpreises; Preispfad 124 EUR₂₀₂₂/t (2030) und 188 EUR₂₀₂₂/t (2045) 	
Energiewirtschaft		
<ul style="list-style-type: none"> → Absicherung Ausbau Erneuerbarer Energien: Investitionsinstrument (Bund), beschleunigte Flächenausweisungen (Länder) und zügige Genehmigungen (Kommunen) → Verpflichtung der Stromversorger zur Garantie der Versorgungssicherheit ihrer Kunden (dezentrale Kapazitätsmechanismen/Hedging) → Gasverteilnetze: Stilllegungen ermöglichen, Stranded Assets und unverhältnismäßige Anstiege der Netznutzungsentgelte vermeiden 	<ul style="list-style-type: none"> → Möglichkeit zur Kombination von <i>Power Purchase Agreements</i> (PPA) und staatlichen Investitionsinstrumenten, die Preissignale reflektieren → Loslösen von der einheitlichen Strompreiszone und Phase-in dynamischer Netzentgelte und Tarifmodelle → Verbraucherschutz bei der Fernwärme durch Transparenzplattform und Ex-post-Preisaufsicht 	<ul style="list-style-type: none"> → Absicherung der Wirtschaftlichkeit von Dach-PV über eine Kombination von Vor-Ort-Verbrauch mit einer einfachen Einspeiseprämie → Ausschreibungen steuerbarer Backup-Kraftwerke, Förderung H₂-Einsatz über Umlagesystem → Fortführung der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze mit 3 Mrd. EUR/Jahr, Absicherung der Risiken des Fernwärmeausbaus
Industrie		
<ul style="list-style-type: none"> → Labels für klimafreundliche Grundstoffe → Quoten für klimafreundliche Grundstoffe in der öffentlichen Beschaffung, Embodied-Carbon-Standards für Gebäude → Bedarfsgerechte CO₂- und H₂-Infrastruktur → Begleitender Dialog zur Industrietransformation mit Wirtschaft, Politik und Wissenschaft 	<ul style="list-style-type: none"> → ETS I: Auslaufen kostenloser Zuteilung, Einführung CBAM → Preissignale für Substitution fossiler Rohstoffe durch Biomasse und Recycling → Reform der Netzentgeltregulierung für größere Flexibilität im Stromverbrauch → Finanzielle Anreize für den Einsatz klimafreundlicher Grundstoffe bei Endprodukten 	<ul style="list-style-type: none"> → Klimaschutzverträge: Fortführung und Weiterentwicklung für energieintensive Industrien und Kleinunternehmen, kleine und mittlere Unternehmen (KMU) → Investitionsförderung für industrielle Wärmepumpen, Fokus KMU (Förderprogramm, Investitionsprämie) → Fortführung Strompreiskompensation, Stromsteuersenkung → Stärkung der Forschungs- und Innovationsförderung
Gebäude		
<ul style="list-style-type: none"> → Planbarer Pfad von Mindesteffizienzanforderungen an Wohn- und Nichtwohngebäude unter Berücksichtigung von Härtefällen → Fortführung der 65%-Erneuerbaren-Anforderung an Heizungen im GEG → Bei Teilsanierungen: Anforderungen an Komponenten kompatibel mit Effizienzklasse B → Gesetzliche Möglichkeit, Gasverteilnetze mit rechtzeitiger Ankündigung stillzulegen 	<ul style="list-style-type: none"> → Umgestaltung der EU-Taxonomie, um Anreize für Sanierung der ineffizientesten Gebäude zu bieten → Günstiges Strom-/Gaspreisverhältnis durch Senkung von Netzentgelten und Stromsteuer; Wärmepumpen werden attraktiver 	<ul style="list-style-type: none"> → Fortführung und soziale Ausgestaltung der Bundesförderung für effiziente Gebäude (Sanierung und Heizungstausch) in Höhe von 20 Mrd. EUR/Jahr → Neue Modelle der Kreditfinanzierung → Ausweitung von Förderprogrammen zur Wohnraumschaffung im Bestand

Übersicht der im Szenario berücksichtigten Politikinstrumente

→ Tabelle 1

Marktregulierung	Preisbasierte Anreize	Finanzielle Unterstützung
Verkehr		
<ul style="list-style-type: none"> → Steigerung und Verstetigung der Mittel sowie Planungsbeschleunigung für einen schnellen Ausbau der Schienen-, Fuß- und Radverkehrsinfrastruktur sowie des ÖPNV-Angebots → Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen → Treibhausgasminderungsquoten für Kraftstoffe (Fokus insbesondere auf Luft- und Seeverkehr) 	<ul style="list-style-type: none"> → Reform von Kfz-Steuer (Fälligkeit bei Erstzulassung, stärkere CO₂-Orientierung), Dienstwagenbesteuerung (Anhebung des zu versteuernden geldwerten Vorteils von Verbrennern) → Schrittweise Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut → Inflationsanpassung und Angleichung der Energiesteuersätze → Energiebesteuerung von Intra-EU-Flügen 	<ul style="list-style-type: none"> → Attraktive und einfache ÖPNV-Tarife, Fortsetzung des Deutschlandtickets → Kaufförderung für E-Autos mit Staffelung nach Preis und Energieverbrauch sowie sozialer Ausgestaltung → Umwandlung der Entfernungspauschale zu einem Mobilitäts-geld → Unterstützung des raschen Aufbaus von Ladeinfrastruktur, insbesondere für Lkw
Landwirtschaft		
<ul style="list-style-type: none"> → Definition eines Minderungsziels für Treibhausgas (THG)-Emissionen aus der Landwirtschaft für die Jahre nach 2030 → Standards und Kennzeichnung zur Verbesserung des Tierwohls → Gesundheitliche Qualitätsstandards in der Gemeinschaftsverpflegung zur Schaffung fairer Ernährungsumgebungen 	<ul style="list-style-type: none"> → Politikmix zur Verringerung der THG-Emissionen aus der Nutztierhaltung inkl. Bepreisung → Bepreisung von Stickstoffüberschüssen → Finanzielle Anreize zur Minderung von Pflanzenschutzmittelrisiken → Förderung fairer Ernährungsumgebungen 	<ul style="list-style-type: none"> → Zahlungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) zur Entlohnung gesellschaftlich gewünschter Leistungen → Langfristige staatliche Tierwohlprämien → Förderung von THG-Minderungstechnologien in Tierhaltung und Ackerbau → Stärkung der Koordinierung auf Landschaftsebene* und von Innovationspartnerschaften
LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry)		
<ul style="list-style-type: none"> → Einstellung des Torfabbaus 	<ul style="list-style-type: none"> → Bepreisung von THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Mooren → Anreize zur stofflichen Nutzung von Biomasse 	<ul style="list-style-type: none"> → Langfristige finanzielle Anreize für die Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Moore → Förderung neuer Wertschöpfungsketten für Paludikulturen → Förderung von Gehölzstrukturen auf landwirtschaftlichen Flächen → Finanzielle Anreize zur Kohlenstoffspeicherung in Wäldern

Agora Think Tanks * Die Landschaftsebene ist eine Ebene über der Feldebene. D. h., die Koordination über die Grenzen landwirtschaftlicher Betriebe hinweg soll gestärkt werden, um z. B. Biodiversitätsmaßnahmen großflächig anzulegen

Agora Verkehrswende haben in der Konzeption der Szenarien und der Verschriftlichung der Ergebnisse eng mit den Instituten zusammengearbeitet.

Eckpunkte der Methodik sowie die Rahmendaten sind im Folgenden dargestellt. Eine detailliertere Darstellung der verwendeten Modelle findet sich im Methodenanhang.

Das grundsätzliche Vorgehen entspricht dem der Vorgängerstudie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (Prognos et al. 2021). Die Szenarien berücksichtigen die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) sämtlicher Sektoren. Die Emissionen aus LULUCF werden bis 2044 nachrichtlich ausgewiesen, ab 2045 werden sie entsprechend des KSG zur Erreichung der Klimaneutralität angerechnet. Die Bilanzierung der

Übersicht der Sensitivitätsanalysen

→ Tabelle 2

Sektor/Thema	Fragestellung	Sensitivität
Industrie	Wie können umfangreiche Importe von Vorprodukten (grünes Eisen und erneuerbares Methanol) zukünftig das deutsche Energiesystem entlasten und die Anforderungen an den Wasserstoff-Infrastrukturaufbau verändern?	Import von grünem Eisen und Methanol
Gebäude	Was geschieht, wenn die Gebäudesanierung nicht so schnell voranschreitet, wie im Szenario vorgesehen?	Abgeschwächte Gebäudeeffizienz
LULUCF	Was passiert mit der Waldsenke bei höheren natürlichen Störungen, etwa durch Stürme, Dürren oder Käferkalamitäten, oder bei niedrigeren natürlichen Störungen?	Niedrigere und höhere Störungen
Carbon Capture and Storage (CCS)	Welche Auswirkungen hat es, wenn CCS in weiteren Anwendungen der Industrie (bei mit Erdgas betriebenen Direktreduktionsanlagen in der Stahlindustrie und bei Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen der Chemieindustrie) eingesetzt wird?	Mehr CCS

Agora Think Tanks

THG erfolgt auf Basis der Bestimmungen der Nationalen Inventarberichte gemäß der Klimarahmenkonvention (UNFCCC 2022). Dementsprechend wird für alle THG das Treibhausgaspotenzial über einen Zeithorizont von 100 Jahren (GWP100 (*Global Warming Potential*)) aus dem fünften Sachstandsbericht (AR5) des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2014) zugrunde gelegt.

Das Szenario im Sektor Landwirtschaft basiert weitestgehend auf Annahmen der Studie *Agriculture, forestry and food in a climate neutral EU*, die im September 2024 von Agora Agrar veröffentlicht wurde, und interpretiert die Ergebnisse der Studie für Deutschland. Die Berechnungen für die Jahre vor 2045 erfolgten durch das Öko-Institut. Bis zum Jahr 2030 wurden die Annahmen zur Entwicklung der Tierbestände aus dem Projektionsbericht 2024 der Bundesregierung übernommen. Die Flächenentwicklung folgt den Trends des LULUCF-Sektors. Die Jahre zwischen 2030 und 2045 wurden interpoliert.

Zur Erreichung der Minderungspfade wurden in den einzelnen Sektoren umfassende technische Maßnahmen angenommen. Deren Effekte wurden quantitativ modelliert und in Ergänzung zur Vorgängerstudie mit konkreten Politikinstrumenten unterlegt. Kriterien für die Auswahl der Maßnahmen waren sowohl die Wirtschaftlichkeit als

auch die Frage der technischen Umsetzbarkeit und des möglichen Markthochlaufs. Die Instrumentierung beinhaltet sowohl neue beziehungsweise zusätzliche Instrumente als auch die Modifikation bereits bestehender Instrumente. Die sektoralen Instrumenten-Sets wurden von den Auftraggebern und den Studienerstellern gemeinsam diskutiert und abgestimmt. Es wurde unterstellt, dass neue Maßnahmen und Instrumente frühestens ab 2025 umgesetzt werden können. Dafür müssen sie in vielen Fällen bereits ab 2025 vorbereitet und eingeleitet werden. Dies wird bei der Darstellung zentraler politischer Weichenstellungen berücksichtigt. Für eine Übersicht über die Instrumente vergleiche Tabelle 1.

Die sektorale Abgrenzung erfolgt auf Basis des KSG und analog zur Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (Prognos et al. 2021): Tabelle 3 gibt einen Überblick über die den Sektoren zugeordneten Kategorien des *Common Reporting Formats* (CRF²).

² *Common Reporting Format*: Kennzeichnung zur Gliederung der THG-Emissionen in den Nationalen Inventarberichten (NIR).

→ Infobox 1: Was ist inhaltlich neu?

Nachfolgenden werden die wichtigsten Änderungen bei den Annahmen und Ergebnissen im Vergleich zur ersten Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (Prognos et al. 2021) vorgestellt.

Update der Rahmendaten

In allen Sektoren wurden die übergeordneten Rahmendaten aktualisiert. Die Bevölkerungsentwicklung liegt bis zum Jahr 2045 über fünf Prozent höher als in KND 2045 (Prognos et al. 2021). Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist in „KND – Umsetzung“ bis Mitte der 2020er-Jahre um rund sechs Prozentpunkte niedriger als in der Vorgängerstudie. Langfristig wird von einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von über einem Prozent ausgegangen. Die Energiepreise wurden basierend auf dem *World Energy Outlook 2023* angepasst. Die Preise für Erdöl, Erdgas und Steinkohle haben sich leicht erhöht. Der ETS-Preis (*EU Emissions Trading System*; Europäischer Emissionshandel) ist mit 130 EUR₂₀₂₂/t CO₂ im Jahr 2030 deutlich höher als in der Vorgängerstudie angenommen.

Einstieg in Netto-Negativemissionen

Aufgrund der bereits aufgelaufenen Verzögerungen beim Klimaschutz ist das langfristige Einhalten der 1,5-Grad-Grenze nur möglich, wenn die Industrieländer nicht nur klimaneutral werden, sondern auf längere Sicht auch Negativemissionen erzielen. In diesem Szenario wird aufgezeigt, wie dieses bereits ab 2045 gelingen kann.

Kompensation von unvermeidbaren Emissionen

Um Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, ist es erforderlich, die nicht vermeidbaren Emissionen, beispielsweise aus Landwirtschaft und Industrie, durch Negativemissionen zu kompensieren. Im Vergleich zu KND 2045 (Prognos et al. 2021) gibt es zwei wesentliche Unterschiede: Zum einen reduzieren die Maßnahmen in der Landwirtschaft den Kompensationsbedarf, da weniger Restemissionen anfallen. Zum anderen werden durch die Anpassung im Klimaschutzgesetz (KSG) seit dem Sommer 2021 die positiven oder negativen Emissionen aus dem Sektor *Land Use, Land Use Change, and Forestry* (LULUCF) angerechnet.³ Die übrigen Restemissionen werden im aktuellen Szenario „KND – Umsetzung“ stärker durch die stoffliche Nutzung von Biomasse in der Industrie kompensiert. *Direct Air Capture* und Biomasse-CCS (*Carbon Capture and Storage*) spielen eine deutlich geringere Rolle. Daraus ergeben sich ökonomische Vorteile, denn die Treibhausgas-minderungspreise für technische Negativemissionen wie *Direct Air Carbon Capture and Storage* (DACCS) liegen deutlich höher als die für natürlichen Klimaschutz im LULUCF-Sektor. Bei den meisten Maßnahmen zum natürlichen Klimaschutz können außerdem positive Wirkungen auf die Biodiversität und die Klimaanpassung erwartet werden.

Effizientere Nutzung von Biomasse

Biomasse ist eine knappe Ressource. Zudem ermöglicht nur die stoffliche, nicht die energetische Nutzung die Bindung von Kohlenstoff, um Negativemissionen zu generieren. Deshalb ist es wichtig, dass Biomasse so effizient wie möglich genutzt wird und stoffliche Nutzung vor energetischer Nutzung steht. Im Szenario „KND – Umsetzung“ wird die Biomasse stärker stofflich genutzt. Dieses geschieht vor allem in der chemischen Industrie. Dort wird der erdölbasierte Rohstoff, aus dem dann Kunststoffe produziert werden, durch biogenen Rohstoff ersetzt, der im Inland mit inländischer Biomasse produziert wird. Auch im Gebäudesektor vollzieht sich eine Abkehr von der energetischen Nutzung (Holz als Wärmequelle) hin zur stofflichen Nutzung von Holz als Baustoff, wodurch das biogene CO₂ langfristig in Gebäuden gespeichert werden kann.

Neue Technologien

Im Szenario wurden in mehreren Sektoren neue Technologien berücksichtigt. Im Gebäudesektor bilden Luft-Luft-Wärmepumpen einen neuen Baustein in der Wärmeversorgung und helfen mit, Wärmepumpen

³ Für den Sektor LULUCF werden erstmals verbindliche Senkenziele bzw. Negativemissionen festgelegt: -25 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030, -35 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040 und -40 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045.

→ Infobox 1 (Fortsetzung): Was ist inhaltlich neu?

rasch in die Breite zu bringen. Saisonale Wärmespeicher nehmen eine größere Rolle ein. Gasturbinen und Motoren nutzen Wasserstoff und synthetische Brennstoffe wie Methanol und Fischer-Tropsch-Brennstoffe zur Stromerzeugung. Der Wasserstoff wird unter Tage in Wasserstoffspeichern saisonal gespeichert. Batteriekapazität wird durch technologische Weiterentwicklung günstiger und die Speichertiefe von Batterien steigt. In der Landwirtschaft werden neue Technologien wie Futterzusatzstoffe zur Minderung des Methanausstoßes von Wiederkäuern und auch emissionsmindernde Maßnahmen für Wirtschaftsdünger wie beispielsweise die Ansäuerung oder Kühlung von Gülle oder der Einsatz von Nitrifikationshemmstoffen angewandt. Bestehende Technologie wie die Wirtschaftsdüngervergärung und *Precision Farming* werden breiter angewendet.

Das technologische Innovationspotenzial wurde nicht vollständig genutzt. Die angenommenen techno-ökonomischen Entwicklungen sind in Summe tendenziell konservativ, dadurch ist das Szenario besonders resilient. Beispiele dafür sind die Kosten für Batteriespeicher, die im Szenario nicht ihr volles Kostensenkungspotenzial entfalten, oder reversible Brennstoffzellen (*Reversible Solid Oxide Fuel Cell Technology*), die die Energieeffizienz bei der Nutzung von Biomethan und Wasserstoff als Speicher deutlich erhöhen können.

Sektor Energiewirtschaft: höhere Resilienz durch geringere Importabhängigkeit

Im Stromsektor hat sich der stündliche Austausch mit dem Ausland erhöht. Aber in Summe – das heißt saldiert über alle Importe und Exporte innerhalb eines Jahres – konnten die Nettoimporte im Vergleich zum letzten Szenario und anderen aktuellen langfristigen Energieszenarien deutlich reduziert werden. Das aktuelle Szenario zeigt damit einen Weg auf, wie in Deutschland auch ohne hohe Netto-Stromimporte im Winter die Versorgungssicherheit gewährleistet werden kann.

Sektor Industrie: Elektrifizierung, schneller DRI-Hochlauf und Biomasse als Grundstoff

In der Industrie gewinnt die Elektrifizierung von Prozesswärme an Bedeutung, da sich gezeigt hat, dass sie in vielen Bereichen technisch machbar und im Falle der Industriewärmepumpe bereits wettbewerbsfähig ist. Der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch steigt auf 448 TWh im Jahr 2045. Der Hochlauf der DRI-Route⁴ in der Stahlproduktion wurde im Vergleich zur Vorgängerstudie beschleunigt und an die in der Praxis geplanten Projekte angepasst. Biomasse wird zunehmend einer stofflichen Nutzung, vor allem in der Chemieindustrie, zugeführt. Dadurch nimmt die Industrie eine wichtige Rolle bei der Erzeugung von Negativemissionen ein.

Sektor Verkehr: biogene Flugtreibstoffe

Zur Stärkung der Resilienz wurde im Szenario „KND – Umsetzung“ der Aufbau einer inländischen Produktion von zusätzlichen biogenen Flugtreibstoffen angenommen. Den Input für die Kraftstoffproduktion bilden schnell nachwachsende feste Biomassen aus Kurzumtriebsplantagen von Pappeln und Weiden.

Sektor Landwirtschaft: strukturelle Anpassungen und neue Technologien

Die Reduktion der Tierhaltung in Verbindung mit einer nachhaltigen, stärker pflanzenbasierten Ernährung sowie die Verringerung von Lebensmittelabfällen sind zentrale Hebel zur Treibhausgasminderung. Durch die Verbindung von effizienter Landnutzung und nachhaltigem Konsum wird eine Verlagerung von Emissionen ins Ausland vermieden. Eine effizientere Stickstoffverwendung ist die wichtigste Maßnahme im Ackerbau. Außerdem führt die Anwendung von Treibhausgas-Minderungstechnologien in Tierhaltung und Ackerbau zu weiteren Minderungen. In allen genannten Aspekten geht das Szenario von stärkeren Veränderungen aus als noch das KND 2045 (Prognos et al. 2021). So werden erhebliche Potenziale zur Reduktion von Emissionen gehoben, wodurch weniger negative Emissionen zur Kompensation erforderlich werden.

4 direct reduced iron (direkt reduziertes Eisen)

→ Infobox 2: Sektorale Abgrenzung

Die Abgrenzung der Sektoren⁵ basiert grundsätzlich auf der Einteilung nach dem Klimaschutzgesetz. Es werden sieben Sektoren unterschieden:

Energiewirtschaft

Der größte Bereich der Energiewirtschaft ist die öffentliche Stromversorgung inklusive der Einspeisung von Wärme in öffentliche Wärmenetze. Darüber hinaus werden auch die gesamten Emissionen der Raffinerien (inklusive Kraftwerke), der Kraftwerke des Braunkohlebergbaus sowie die Emissionen der Abfallverbrennungsanlagen hier bilanziert. Der Brennstoffeinsatz aus Pipelineverdichtern und flüchtige Emissionen aus dem Kohlebergbau und Gasleckagen werden ebenso berücksichtigt. Hingegen nicht zur Energiewirtschaft zählen die Kraftwerke des verarbeitenden Gewerbes. Diese werden der Industrie zugerechnet.

Industrie

Im Sektor Industrie sind gemäß der Abgrenzung des Klimaschutzplanes der Bundesregierung die energiebedingten Emissionen des verarbeitenden Gewerbes und der Bauindustrie sowie die prozessbedingten Emissionen der Industrie enthalten. Des Weiteren werden hier auch die Emissionen abgebildet, die sich aus der Nutzung von Produkten ergeben (beispielsweise aus der Ausgasung von Lacken).. Raffinerien und eigenständige Kokereien gehören zwar zum verarbeitenden Gewerbe, sind hier jedoch ausgenommen und dem Sektor Energiewirtschaft zugerechnet.

Gebäude

Der Gebäudesektor umfasst hier den Energieverbrauch der Sektoren Private Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen. Im Gegensatz zur deutschen Energiebilanz wird der Verbrauch des bauwirtschaftlichen Verkehrs dem Industriesektor zugerechnet und der Energieverbrauch der Landwirtschaft wird im Sektor Landwirtschaft ausgewiesen. In dieser Abgrenzung umfasst der Gebäudesektor nebst dem Verbrauch für gebäudebezogene Anwendungen wie Raumwärme, Warmwasser, Haustechnik und Klimakälte auch den Energieverbrauch von Elektrogeräten, Beleuchtung (inklusive Straßenbeleuchtung) und den Verbrauch bei gewerblichen Prozessen. Bei den Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors sind hingegen entsprechend der Abgrenzung des Klimaschutzgesetzes (KSG) die Emissionen aus Strom und der leitungsgebundenen Wärmeversorgung nicht im Gebäudesektor, sondern in der Energiewirtschaft erfasst.

Verkehr

Im Verkehrssektor werden nur die Treibhausgasemissionen bilanziert, die direkt durch die Fahrzeugnutzung erzeugt werden (*Tank to Wheel*). Andere indirekt dem Verkehr zuzuordnende Emissionen wie der Energieaufwand für Fahrzeugproduktion, Batterieherstellung, Stromerzeugung für die Elektromobilität und den Schienenverkehr sowie die Emissionen bei der Herstellung von Kraftstoffen, unter anderem von Biokraftstoffen, werden in anderen Sektoren bilanziert beziehungsweise fließen, falls die Herstellung im Ausland erfolgt, gar nicht in die nationalen Inventare ein.

Landwirtschaft

Im Landwirtschaftssektor werden nach der Inventarlogik die Treibhausgase der Landwirtschaft bilanziert, die durch biologische Prozesse wie beispielsweise die Verdauung der Wiederkäuer und Stickstoffprozesse in den Böden entstehen. Die CO₂-Emissionen, die aus der landwirtschaftlichen Nutzung von Mooren stammen, werden im Sektor „Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Wald“ (*Land Use, Land Use*

⁵ Für die Energie- und THG-Statistik gibt es unterschiedliche Statistiken. Die Energieverbräuche sind in der Energiebilanz ausgewiesen, die THG-Emissionen werden im Nationalen Inventarbericht (NIR) dargestellt. Die THG-Emissionen der Sektoren im Klimaschutzgesetz basieren auf den Emissionen aus dem NIR. Die Abgrenzung der Sektoren in den einzelnen Statistiken ist jedoch nicht vollständig deckungsgleich. Für die Interpretation der Ergebnisse wurden hier die Energieverbräuche grundsätzlich identisch abgegrenzt wie die THG-Emissionen im Klimaschutzgesetz.

→ Infobox 2 (Fortsetzung): Sektorale Abgrenzung

Change, and Forestry; LULUCF) bilanziert. Zudem werden nach dem Klimaschutzplan der Bundesregierung auch die energiebedingten Emissionen des Landwirtschaftssektors hinzugezählt. Diese umfassen sowohl den Wärmebedarf von Gewächshäusern, Stallungen, Trocknung und Gebäuden als auch den Kraftstoffein-
satz in der Landwirtschaft.

Abfall

Zum Abfallsektor zählen die nicht-energetischen Treibhausgasemissionen der Abfallwirtschaft. Das sind Methanemissionen aus der Deponierung von Abfällen, Methan- und Lachgasemissionen aus der biologischen Abfallbehandlung sowie aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen. Zudem werden Methan- und Lachgasemissionen aus der Abwasserbehandlung berücksichtigt. Einige Aktivitäten im Abfallbereich wie der Betrieb von Müllverbrennungsanlagen oder Recyclingmaßnahmen führen in der Regel zu Emissionen oder Einsparungen in anderen Sektoren und werden daher in der Energiewirtschaft oder in der Industrie berücksichtigt.

Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Wald (LULUCF)

Unter LULUCF werden flächenbezogene Emissionen für die Kategorien Wald, Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen bilanziert. In sogenannten Senken kann CO₂ auf der Fläche gespeichert werden, zum Beispiel in Bäumen im Wald. Auf Flächen können aber auch Treibhausgase freigesetzt werden. Zu solchen Quellen zählen beispielsweise landwirtschaftlich genutzte Moorböden und zu Acker umgewandeltes Grünland. Zudem wird der Holzproduktspeicher, der keinen Flächenbezug aufweist, zum LULUCF-Sektor gezählt. Gemäß Klimaschutzgesetz werden die Emissionen bis 2044 nur nachrichtlich ausgewiesen. Ab 2045 werden sie zur Erreichung der Klimaneutralität angerechnet und bilanziert.

Abgrenzung der Sektoren erfolgt nach dem Klimaschutzgesetz

→ Tabelle 3

Sektor	CRF-Kategorie
Energiewirtschaft	1.A.1.a Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung, 1.A.1.b Mineralölraffinerien, 1.A.1.c Herstellung von festen Brennstoffen, 1.A.3.e Energieeinsatz zum Betrieb von Pipelines – Erdgasverdichter, 1.B. Diffuse Emissionen
Industrie	1.A.2 Industrie (energiebedingt), 2 Prozessemissionen
Gebäude	1.A.4.a-b GHD und private Haushalte, 1.A.5 andere stationäre Einrichtungen (z. B.: Militär)
Verkehr	1.A.3.a-d zivile Luftfahrt, Straßenverkehr, Schienenverkehr, Schifffahrt
Landwirtschaft	1.A.4.c Land- und Forstwirtschaft, Fischerei (energiebedingt), 3 Landwirtschaft
LULUCF (nachrichtlich)	4 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
Abfall	5 Abfall

Quelle: CRF: Common-Reporting-Format gemäß Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen zur Klimaberichterstattung (UNFCCC 2020)

3.3 Rahmendaten

Für die Entwicklung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen sind die zentralen Variablen die Bevölkerung, die Zahl der Haushalte, das Bruttoinlandsprodukt (BIP), die Bruttowertschöpfung (BWS), die Zahl der Erwerbstätigen, die Heiz- und Kühlgradtage sowie die Energie- und CO₂-Preise. Tabelle 4 fasst die zeitliche Entwicklung der wichtigsten Annahmen bis 2045 zusammen.

Die Bevölkerung wächst im Szenario „KND – Umsetzung“ von 83,7 Millionen im Jahr 2022 auf 85,1 Millionen im Jahr 2030. Nach 2030 nimmt die Bevölkerung wieder leicht ab und liegt 2045 bei 84,5 Millionen (Statistisches Bundesamt 2022a). Gleichzeitig wird die Bevölkerung älter, der Anteil der über 65-Jährigen steigt von 22 Prozent auf 27 Prozent. Damit verbunden ist ein Rückgang der erwerbstätigen Bevölkerung.

Gleichwohl steigt die reale Wirtschaftsleistung weiter an. Gemessen am BIP wächst sie zwischen 2022 und 2045 durchschnittlich um rund 1,1 Prozent pro Jahr (Prognos 2023). Insgesamt erhöht sich das BIP von 3.262 Mrd. Euro₂₀₁₅ im Jahr 2020 über 3.534 Mrd. Euro₂₀₁₅ im Jahr 2030 auf 4.155 Mrd. Euro₂₀₁₅ im Jahr 2045.

Die angenommenen Energiepreise für Rohöl, Erdgas und Steinkohle basieren ab dem Jahr 2035 auf dem Szenario *Announced Pledges* des World Energy Outlooks 2023. Bis zum Jahr 2035 wurden die aktuellen Terminmarktpreise fortgeschrieben und interpoliert. Der Preis für CO₂-Verschmutzungsrechte im Rahmen des EU-Emissionshandelssystem (ETS) basiert ab 2030 auf dem *Announced Pledges*-Szenario und liegt 2030 über dem Preis, der für den Energieträgerwechsel von Kohle zu Gas bezahlt werden müsste. Die langfristige Preisannahme impliziert, dass ein Teil der Minderungen in Industrie und Energiewirtschaft, beispielsweise durch den Einsatz von Wasserstoff,

Rahmendaten

→ Tabelle 4

		2022	2025	2030	2040	2045
Bevölkerung*	Mio.	83,7	84,7	85,1	84,9	84,5
Haushalte	Mio.	40,9	41,1	41,7	42,4	42,6
Erwerbstätige	Mio.	45,6	45,3	44,6	43,7	43,5
BIP	Mrd. EUR ₂₀₁₅	3.262	3.328	3.534	3.936	4.155
Bruttowertschöpfung	Mrd. EUR ₂₀₁₅	2.943	3.003	3.189	3.552	3.749
Energiepreise (Grenzübergang)						
Rohöl	EUR ₂₀₂₂ /Barrel	96	70	69	68	66
Erdgas	EUR ₂₀₂₂ /MWh (Hs)	76	36	28	21	20
Steinkohle	EUR ₂₀₂₂ /MWh (Hs)	37	14	12	10	9
Wasserstoff – grün	EUR ₂₀₂₂ /MWh (Hs)**			126	106	100
PtL: Diesel/Kerosin***	EUR ₂₀₂₂ /MWh (Hs)			267	221	196
EU-ETS	EUR ₂₀₂₂ /t	81	84	132	179	194
BEHG	EUR ₂₀₂₂ /t	30	55	124	172	188
Heizgradtagszahl		3.107	3.367	3.327	3.247	3.206
Kühlgradtagszahl		170	173	177	186	189

Eigene Berechnungen Prognos 2023, Agora Energiewende 2024, WEO 2023 (UBA 2021). *Die aktuellen Zahlen des Zensus 2022 wurden im Frühjahr 2024 veröffentlicht. Sie konnten bei der Modellierung nicht mehr berücksichtigt werden. Der neue Zensus weist für Mai 2022 eine Bevölkerung von 82,7 Millionen aus, das sind rund eine Million weniger als in den bisherigen Statistiken angenommen wurde. Die im Szenario unterstellte Bevölkerung übersteigt demnach zumindest kurz- und mittelfristig die effektive Bevölkerung um rund ein Prozent. **Abnahmekosten Fernleitungsnetz Deutschland inkl. Strukturierung (Speicher) und Fernleitungsnetzskosten. *** aus Fischer-Tropsch-Synthese.

durch flankierende Maßnahmen wie Förderprogramme ausgelöst werden muss.

Über die Heiz- beziehungsweise Kühlgradtagszahlen kann der Einfluss der Jahreswitterung auf den Wärme- beziehungsweise den Kühlbedarf eines Gebäudes berechnet werden. In den Szenarien wird eine Klimaerwärmung unterstellt. Die Winter-, aber auch die Sommermonate werden im Mittel der Jahre wärmer. Dadurch verringert sich der Bedarf an Raumwärme im Winter, während der Bedarf nach Klimakälte zur Kühlung der Gebäude im Sommer ansteigt. Grundlage für diese Abschätzungen bilden aktuelle Klimaszenarien (publiziert beispielsweise in UBA 2021, Abbildung 5, genutzt wurden die Werte des RCP-Szenario⁶ 4,5). Grundlage für die Abschätzungen der Entwicklung der Kühlgradtage sind Angaben der EU-Kommission (European Commission 2016).

⁶ „RCP“ steht für *representative concentration pathway*. Dabei handelt es sich um Szenarien, die vom *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) verwendet werden, um die Entwicklung der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu beschreiben.

4 Ergebnisübersicht

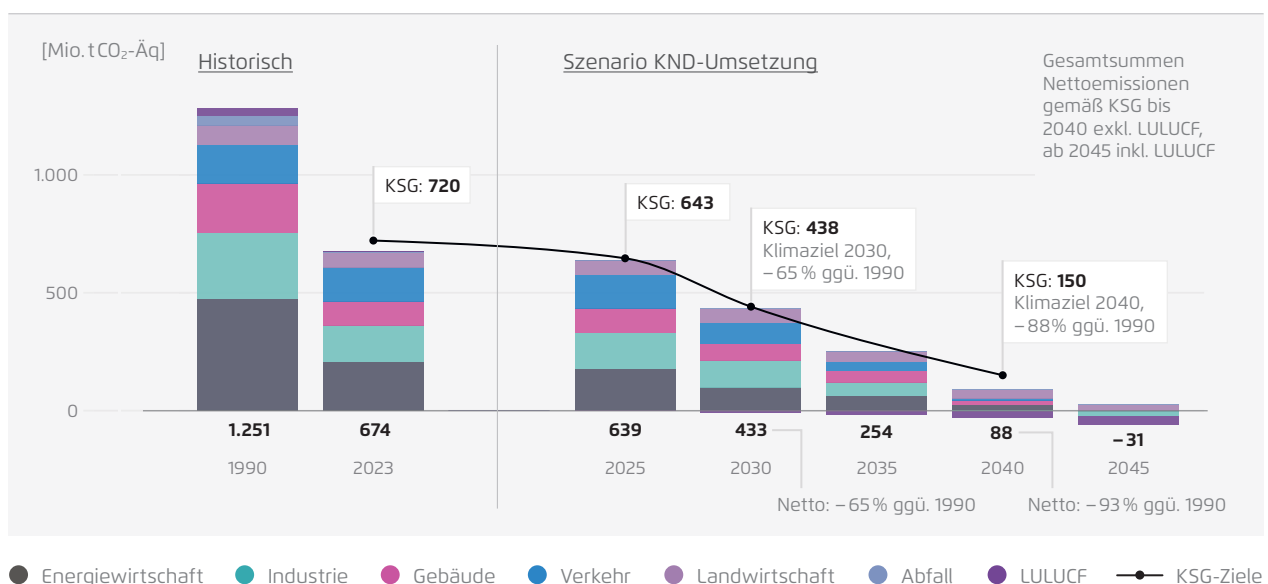
Das Szenario erfüllt die verfassungsrechtliche Vorgabe, in Deutschland zeitnah Klimaneutralität herzustellen und dadurch Emissionsminderungen nicht zulasten künftiger Generationen in die Zukunft zu verschieben. Das Ziel von 65 Prozent weniger Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 gegenüber 1990 wird erreicht, auch die nach dem Klimaschutzgesetz zulässige Gesamtmenge für den Zeitraum von 2021 bis 2030 wird eingehalten. Ein Großteil der Emissionsminderungen erfolgt bis 2040 – zu diesem Zeitpunkt sind, angereizt durch die Entwicklung im Europäischen Emissionshandel (ETS I), sowohl Energiewirtschaft als auch Industrie nahezu vollständig klimaneutral. Ermöglicht durch einen Mix aus preisbasierten Anreizen, Marktregulierung, Infrastrukturausbau und finanzieller Unterstützung nehmen auch in den Sektoren Gebäude und Verkehr bis 2040 die Emissionen stark ab. Land- und Forstwirtschaft können ihren Beitrag zur Klimaneutralität bis 2045 deutlich steigern. Die optimierte Nutzung von CCS, natürlichen

Senken und Kohlenstoffbindung in Produkten ermöglicht im Jahr 2045 Netto-Negativemissionen. Abbildung 1 zeigt den Reduktionspfad der Treibhausgasemissionen. Abbildung 2 gibt einen Überblick, wie dies erreicht wird.

Gleichzeitig sinkt mit den Treibhausgasemissionen auch der Energieverbrauch. In Abbildung 3 ist der Endenergieverbrauch (EEV) dargestellt, welcher den Energiebedarf der Letztverbraucher zeigt, wie beispielsweise der Industrie oder der privaten Haushalte. Mit dem Rückgang des Treibhausgasemissionen ist auch ein deutlicher Wechsel der Energieträger zu beobachten: weg von Mineralölen und Erdgas, die heute einen Anteil von rund 60 Prozent haben – hin zu Strom und Erneuerbaren Energien. In Abbildung 4 ist der Primärenergieverbrauch (PEV) dargestellt. Hier werden im Vergleich zum EEV der Energieeinsatz des Umwandlungssektors berücksichtigt sowie Übertragungsverluste.

Reduktionspfad der Treibhausgasemissionen bis 2045

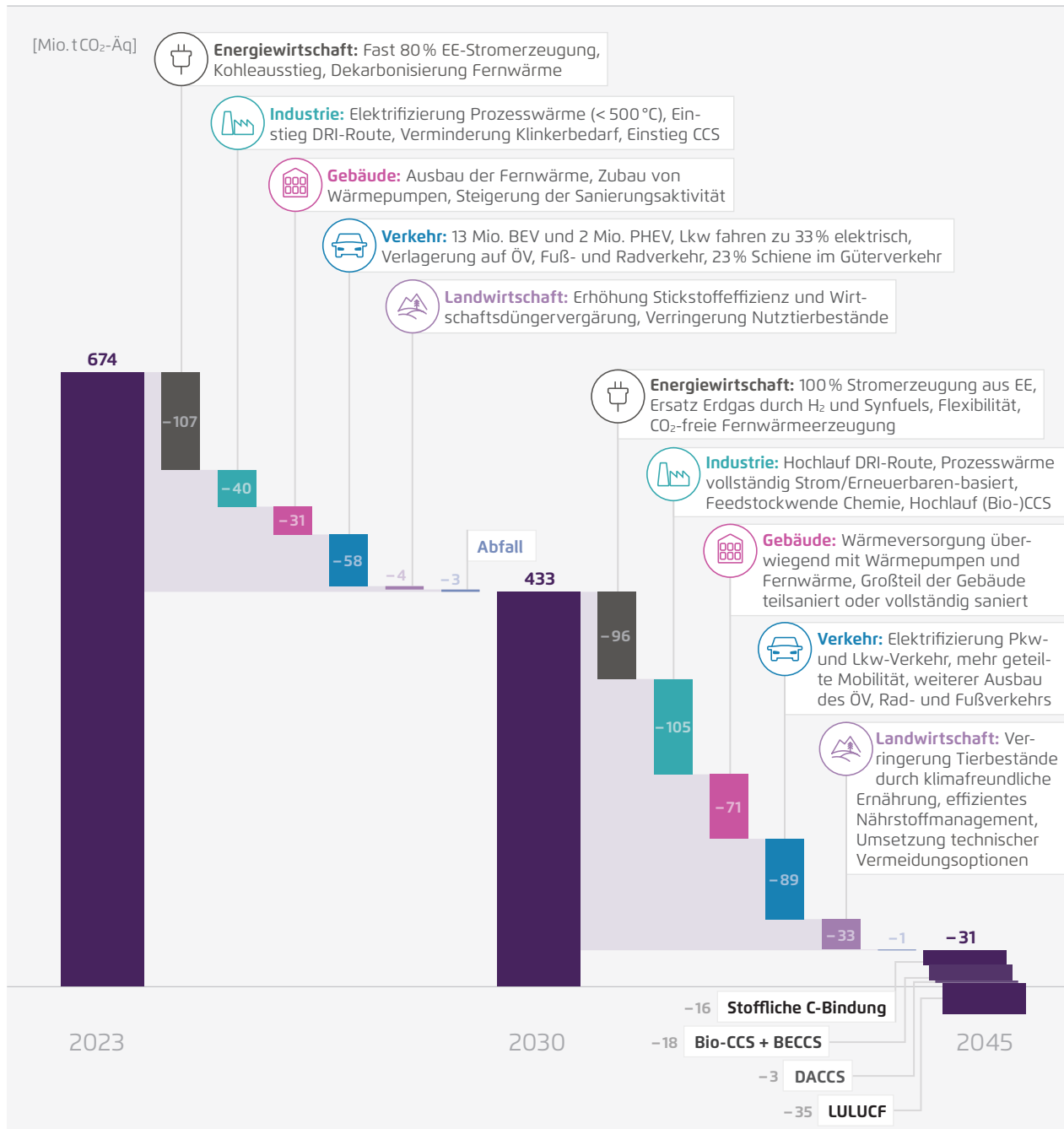
→ Abb. 1



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024), historische Daten: Umweltbundesamt (2024)

Maßnahmen im Szenario Klimaneutrales Deutschland – Umsetzung

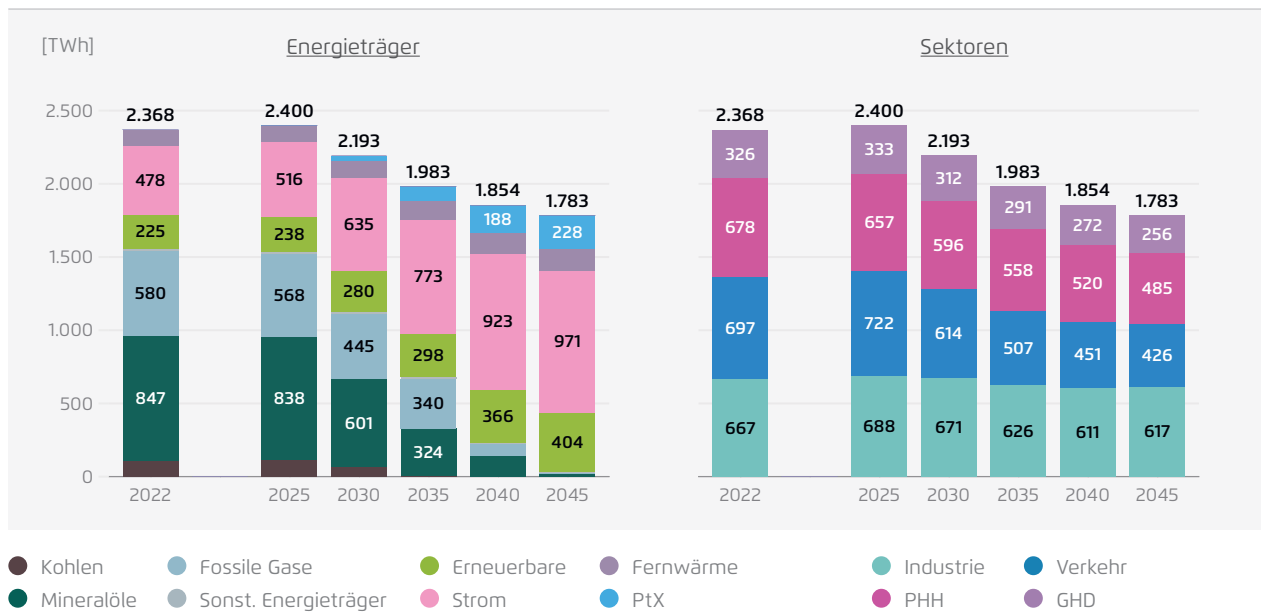
→ Abb. 2



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). BEV = Batterieelektrische Fahrzeuge; C = Kohlenstoff; CCS = Carbon Capture and Storage; DACCS = Direct Air Carbon Capture and Storage; DRI = Stahlproduktion: Direktreduktion von Eisenerz durch Wasserstoff und Erdgas; EE = Erneuerbare Energien; H₂ = Wasserstoff; LULUCF = Land Use, Land Use Change, and Forestry; ÖV = Öffentlicher Verkehr; PHEV = Plugin-Hybride

Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren

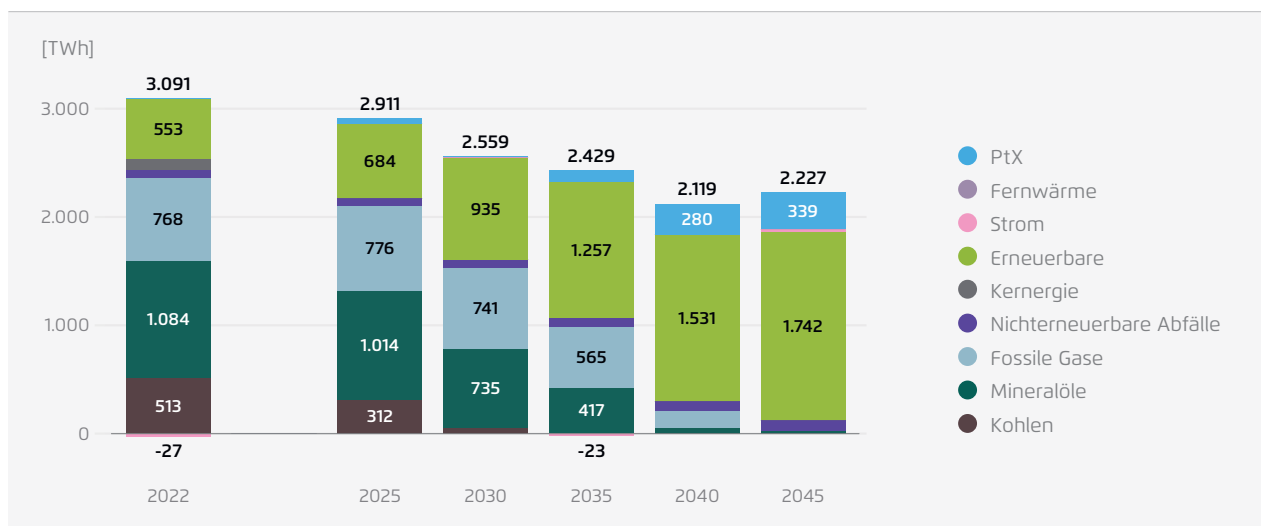
→ Abb. 3



Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). Sektorabgrenzung nach Energiebilanz (Verkehr mit intern. Luftverkehr, ohne intern. Seeverkehr. GHD einschließlich Landwirtschaft). PtX = Power to X; PHH = Private Haushalte, GHD = Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Primärenergieverbrauch nach Energieträgern

→ Abb. 4



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). Bei Strom und PtX sind im Primärenergieverbrauch nur die Nettoimporte enthalten, da der Einsatz von Primärenergie (z. B. Erneuerbare Energien) für die inländische Erzeugung von Strom und PtX (Wasserstoff) bereits enthalten ist. PtX = Power to X

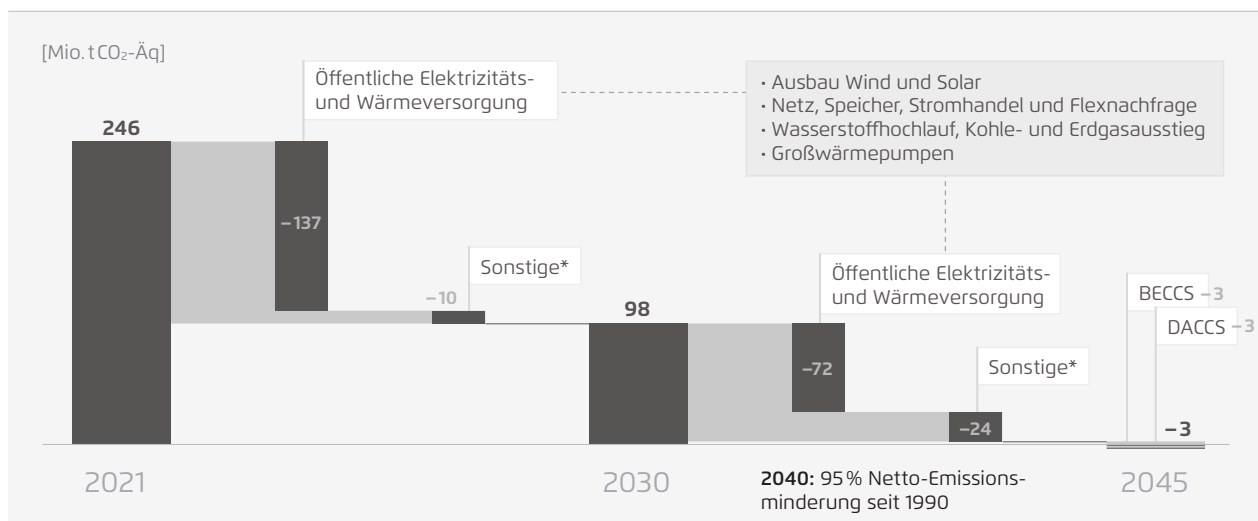
5 Ergebnisse für die Sektoren

5.1 Energiewirtschaft

5.1.1 Übersicht

Energiewirtschaftssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. 5



Agora Energiewende und Prognos (2024). * Mineralölraffinerien (CRF 1.A.1.b), Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger (CRF 1.A.1.c), diffuse Emissionen (1.B), Pipelinetransporte (1.A.3.e); BECCS = Bioenergy with Carbon Capture and Storage; DACCS = Direct Air Carbon Capture and Storage

Energiewirtschaftssektor – Trends und Instrumente

Elektrifizierung und Ausbau Erneuerbarer Energien (EE)

→ Steigende EE-Stromnachfrage durch Elektrifizierung in Verkehr, Industrie, Gebäudewärme und Elektrolyseure

- ⚙️ Instrumente: EEG-Reform zur Absicherung der Wirtschaftlichkeit großer EE-Projekte (Kombination von PPA und staatlichen Investitionsinstrumenten) und Dach-PV (einfach und marktintegrierend); Länder weisen Flächen aus, Kommunen genehmigen zügig

Flexibilität

→ Günstiger Strom durch regionale und zeitliche Flexibilität: Hochlauf Groß- und Heimspeicher, flexibel verbrauchende E-Pkw, Wärmepumpen sowie Industrie

- ⚙️ Instrumente: Lösen von einheitlicher Strompreiszone; Phase-in dynamischer Netzentgelte und Tarifmodelle; Flex-Anreize bei Industrie-Netzentgelten; dezentraler Bestandteil in einem Kapazitätsmechanismus

Versorgungssicherheit durch CO₂-freie Kraftwerke

→ Zunächst Kohle-, dann Erdgasausstieg und Hochlauf erneuerbarer Brennstoffe (H₂ und Synfuels)

- ⚙️ Instrumente: Ende staatlicher CO₂-Zertifikatsausgabe 2039; ETS-I-Preisanstieg auf 194 Euro je Tonne im Jahr 2045; H₂-Brennstoffkostenförderung über Umlagesystem; Ausschreibungen steuerbarer Backup-Kraftwerke

Ausbau und Dekarbonisierung der Wärmenetze

→ Hochlauf der Nachfrage nach leitungsgebundener Wärme, Großwärmepumpen und Langfristwärmespeichern

- ⚙️ Instrumente: Förderung der erneuerbaren Wärmeerzeugung und Netzausbau über Verlängerung und Ausweitung der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) sowie Novellierung des KWKG; bessere Transparenz und Verbraucherschutz bei Wärmenetzen; CO₂-Preisanstieg bei Gas- und Ölheizungen

Energiewirtschaftssektor – Kernindikatoren

	2023	2030	2045
Bruttostromverbrauch [TWh]			
Gesamt	525	727	1.267
Verkehr	15	95	221
Davon ePKW ¹	7	43	98
Industrie	187	270	448
Gebäude ²	255	270	302
davon Wärmepumpen	12	41	85
Elektrolyseure [H ₂] ¹	0	16	119
Installierte Leistung [GW]			
Onshore	61	98	180
Offshore	8	26	73
Photovoltaik	82	215	469
Großspeicher ³	7	30	102
Regelbare Erzeugung ⁴	83	65	72
Nettostromerzeugung [TWh]			
Gesamt	489	709	1.241
Windkraft und Photovoltaik ⁵	199	486	1.066
Regelbare Erzeugung ⁵	284	211	115
davon Kohlen	116	7	0
davon Erdgas	75	124	0
davon Wasserstoff und Synfuels	0	0	71
Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch [%]	52	77	100
Stromhandel mit Ausland [TWh]			
Importsaldo	12	9	21
Exporte	59	90	91
Importe	70	98	112
Nah- und Fernwärmeerzeugung [TWh]			
Gesamt	119	141	169
davon erneuerbare Energien und Abwärme [%]	18	38	97
Emissionen			
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq] ⁶	205	98	-3,3 (2,4)
KSG-Ziel ⁷	n/a	108	n/a

Prognos. ¹Weitgehend flexibel. ²Einschließlich landwirtschaftlicher Energieverbrauch. ³inklusive Pumpspeicher und Vehicle-to-Grid, exklusive Heimspeicher. ⁴Brennstoffbasierte Kraftwerke (Kohle, Erdgas, H₂, Synfuels, Abfall, Bioenergie, Sonstige) und Laufwasserkraftwerke. ⁵Differenz zu Gesamterzeugung: Ausspeicherung aus Großspeichern. ⁶Werte in Klammern ohne CCS und Negativemissionen. ⁷Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6).

5.1.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage

Der Sektor Energiewirtschaft umfasst die Herstellung von Strom und leitungsgebundener Wärme sowie Gasversorgung, Mineralölraffinerien und die Herstellung von Kohleprodukten wie Koks und Briketts. Auf dem Weg zur Klimaneutralität wird die Bedeutung von Strom und leitungsgebundener Wärme stark zunehmen, während Erdgasversorgung und Mineralölverarbeitung sowie die Herstellung von Kohleprodukten schrittweise zum Erliegen kommen. Im Gegenzug kommen Wasserstoff und strombasierte Energieträger zum Einsatz. Dies reduziert die Importabhängigkeit Deutschlands erheblich.

Mit 257 von 746 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten (Mio. t CO₂-Äq) entfielen mehr als ein Drittel der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen 2022 auf den Energiesektor. Vor allem durch klimapolitische Maßnahmen auf EU- und nationaler Ebene sind die Emissionen im Energiebereich seit 2014 um rund 40 Prozent gesunken. Hauptgrund hierfür war der Ausbau Erneuerbarer Energien – diese erreichten 2023 einen Anteil von 52 Prozent an der Stromerzeugung.

Chancen, Herausforderungen und Handlungsansätze

Auf dem Weg zur Klimaneutralität wird die Bedeutung von Strom und leitungsgebundener Wärme stark zunehmen. Ebenso gewinnen Technologien zur Gewinnung, zum Transport und zur Speicherung von Wasserstoff an Bedeutung. Hingegen kommen der Verbrauch von Erdgas, die Mineralölverarbeitung sowie die Herstellung von Kohleprodukten schrittweise zum Erliegen. Im Gegenzug erhöht sich die Nutzung heimischer Energiequellen von derzeit etwa 3500 TWh im Jahr (33 Prozent des Primärenergieaufkommens) auf 6.400 TWh (80 Prozent des Primärenergieaufkommens). Die Abhängigkeit von Energieimporten fällt dementsprechend von etwa 7.000 TWh 2023 auf 1600 TWh im Jahr 2045 (20 Prozent des Primärenergieaufkommens).

Diese Entwicklung birgt Chancen sowohl bezüglich einer höheren inländischen und europäischen Wertschöpfungstiefe als auch einer kostengünstigeren Stromversorgung für alle Verbraucher. Dies gelingt, wenn das Angebot an von Wind- und Solarstrom und die durch die stark zunehmende Elektrifizierung in Industrie, Verkehr und Gebäuden steigende Nachfrage nach Strom sich im Gleichschritt entwickeln. Die Elektrifizierung erfolgt dabei flexibel unter weitgehender Ausnutzung des Potenzials von Batteriespeichern und eines starken europäischen Stromnetzes. In so einem flexiblen Stromsystem kommen Wasserstoffkraftwerke selten zum Einsatz und die durchschnittlichen Kosten der Stromproduktion sinken. Inklusiv Netznutzung betragen sie durchschnittlich 16 ct₂₀₂₂/kWh im Jahr 2025, im Jahr 2045 nur noch 13 ct₂₀₂₂/kWh. Die in Wasserstoff und Synfuels gespeicherte Energie garantiert die Versorgungssicherheit mit Strom und leitungsgebundener Wärme, wenn Strom aus Erneuerbaren Energien mehrere Tage lang nicht ausreichend direkt verfügbar ist.

Voraussetzung dafür ist der Ausbau der nötigen Infrastrukturen: des Übertragungsnetzes (plus etwa 26 Tausend Trassenkilometer), des Verteilnetzes (plus etwa 309 Tausend Netzstationen), des Wärmenetzes (plus etwa 2,4 Millionen Anschlussstellen) sowie des Wasserstoffnetzes (zunächst etwa zehntausend km Kernnetz und Importkorridore). Eine Erhöhung der Übertragungsleistungen zu den Nachbarmärkten (plus 23 GW) optimiert die gemeinsame Nutzung von Backup-Kraftwerken und macht Strom aus erneuerbaren Energiequellen zur Speicherung und für den flexiblen Verbrauch über Landesgrenzen hinweg günstig verfügbar.

Die **zentralen Handlungsansätze** in der Energiewirtschaft sind (1) die Elektrifizierung der Nachfragesektoren, (2) der Ausbau Erneuerbarer Energien und deren Integration ins europäische Stromnetz, sodass Netzstabilität und Versorgungssicherheit gewährleistet bleiben, sowie (3) der Ausbau und die Dekarbonisierung von Wärmenetzen bei gleichzeitigem Erdgasausstieg.

5.1.3 Szenariopfade

Die Treibhausgasemissionen sinken bis 2030 auf 98 Millionen Tonnen CO₂-Äq und liegen damit im Vergleich zu 2020 um 58 Prozent niedriger und bezogen auf 1990 sogar um 79 Prozent. Diese Treibhausgasreduktion wird maßgeblich durch die Beendigung der Kohleverstromung erreicht.

In den 2030er-Jahren ist es das Ziel, den steigenden Strombedarf mit Erneuerbaren Energien zu decken und gleichzeitig die fossile Stromerzeugung zu verdrängen. Die dargebotsabhängige Stromerzeugung aus Wind-, Sonnen- und Wasserkraft erhöht sich von 2030 bis 2040 von 506 auf 973 TWh. Der Anteil von Wasserstoff an der Stromerzeugung steigt bis 2040 auf 5 Prozent und ergänzt Biomasse als regelbare erneuerbare Energiequelle (2 Prozent). So fällt die Nutzung von Erdgas von 18 Prozent (2030) auf 3 Prozent (2040). Zwischen 2040 bis 2045 erfolgt der vollständige Umstieg von Erdgas auf Wasserstoff und zum geringen Anteil auf flüssige synthetische Energieträger.

Auch die leitungsgebundene Wärmeerzeugung erfolgt 2045 weitgehend klimaneutral. Drei Viertel entfallen auf Erneuerbare Energien und Abwärme. Ein Fünftel wird durch mit Wasserstoff betriebene Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Anlagen erzeugt, die letzten fünf Prozent durch Spitzenkessel mit synthetischem Heizöl sowie durch Abfall fossilen Ursprungs. Die Müllverbrennungsanlagen sind zum größten Teil mit CCS (*Carbon Capture and Storage*) ausgestattet.

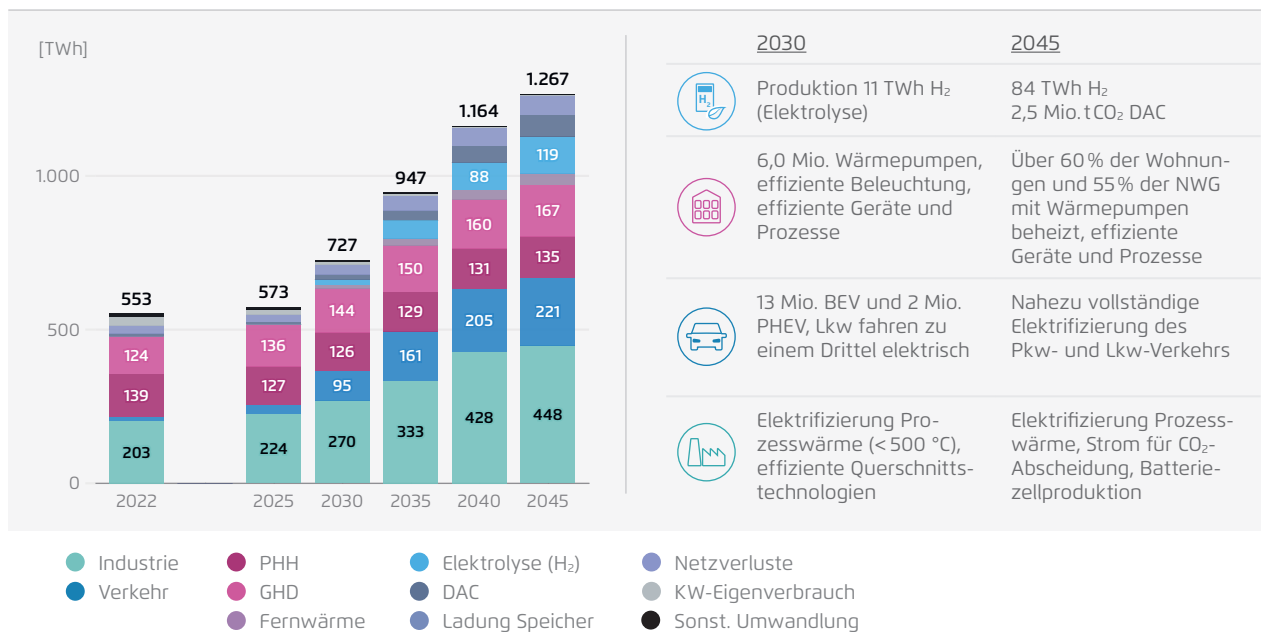
Elektrifizierung der Nachfragesektoren

Der Stromverbrauch lag in Deutschland in den Jahren vor der Pandemie recht stabil bei 600 TWh. In den vergangenen vier Jahren ist er aufgrund von konjunkturellen Effekten und Effizienzmaßnahmen um rund 50 TWh gesunken. Zukünftig wird Strom für die Dekarbonisierung der Nachfragesektoren eine bedeutende Rolle spielen, sodass der Stromverbrauch langfristig insgesamt stark ansteigen wird.

Insbesondere im Verkehrssektor steigt der Verbrauch im Szenario deutlich an. Durch die schnelle

Stromnachfrage nach Sektoren

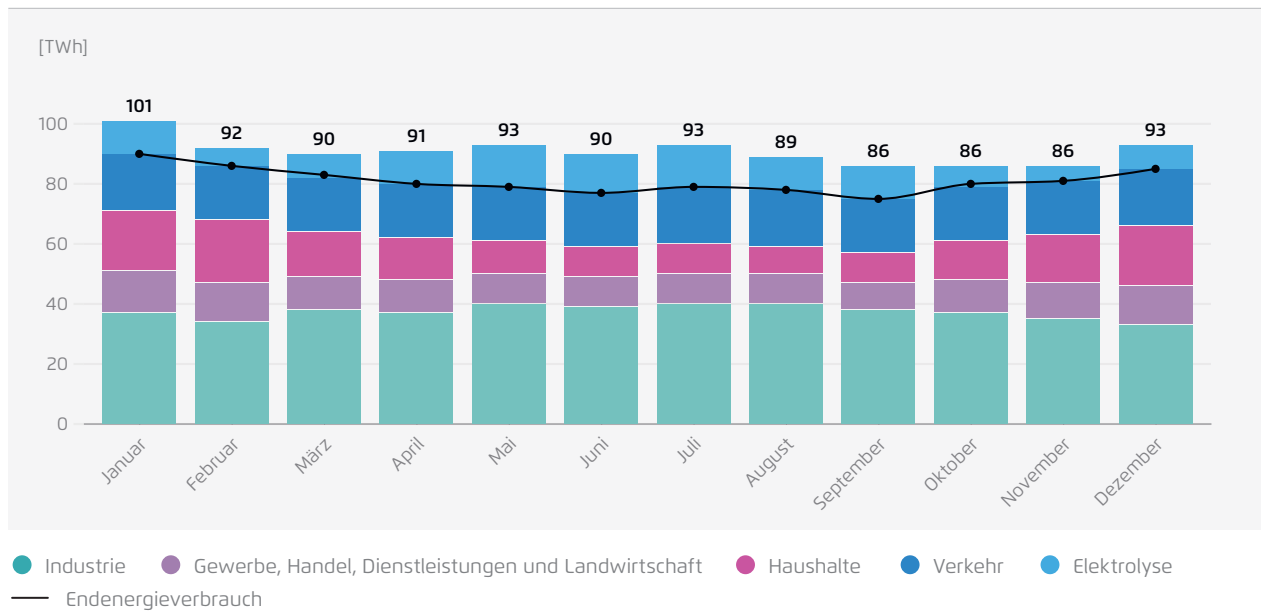
→ Abb. 6



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). H₂ = Wasserstoff; KW = Kraftwerk; DAC = Direct Air Capture; PHH = Private Haushalte; GHD = Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (einschließlich Landwirtschaft); NWG = Nichtwohngebäude; BEV = batterieelektrische Fahrzeuge; PHEV = Plugin-Hybride; Verbrauch von Speichern (brutto) beinhaltet Pumpspeicher und stationäre Batteriespeicher in der öffentlichen Versorgung. Der Stromverbrauch von Heimbatterien in Kombination mit einem PV-System wird hier nicht berücksichtigt.

Monatlicher Stromverbrauch nach Endverbrauchssektor, 2045

→ Abb. 7



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut (2024)

Elektrifizierung des Pkw- und Lkw-Verkehrs löst der Straßenverkehr den Schienenverkehr bereits kurzfristig als wichtigsten Stromnachfrager des Verkehrssektors ab. Bis 2045 steigt die Stromnachfrage des Verkehrssektors auf 221 TWh an.

Die flexible Stromnachfrage steigt mit der zügigen Elektrifizierung des Pkw-Verkehrs sowie der leichten Nutzfahrzeuge auf rund 50 TWh im Jahr 2030 und auf rund 115 TWh im Jahr 2045. Die Stromnachfrage des schweren Lkw-Verkehrs steigt bis 2030 auf knapp 25 TWh und bis 2045 auf über 80 TWh. Sie gilt im Szenario als unflexibel, da Ladevorgänge im öffentlichen Raum üblicherweise zeitlich optimiert werden und das Transportmanagement keine geringeren Ladegeschwindigkeiten erlaubt.

In der Industrie nimmt der Strombedarf absolut betrachtet sogar noch stärker zu als im Verkehrssektor. Bis 2030 steigt der Verbrauch im Szenario von heute rund 200 TWh um rund ein Drittel auf rund 270 TWh. Bis 2045 erreicht er knapp 450 TWh. Wesentlicher Treiber für den höheren Strombedarf ist die Umstellung von brennstoffbasierten Prozessen auf Strom, beispielsweise erfolgt die elektrische Dampferzeugung durch große Wärmepumpen und Elektrokessel sowie elektrisch betriebene Steamcracker.

Bei der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) setzt sich der langjährige Trend fort, und der Stromverbrauch verschiebt sich weiterhin von Endgeräten hin zu Rechenzentren. Besonders rechenintensive Anwendungen, wie zum Beispiel das Training von neuronalen Netzen, können an anderen Standorten, etwa in Nordeuropa oder in Nordamerika wirtschaftlicher erfolgen als in Deutschland. Daher fällt der Anstieg des Stromverbrauchs in Deutschland im IKT-Bereich unter Berücksichtigung von weiterhin starken Effizienzgewinnen nur moderat aus.

Im Gebäudesektor, der die privaten Haushalte sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) umfasst, steigt der Stromverbrauch bis 2045 trotz weitgehender Elektrifizierung der Wärmeerzeugung nur leicht auf rund 300 TWh an⁷ – der vergleichsweise geringe Anstieg ist auf Energieeffizienzmaßnahmen bei Elektrogeräten, gewerblichen Motoren, Anlagentechnik und Beleuchtung sowie den Ersatz konventioneller Elektroheizungen und Warmwasserbereiter zurückzuführen.

⁷ Die Abweichung von rund 20 TWh zum in Kapitel 5.3.4 angegebenen Stromverbrauch ergibt sich aus unterschiedlichen sektoralen Abgrenzungen. Die dort angegebenen rund 280 TWh enthalten nicht den Energieverbrauch der Landwirtschaft.

Der Strombedarf steigt nicht nur in den klassischen Nachfragesektoren, sondern auch im Umwandlungssektor durch den Einsatz von Batteriespeichern und Elektrolyseuren sowie die Elektrifizierung der leistungsgebundenen Wärmeversorgung. Im Jahr 2030 werden 16 TWh Strom von Elektrolyseuren mit einer Leistung von 6 GW zur Wasserstoffproduktion eingesetzt. Bis zum Jahr 2045 steigt die Leistung der Elektrolyseure auf 33 GW mit einem Strombedarf von 119 TWh.

Batteriespeicher und Pumpspeicherkraftwerke speichern im Jahr 2030 brutto 15 TWh Stunden Strom ein, bis zum Jahr 2045 steigt dieser Wert auf 69 TWh. Ihr eigener Stromverbrauch, also die Speicherverluste, die nicht wieder ins Netz zurückgespeist werden, beträgt 10 TWh.

Durch die Elektrifizierung der Wärmenetze mit Wärmepumpen und Elektrokesseln steigt die Stromnachfrage in diesem Bereich von nahezu 0 auf 11 TWh im Jahr 2030 und erreicht im Jahr 2045 37 TWh. Durch die Nutzung von Wärmespeichern und die Möglichkeit, brennstoffbasierte Wärmeerzeuger zu nutzen, kann sich die Stromnachfrage flexibel der Situation am Strommarkt anpassen.

Der Endenergieverbrauch ist im Winter deutlich höher als im Sommer, was durch den erhöhten Stromverbrauch von Elektrolyseuren im Sommer ausgeglichen wird. Diese Saisonalität entsteht in erster Linie aufgrund der Stromnachfrage von (Groß-) Wärmepumpen für die Gebäudewärme in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

Strompreise

Aus den im Szenario vorgenommenen Modellierungen wurden Endkundenpreise für Strom berechnet. Die beiden größten Preistreiber sind hierbei die Beschaffungskosten (Großhandelspreis und Vertrieb) sowie die Netzentgelte. Die Beschaffungskosten sind vor allem abhängig von den Großhandelspreisen – diese werden zunächst vor allem von den Preisen für Erdgas und CO₂ sowie ab 2035 von den Preisen für Wasserstoff und dem Marktdesign beeinflusst. Obwohl die Gesamtsystemkosten je Kilowattstunde konstant bleiben, entwickeln sich je nach Abnahmefall die Endkundenstrompreise unterschiedlich. Die Preise für private Haushalte und Gewerbebetriebe steigen durch die wachsenden Netzkosten bis 2030 deutlich und sinken danach aufgrund des weiteren Ausbaus Erneuerbarer Energien und eines sinkenden Großhandelspreises. Der Strompreis für Wärmepumpen⁸ bleibt dabei zwischen

⁸ Der Strompreis für Wärmepumpen berücksichtigt die überdurchschnittlich hohen Beschaffungskosten durch das winterlastige Verbrauchsprofil mit entsprechend höheren Großhandelspreisen. Preis senkend, im Vergleich zum normalen Haushaltsstrompreis, wirkt sich der seit 2023 geltende Erlass der KWKG- sowie der Offshore-Umlage aus. Zudem erhalten Wärmepumpen als steuerbare Lasten ermäßigte Netzentgelte. Heute liegen die Netzkosten für Wärmepumpen damit etwa 60 Prozent niedriger als für normalen Haushaltsstrom. Hier wurde die Annahme getroffen, dass diese Ermäßigung bis 2045 fortgeführt wird, aber nach 2030 auf 40 Prozent abschmilzt.

Endkundenpreise für Strom

→ Tabelle 5

Abnahmefall		2025	2030	2035	2040	2045
Haushalte	ct ₂₀₂₃ /kWh	35	39	36	36	34
Haushalte, Wärmepumpen	ct ₂₀₂₃ /kWh	24	25	27	28	27
GHD, Einzelhandel	ct ₂₀₂₃ /kWh	24	26	24	24	22
Industrie, nicht energieintensiv, Hochspannungsebene	ct ₂₀₂₃ /kWh	14	14	13	13	11
Industrie, energieintensiv, Hochspannungsebene, ermäßigte Netzentgelte nach § 19	ct ₂₀₂₃ /kWh	11	11	10	10	8
Industrie, energieintensiv, Hochspannungsebene, ermäßigte Netzentgelte nach § 19, mit Strompreiskompensation	ct ₂₀₂₃ /kWh	8	8	7	6	5

Berechnungen Prognos, für Statistik: BDEW (2024).

20 und 30 Prozent unterhalb des Preises für Haushalte. Der Strompreis für nicht energieintensive Industriebetriebe bleibt bis 2030 in etwa auf dem aktuellen Niveau von rund 14 ct₂₀₂₃/kWh und sinkt bis 2045 auf 11 ct₂₀₂₃/kWh.

Die Berechnung der Strompreise im Szenario erfolgt differenziert für verschiedene Abnahmefälle und beinhaltet alle Preisbestandteile: Beschaffungskosten, Netzentgelte, bestehende Umlagen (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG), Offshore, §-19-Umlage), Konzessionsabgaben sowie Strom- und Mehrwertsteuer (nur für den Haushaltsstrompreis relevant). Ab 2035 sind die als Instrument zur Versorgungssicherheit dienenden Subventionen für die Betrieb der Wasserstoffkraftwerke durch eine neue Umlage gedeckt. Die Umlage zahlen alle an das Netz angeschlossenen Abnehmerinnen und Abnehmer mit Ausnahme der energieintensiven Industrie.

Die notwendigen Investitionen in den Ausbau der Stromnetze wurden mit rund 520 Milliarden Euro₂₀₂₃ angesetzt. Elektrolyseure, Speicher und Eigenverbrauch bleiben von den Netzkosten befreit; auf die

übrigen Verbraucher werden die Netzkosten umgelegt. Die Ermäßigungen für steuerbare Verbraucher gemäß § 14a EnWG bleiben bis 2030 erhalten und werden danach auf 50 Prozent abgeschmolzen. Der Stromsteuersatz bleibt im Szenario nominal konstant und die Konzessionsabgabe real konstant. Der Mehrwertsteuersatz beträgt 19 Prozent. Bezüglich der bisher bis 2030 feststehenden Strompreiskompensation für besonders energie- und außenhandelsexponierte Betriebe wird angenommen, dass diese bis 2045 weitergeführt wird.

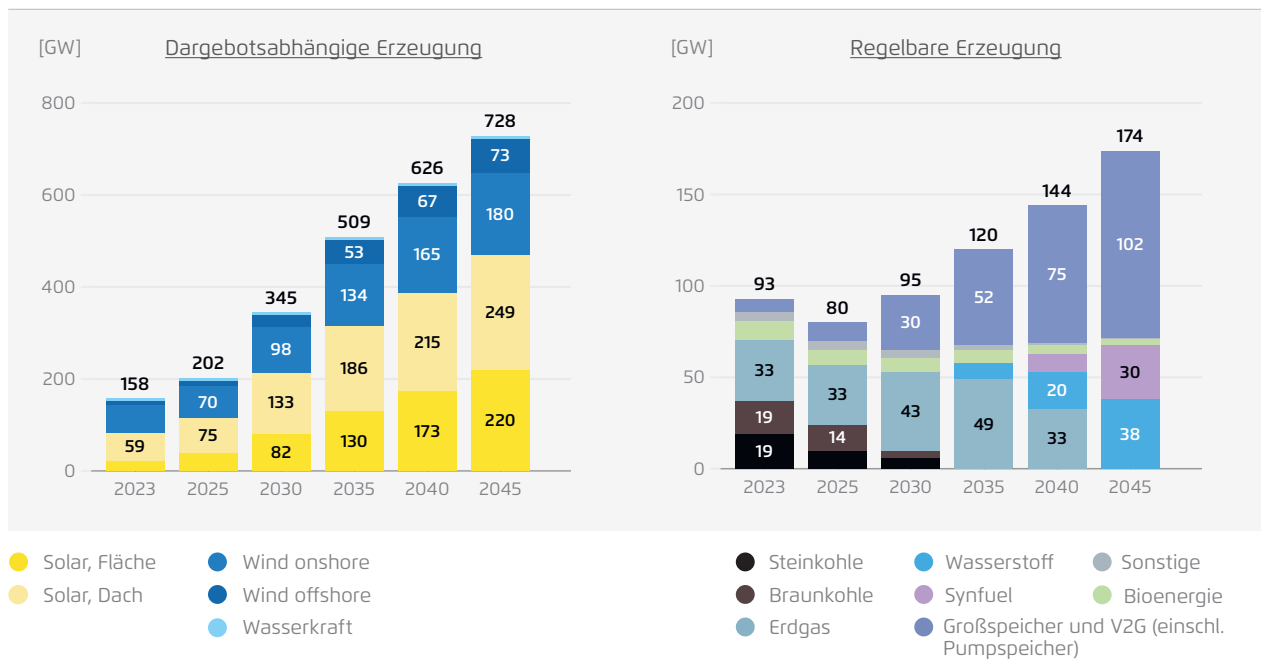
Ausbau Erneuerbarer Energien und deren Integration ins europäische Stromnetz

Kraftwerksleistung und Kapazität für den grenzüberschreitenden Stromaustausch

Bis 2030 nimmt die Leistung von Wind- und Solaranlagen stark zu. Kohlekraftwerke werden sukzessive durch steigende Kosten für CO₂-Zertifikate aus dem Markt gedrängt, Batteriespeicher und Gaskraftwerke in den europäischen Strommarkt integriert. Die installierte Leistung von Windkraft

Leistungsentwicklung des Kraftwerksparks, 2023–2045

→ Abb. 8



Agora Energiewende (2024) basierend auf: linke Seite: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (2024); rechte Seite: Bundesnetzagentur (2024)

an Land steigt auf knapp 100 GW. Die Leistung der Windenergieanlagen in der Nord- und Ostsee steigt von heute rund 10 GW auf 26 GW. Bei der Photovoltaik ist Deutschland auf einem Ausbaukurs in Richtung 215 GW bis 2030.

In den 15 Jahren von **2030 bis 2045** erfolgt durch den weiteren Ausbau der Wind- und Solarenergie eine Verdopplung der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien auf über 1.100 TWh. Gaskraftwerke und Synfuel-Kraftwerke sichern mit H₂-basierten Brennstoffen die Versorgung ab.

Der Bruttozubau von **Windkraftanlagen an Land** beträgt zwischen 2026 und 2030 rund 34 GW, also 7 GW pro Jahr. Im gleichen Zeitraum werden Anlagen mit einer Leistung von 6 GW stillgelegt. In den 30er-Jahren werden im Mittel jährlich 8 bis 9 GW pro Jahr zugebaut und rund 2 GW jährlich stillgelegt. Ab 2040 verlangsamt sich der Zubau auf 6 GW pro Jahr bei einem gleichzeitigen Anstieg der altersbedingten Stilllegungen auf 3 GW jährlich.

Im Jahr 2024 neu genehmigte Windkraftanlagen haben im Vergleich zur Vergangenheit größere Nennleistungen (binnen zehn Jahren haben sich diese auf im Mittel 5,6 MW verdoppelt). Ebenfalls weisen sie größere Rotoren und höhere Nabenhöhen auf

(zwischen 140 und 180 Metern). Daraus ergeben sich höhere Volllaststunden als bei älteren Anlagen.

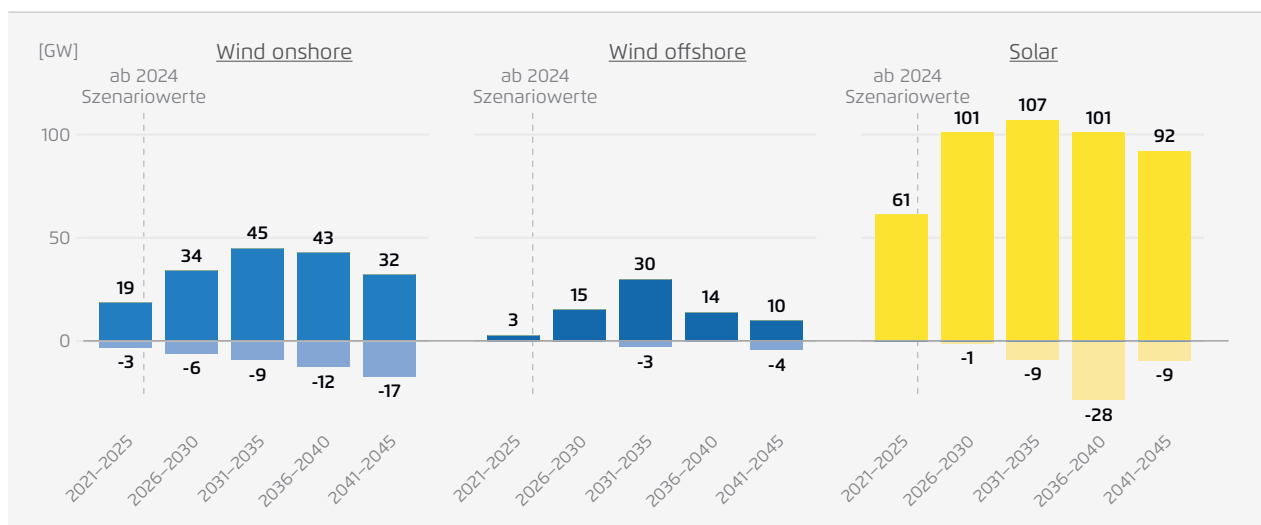
Im Mittel haben ab 2025 in Betrieb gehende Anlagen etwa 2.500 Volllaststunden. Damit steigen die mittleren Volllaststunden des Anlagenparks von heute 1.700 bis 1.800 auf 2.250 bis 2030 und auf 2.475 bis 2045 (inklusive netzbedingte, aber ohne systembedingte Abregelungen⁹).

Durch die Tendenz zu größeren Anlagen und den Rückbau von kleineren Altanlagen steigt die Anzahl der Windkraftanlagen an Land bis 2045 nur leicht, von heute rund 29.000 auf rund 30.500 Anlagen. Infolge der größeren und höheren Turbinen steigen aber die notwendigen Flächen und die Sichtbarkeit der Windenergie. Die geographische Verteilung der Anlagen orientiert sich an den Flächenbeiträgen der Bundesländer laut Windenergieflächenbedarfsgesetz.

⁹ Netzbedingte Abregelungen treten auf, wenn potenzielle Verbraucher nicht mit der zur Verfügung stehenden Netzkapazität erreichbar sind. Systembedingte Abregelungen treten auf, wenn systemweit keine Verbraucher für eine produzierbare Strommenge gefunden werden.

Zu- und Rückbau der Erneuerbaren Energien

→ Abb. 9



Agora Energiewende und Prognos (2024), historische Daten bis inklusive 2023: AGEE-Stat (2024), BWE (2022–2024)

Bei **Offshore-Wind** steigt aufgrund der langen Vorlaufzeit und den erst seit 2022 angestiegenen Planungen und Ausschreibungen erst Ende der 2020er-Jahre die Ausbaudynamik. Im Zeitraum 2026 bis 2030 wächst der Anlagenpark um rund 15 GW. Zwischen 2031 und 2035 erhöht sich der Bruttoausbau hingegen auf 30 GW, auch weil nach 2030 der altersbedingte Rückbau der ersten 3-GW-Offshore-Anlagen erfolgt.

Der Bruttoausbau der **Solarenergie** erfolgt bis 2045 relativ gleichmäßig mit einem Zubau von rund 20 GW pro Jahr. Ab 2030 verlangsamen altersbedingte Stilllegungen den Nettozuwachs. Der Anteil der Freiflächenanlagen erhöht sich von heute 28 Prozent auf 38 Prozent bis 2030 und auf fast 50 Prozent bis 2045.

Die **Wasserkraftnutzung** bleibt mit etwa 6 GW Leistung und 20 TWh jährlicher Stromerzeugung langfristig konstant.

Batteriespeicher inklusive *Vehicle to Grid* ergänzen die konstant bleibende Leistung von Pumpspeichern. Die Leistung von Großbatteriespeichern verzehnfacht sich zwischen 2025 und 2045 auf 102 GW. Photovoltaik-Heimspeicher ergänzen diese Großspeicher, sodass die Stromspeicher insgesamt ein Vielfaches dieser Kapazität aufweisen.

Kohlekraftwerke scheiden zwischen 2025 und 2035 sukzessive aus dem Markt, teilweise bestehen sie vorübergehend in einer Reserve fort und werden dann vom Netz genommen. Teilweise geschieht dies als Umrüstung von Kohle auf Gas. Bis 2035 wächst daher die Leistung von Erdgaskraftwerken von 33 GW im Jahr 2023 auf 58 GW an. Mit dem Ende der staatlichen Ausgabe von CO₂-Zertifikaten im Jahr 2039 nutzen die Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke vermehrt Wasserstoff beziehungsweise wasserstoffbasierte Kraftstoffe wie synthetisches Methanol und Fischer-Tropsch-Brennstoffe (siehe Kapitel 6.2 Wasserstoff). Bioenergie wird ab 2035 immer seltener zur Verstromung eingesetzt, die Leistung von Bioenergiekraftwerken reduziert sich von heute etwa 10 GW auf 3 GW im Jahr 2045. Die Biomasse wird vermehrt in der Kreislaufwirtschaft benötigt, im Stromsektor lohnt sich die thermische Verwertung von Anbaubiomasse nicht mehr.

Stromerzeugung, Stromimport und -export

Die Nettostromerzeugung, also die Gesamterzeugung aller Kraftwerke abzüglich ihres Eigenverbrauchs, steigt im Szenario von etwa 500 TWh im Jahr 2024 auf rund 700 TWh bis 2030 und verdoppelt sich bis 2045 im Vergleich zu heute auf rund 1.250 TWh. Bis zum Jahr 2030 steigt der Anteil der Erneuerbaren Energien auf rund 80 Prozent. Infolge des steigenden CO₂-Preises nimmt die **Kohleverstromung** stark ab und erzeugt 2030 nur noch 7 TWh.

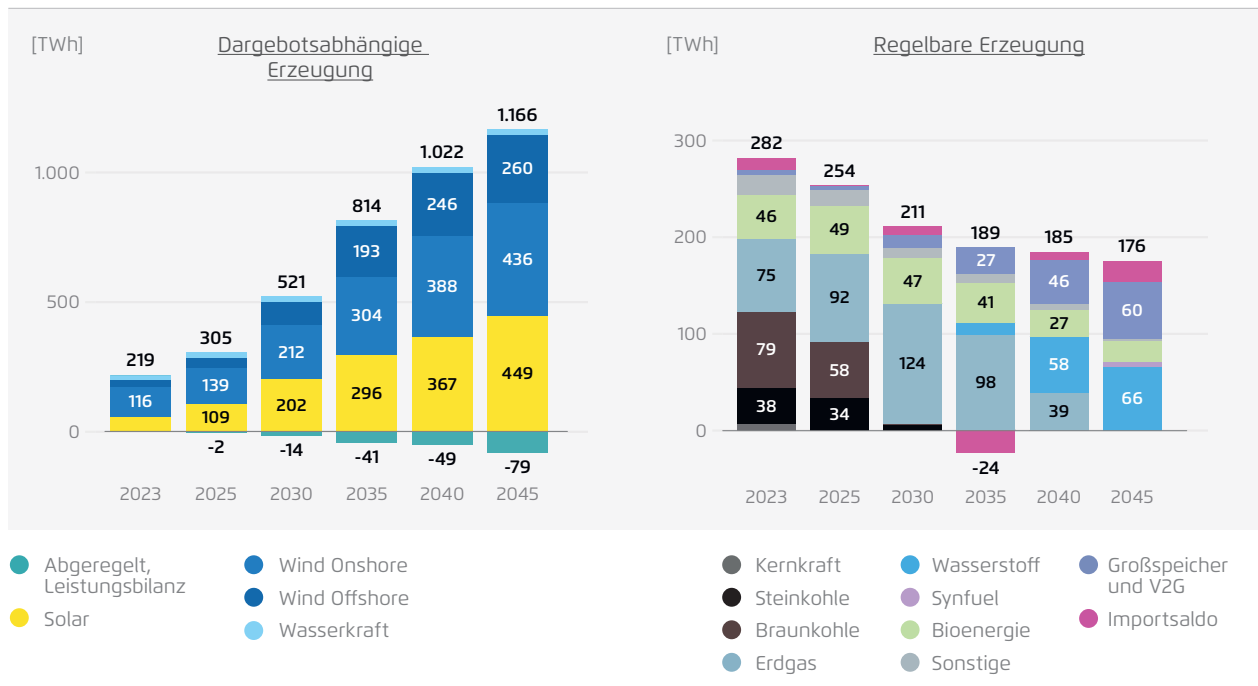
Mit **Erdgas** werden 2030 etwa 18 Prozent des Stroms erzeugt. Nach 2030 erfolgt schrittweise der Einsatz von Wasserstoff zur Stromerzeugung, und zur Abdeckung von Spitzen im kleinen Maßstab auch der Einsatz von Synfuels. Im Jahr 2045 zeichnet das Szenario, das auf einer stündlichen europäischen Modellierung beruht, ein sehr flexibles Stromsystem.

Etwa 88 Prozent der Stromerzeugung erfolgt durch die dargebotsabhängigen erneuerbaren Energiequellen **Sonne, Wind und Wasser**. Fünf Prozent der Stromerzeugung speisen Batteriespeicher und Pumpspeicherkraftwerke ins Stromnetz ein. Acht Prozent wird von regelbaren Kraftwerken erzeugt, die mit den Energieträgern Biomasse, Wasserstoff und Synfuels betrieben werden. Die Stromerzeugung aus Bioenergie bleibt bis 2035 in etwa auf dem heutigen Niveau. Danach sinkt sie durch eine flexiblere Fahrweise der Anlagen und einen Rückgang bei der Verbrennung von Holz und Biogas aus Anbaubiomasse und weniger Benutzungsstunden auf 25 TWh bis 2045.

Aus Sicht des gesamtkostenoptimierten Stromsystems beziehungsweise der Energieversorgung ist es effizient, nicht alle Erzeugungsspitzen der Erneuerbaren Energien technisch zu nutzen. Damit steigt die nicht nutzbare Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien (Spitzenkappung) trotz der steigenden Flexibilität des Gesamtsystems auf sieben Prozent bis zum Jahr 2045. Hinzu kommen im Szenario erzeugbare Strommengen, die netzengpassbedingt abgeregelt werden. Diese Strommengen werden durch lokale Preisanreize und den Netzausbau reduziert. Sie sind Teil der Modellannahmen und wurden bei der

Nettostromerzeugung und Importsaldo

→ Abb. 10



Agora Energiewende und Prognos (2024), historische Daten 2023: AGEE Stat (2024), AGEB (2023). V2G = Vehicle to Grid

Berechnung der Volllaststunden berücksichtigt. Bei Windkraft an Land betragen sie 2045 rund drei Prozent der theoretisch erreichbaren Vollbenutzungstunden ohne Netzengpässe.

Stromsystem flexibilisieren und Versorgungssicherheit garantieren

Das Stromsystem entwickelt im Szenario in zwei Richtungen ein hohes Maß an Flexibilität. In Zeiten mit **viel Wind- und Sonnenstrom** werden Stromspeicher und E-Autos geladen, (Groß-)Wärmepumpen laden Wärmespeicher, Elektrolyseure erzeugen Wasserstoff und *Power to Heat*-Anlagen erzeugen (speicherbare) Hochtemperaturwärme für die Industrie. Gleichzeitig reduzieren brennstoffbasierte Kraftwerke ihre Stromerzeugung auf ein Minimum. Auch KWK- und Bioenergieanlagen flexibilisieren im Szenario ihre heute weitgehend unflexible Fahrweise. Der Stromexport wird in diesen Zeiten erhöht.

In **kurzen Zeiten mit wenig Wind- und Sonnenstrom** decken häufig Stromspeicher die Stromnachfrage. E-Autos und zum Teil auch Wärmepumpen können

ihre Lade- beziehungsweise Betriebszeit verschieben, einige E-Autos mit geringerer Auslastung sogar um einige Tage. Der Stromimport wird zu diesen Zeiten erhöht. Diese Kurzfristflexibilität ermöglicht es, die benötigte Leistung aus regelbaren Kraftwerken zeitweise geringer zu halten. Das spart Kosten für alle Verbraucher. Bei **längeren Zeiträumen**, oft sind dies Dunkelflauten im Winter, gewährleisten Wasserstoff- und Biomasse- beziehungsweise Synfuel-basierte Kraftwerke die Stromversorgung. Sie speisen dann in der Regel auch Wärme in die Wärmenetze ein, um die Energie der Brennstoffe möglichst effizient zu nutzen. Trotz des verdoppelten Strombedarfs bleibt ihre Betriebszeit durch einen verstärkten Stromaustausch mit dem Ausland, eine flexibilisierte Stromnachfrage und Batteriespeicher relativ niedrig. Daher ist auch nur eine eher geringe Leistung von 71 GW erforderlich. 38 GW davon sind Wasserstoffkraftwerke. Weitere 30 GW sind Kraftwerke, die flüssige synthetische Energieträger einsetzen und für die Spitzenlasten und als Kapazitätsreserve genutzt werden. Der Rest der Leistung entfällt auf Biomassekraftwerke und sonstige Kraftwerke, größtenteils Müllverbrennungsanlagen.

Aufgrund der begrenzten Kapazität von Stromspeichern sinkt deren Beitrag zur Versorgungssicherheit mit der Länge von Stromknappheitssituationen. Im Jahr 2045 könnten sie binnen einer Stunde theoretisch bis zu 538 GW Strom einspeisen, an einem Tag sind es noch 24 GW und in einer Woche 3,3 GW. Auch der Flexibilitätsbeitrag von Wärmepumpen (+/- 50 GW) und Elektroautos (+/- 60 GW) ist in kürzeren Zeiträumen entscheidend zur Integration von Strom aus Erneuerbaren Energien und zur Reduktion der Brennstoffnutzung in Kraftwerken. Bei der Betrachtung einer Woche mit wenig Wind und Sonne bieten Wärmepumpen und E-Autos in Summe jedoch nur noch 2,6 GW Lastreduktionspotenzial.

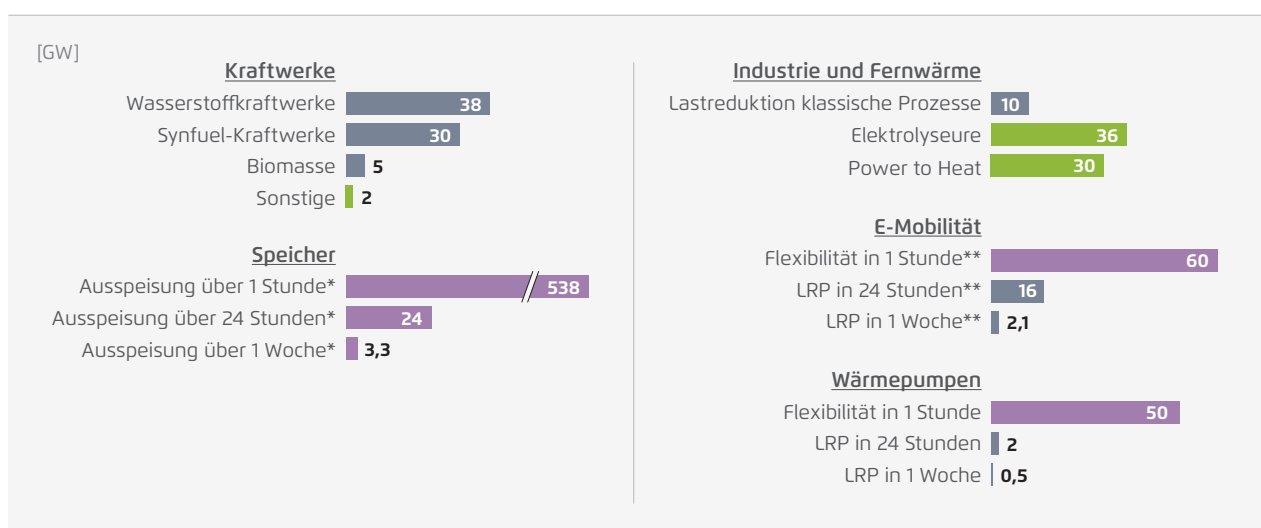
Zusätzlich wird ein Teil der Stromnachfrage durch Importe gedeckt. Dass in mehreren Ländern gleichzeitig eine Situation auftritt, in der einerseits die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien ihr Minimum erreicht und andererseits die Stromnachfrage ihr Maximum, ist extrem unwahrscheinlich. Ein Verbundsystem, das in jedem einzelnen Land für diesen Fall auf 100 Prozent Autarkie ausgelegt ist, wäre überdimensioniert

und würde höhere Kosten verursachen. Dies gilt insbesondere, da selbst in diesem nur theoretisch denkbaren Fall durch den Einsatz von industriellem *Demand Side Management* (DSM) und preis-induzierter Nachfragereduktion die Auswirkungen gering gehalten werden können.

Die Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien zeigt klare **saisonale Unterschiede**. In Deutschland ist die Stromproduktion aus Photovoltaikanlagen im Sommerhalbjahr deutlich höher als im Winterhalbjahr. Gegenläufig dazu sind die Wintermonate im Durchschnitt windiger und somit ist die Windstromerzeugung höher, jedoch kann es auch längere Perioden mit wenig Wind geben. In Summe ist die Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien im Sommerhalbjahr durch die sehr hohe installierte Leistung der Photovoltaik höher als im Winterhalbjahr. Demgegenüber ist der Stromverbrauch im Winterhalbjahr wärmenachfragebedingt höher als im Sommer. So entwickelt sich eine klare saisonale Strompreisstruktur. Die schon heute im Winter etwas höheren Strompreise bleiben auf dem heutigen Niveau, im Sommer sinken die Strompreise hingegen sehr deutlich.

Brennstoffbasierte Kraftwerke und Flexibilitäten, 2045

→ Abb. 11

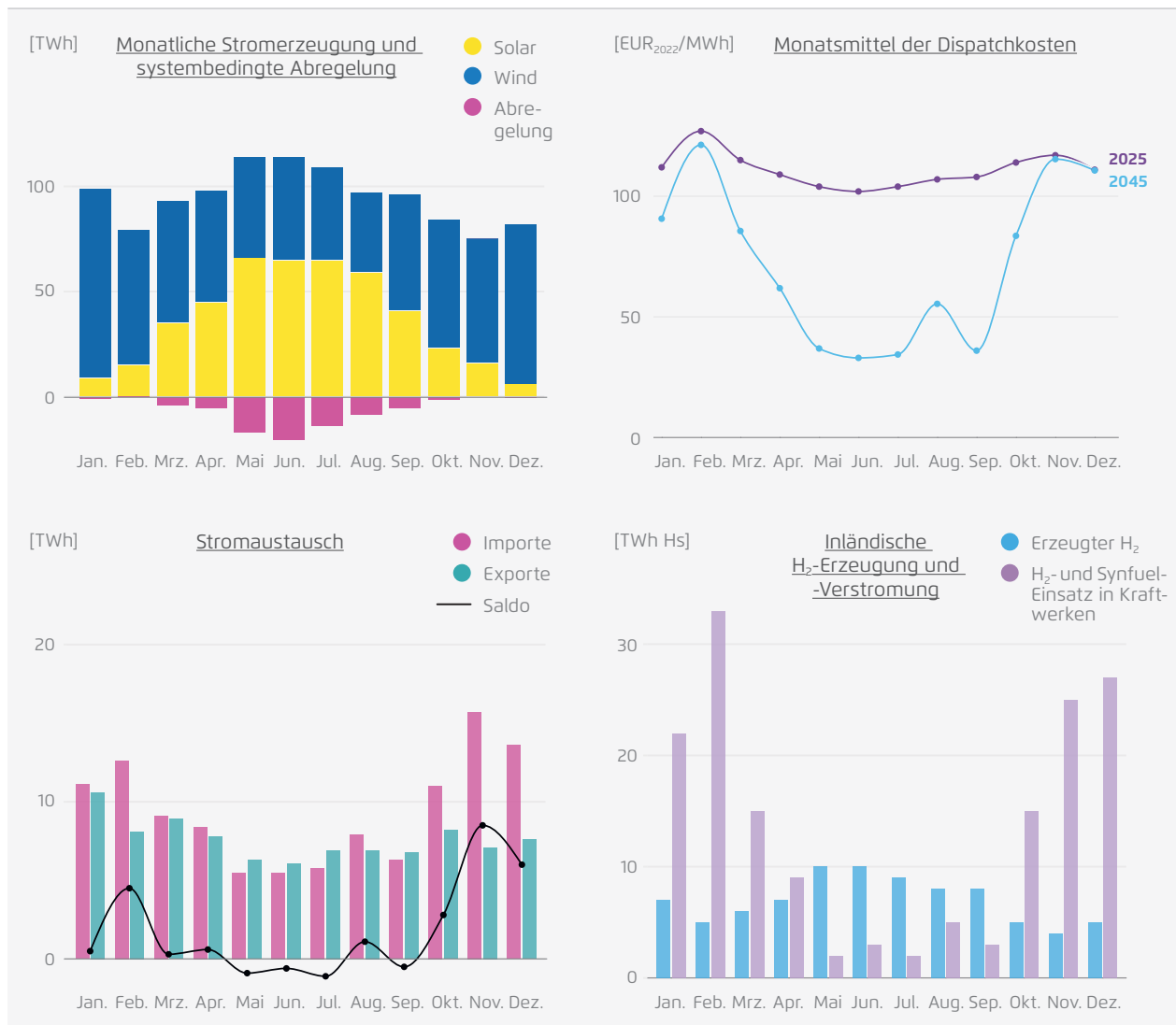


Hauptsächliche Einsatzsituation: ● Wenig Sonne und Wind ● Viel Sonne und Wind ● Beidseitig

Agora Energiewende und Prognos (2024). * Großspeicher und Heimspeicher; ** durchschnittlicher Ladestand der E-PKW nach der Woche 20 %; LRP = Lastreduktionspotenzial

Saisonale Struktur der Stromerzeugung, 2045

→ Abb. 12



Agora Energiewende und Prognos (2024). Dispatchkosten sind ein Modellwert und vergleichbar mit Strompreisen am Spotmarkt.

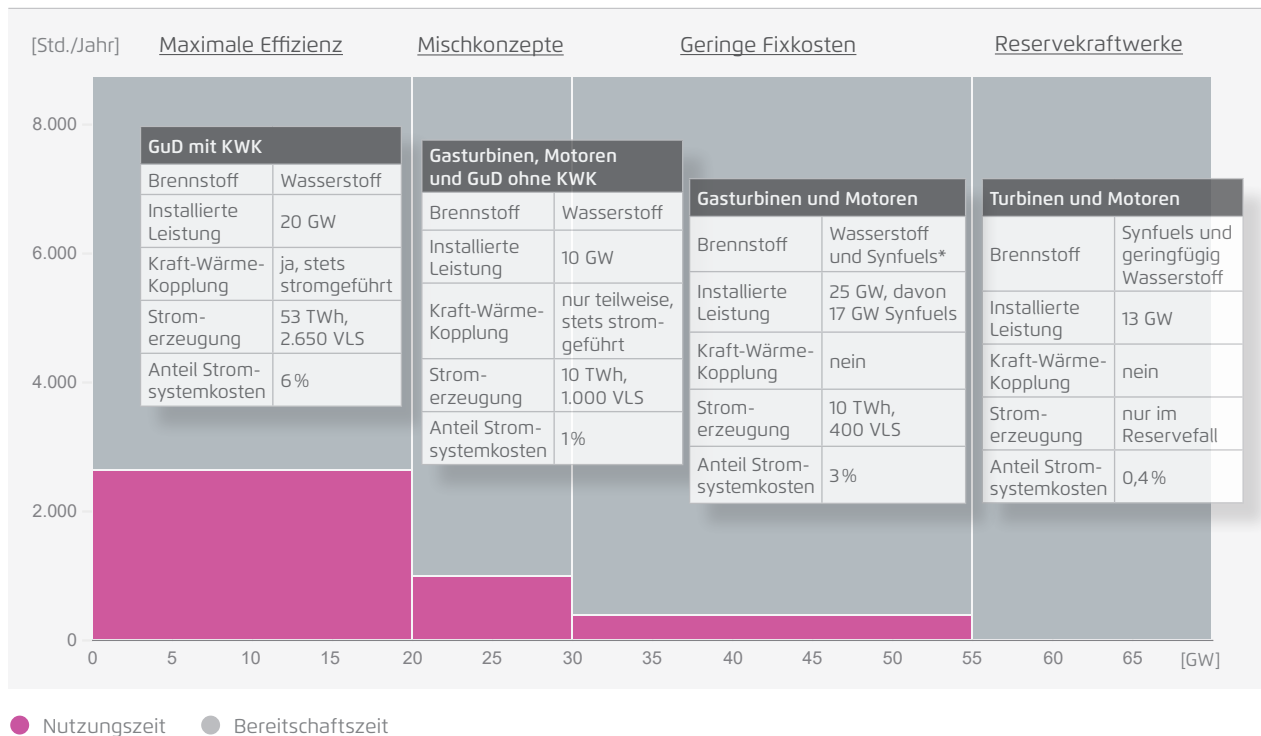
Im Jahr 2045 erfolgen 85 Prozent der Stromerzeugung von brennstoffbasierten Kraftwerken (Wasserstoff, PtL, Biomasse) im Winterhalbjahr, während im Sommerhalbjahr nur ein geringfügiger Einsatz dieser Kraftwerke notwendig ist. Im Sommer ist das Stromhandelssaldo monatlich ausgeglichen, im Winter überwiegt der Import (über das Jahr hinweg beträgt er zwei Prozent der Stromerzeugung). In Situationen mit sehr hoher Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien können Elektrolyseure und flexible bivalente *Power to Heat*-Anlagen den günstigen Strom nutzen, der sonst abgeregelt werden müsste. Diese Situationen treten besonders im Sommerhalbjahr auf,

demzufolge entfallen zwei Drittel des Stromeinsatzes für diese Anwendungen auf diesen Zeitraum. Auch die systembedingten Abregelungen von Strom aus Erneuerbaren Energien (sieben Prozent des Potenzials) treten im Sommer auf.

Das oben beschriebene Zusammenwirken verschiedener Flexibilitätsoptionen einerseits und die strukturell hohe Stromnachfrage im Winter mit einzelnen Nachfragespitzen andererseits stecken für thermische Kraftwerke ein breites Einsatzgebiet ab. Das birgt die Chance, durch einen Technologiemix den Kraftwerkspark kostenseitig zu optimieren: Über

Struktur der brennstoffbasierten Stromerzeugung

→ Abb. 13



Agora Energiewende und Prognos (2024). *Methanol oder Fischer-Tropsch-Brennstoffe; GuD = Gas- und Dampfkraftwerke; KWK = Kraft-Wärme-Kopplung; VLS = Volllaststunden

70 Prozent (53 TWh von 74 TWh) der Stromerzeugung aus Wasserstoff und wasserstoffbasierten Energieträgern erfolgen durch 20-GW Gas- und Dampfturbinen (GuD)-Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Durch die höheren Kosten von Wasserstoff gegenüber Erdgas sind effiziente, aber kostenintensive Gas- und Dampfturbinen mit Wärmeauskopplung auch bei einer geringeren Zahl an Volllaststunden als bei Erdgas noch wirtschaftlich. Weitere 10 TWh werden durch 10-GW-Kraftwerke mit durchschnittlich 1.000 Volllaststunden erzeugt. Diese Kraftwerke setzen sich aus GuD-Kraftwerken ohne KWK, Gasmotorenkraftwerken und Gasturbinenkraftwerken zusammen.

Weitere 25 GW an Spitzenlastkraftwerken produzieren mit 400 Volllaststunden weitere 10 TWh Strom. Diese Kraftwerke nutzen größtenteils flüssige synthetische Energieträger, sind teils aber auch ältere Wasserstoffkraftwerke mit niedrigem Wirkungsgrad, die vor der Verfügbarkeit von synthetischen Energieträgern errichtet wurden.

13 GW an Reservekraftwerken, die ebenfalls synthetische Energieträger nutzen, erhöhen die Versorgungssicherheit und sichern Extremsituationen ab, kommen jedoch im Regelfall nicht zum Einsatz.

Ausbau des Transport- und Verteilnetzes

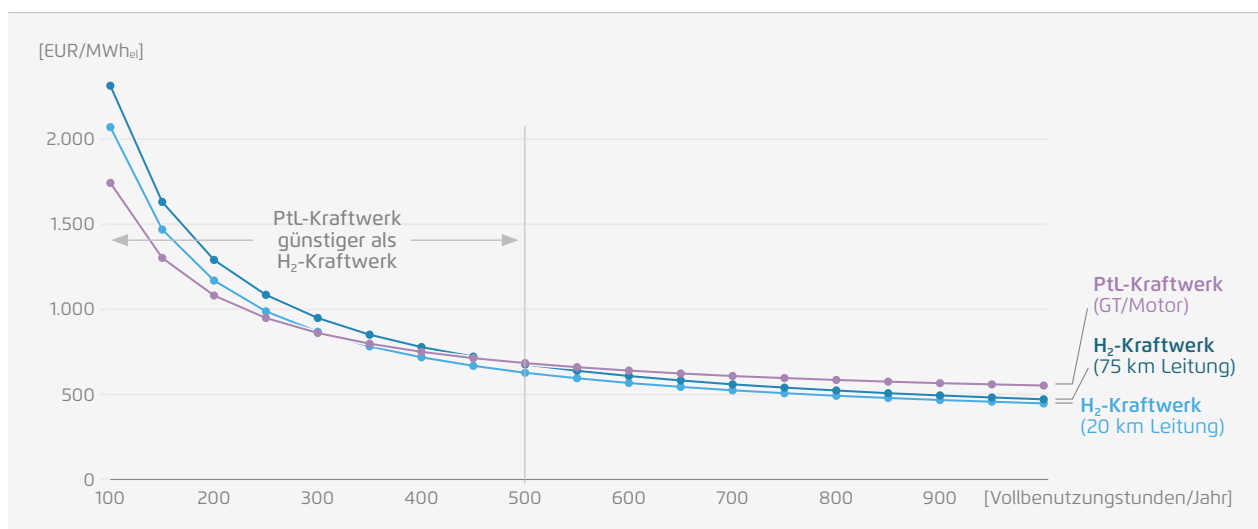
Der Netzausbau im Szenario folgt dem Netzentwicklungsplan für das Übertragungsnetz sowie den Netzausbauplänen für das Verteilnetz. Etwa 26 Tausend neue Übertragungsnetz-Trassenkilometer sowie 309 Tausend Verteilnetz-Netzstationen sind die Kernelemente dieser Planung. Auf europäischer Ebene geht die Netzentwicklung bezüglich der angenommenen Verstärkung der Grenzkuppelkapazitäten zu den Nachbarstrommärkten über den *Ten Year Network Development Plan* hinaus, insgesamt binden 49,6 GW Leitungen Deutschland in den europäischen Strombinnenmarkt ein. Das innerdeutsche Netz wurde nicht explizit modelliert, ist jedoch implizite Voraussetzung für das modellierte klimaneutrale Stromsystem.

→ Infobox 3: Strombasierte Energieträger zur Absicherung des Stromsystems

Regelbare Backup-Kraftwerke sichern das Stromsystem auch in den Zeiten ab, in denen die direkte Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien, die Nutzung von Speichern und Nachfrageflexibilität nicht ausreichen. Der überwiegende Anteil dieser Kraftwerke setzt Wasserstoff ein. Bei den Backup-Kraftwerken, die nur wenige Stunden im Jahr zum Einsatz kommen, können flüssige strombasierte Brennstoffe (*Power to Liquid*, PtL, Wasserstoffderivate) wirtschaftlicher sein. Nachfolgende Berechnung ermittelt den Bereich unterhalb von etwa 300 bis 500 Vollbenutzungsstunden pro Jahr, in dem die Vollkosten eines PtL-Kraftwerkes niedriger als die eines Wasserstoffkraftwerkes sind. In diesem Bereich werden die höheren PtL-Brennstoffkosten durch die entfallenden Kosten für Anschlussleitungen des Wasserstoffnetzes (hier 20 und 75 km), entfallende H₂-Leistungsentgelte und etwas geringere Kraftwerkskosten aufgewogen. Durch den Einsatz von PtL-Kraftwerken im Einsatzbereich unter 500 Volllaststunden pro Jahr können auch die Speicherkapazität und das Wasserstoffnetz entlastet und somit die Robustheit und Versorgungssicherheit des Energiesystems (Strom- und Wasserstoff) insgesamt erhöht werden.

Vollkosten der Stromerzeugung – H₂- und PtL-Kraftwerke

→ Abb. 14



Agora Energiewende und Prognos (2024). PtL = Power to Liquid

Ausbau und Dekarbonisierung der Wärmenetze

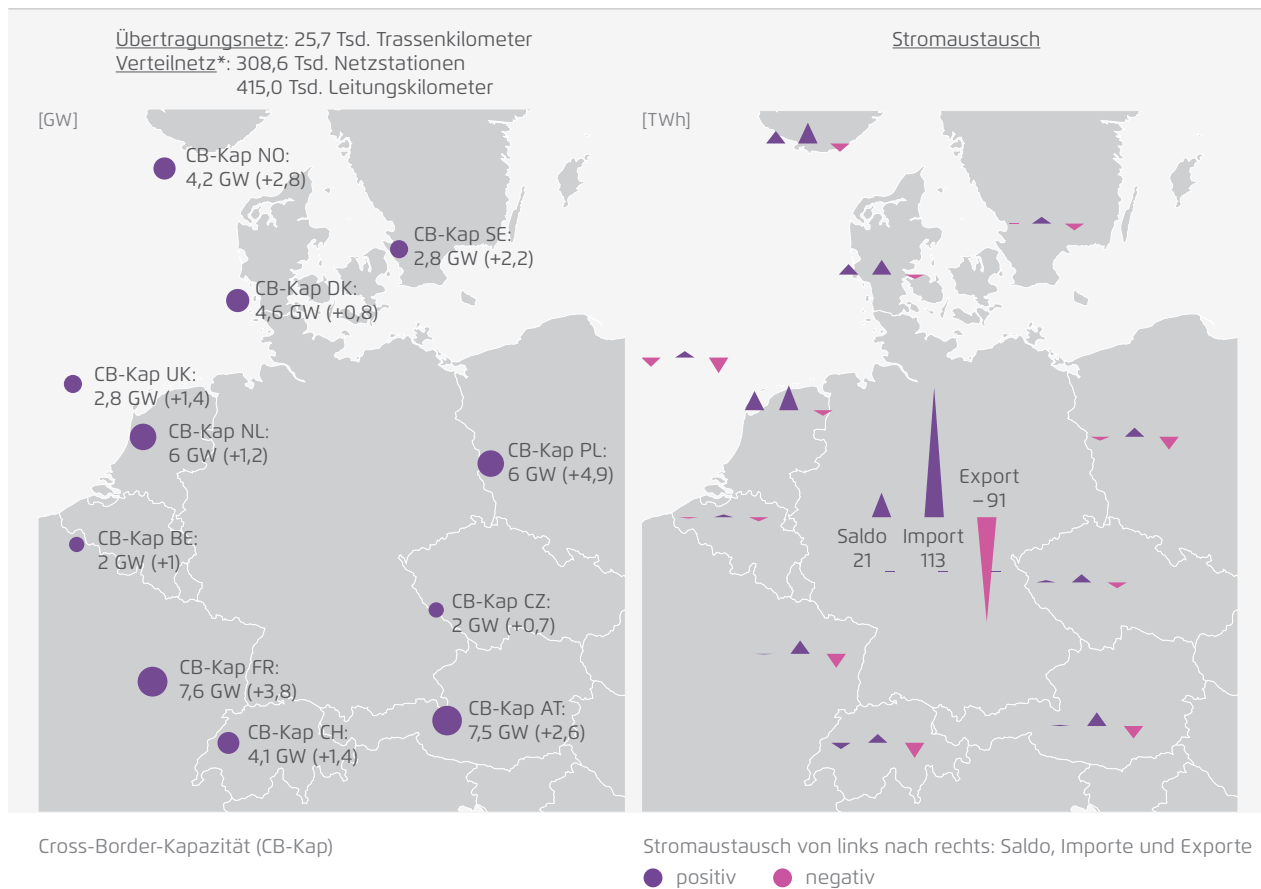
Nah- und Fernwärme liefern über ein Wärmenetz von größeren Anlagen erzeugtes heißes Wasser oder Dampf an Wohn- und Gewerbegebäude sowie Industriebetriebe. In Deutschland gibt es knapp 4.000 Wärmenetze, die rund 15 Prozent beziehungsweise 6,5 Millionen Wohnungen mit Wärme versorgen. Wärmenetze können klein sein und nur wenige Gebäude versorgen oder mehrere Hundert Kilometer Leitungen aufweisen und ganze

Großstädte versorgen. Wärmenetze sind besonders in urbanen Räumen eine gute Möglichkeit für eine klimafreundliche und künftig vollständig dekarbonisierte Wärmeversorgung.

Die Wärmenetze werden im Szenario stark ausgebaut. Die Anzahl der an Wärmenetze angeschlossenen Wohn- und Nichtwohngebäude erhöht sich von heute etwa 1,4 Millionen auf knapp 2,2 Millionen im Jahr 2030 auf rund 3,8 Millionen im Jahr 2045. Bis 2030 werden jährlich rund 90.000 Gebäude neu

Netzausbau und Entwicklung der Cross-Border-Kapazitäten, 2025–2045, und Stromaustausch, 2045

→ Abb. 15



Agora Energiewende und Prognos (2024). *Datengrundlage sind die Netzausbaupläne von 80 größeren Verteilnetzbetreibern, ihre Abdeckung bezüglich des Gesamtinvestitionsbedarfes kann nur sehr grob auf 70 % geschätzt werden, unter den 807 weiteren Verteilnetzbetreibern (Stand 12/2023) sind viele klein mit einem Fokus auf Niederspannungsnetze.

an die Wärmenetze angeschlossen. In den 2030er-Jahren erfolgt ein noch schnellerer Ausbau von rund 110.000 Neuanschlüssen pro Jahr bis 2040. Auch die Zahl der über Wärmenetze versorgten Wohnungen steigt deutlich von 6,5 Millionen auf langfristig etwa 13,8 Millionen Wohnungen. Somit steigt der Anteil an über Wärmenetze versorgten Wohnungen von aktuell rund 15 Prozent auf etwa ein Drittel im Jahr 2045.

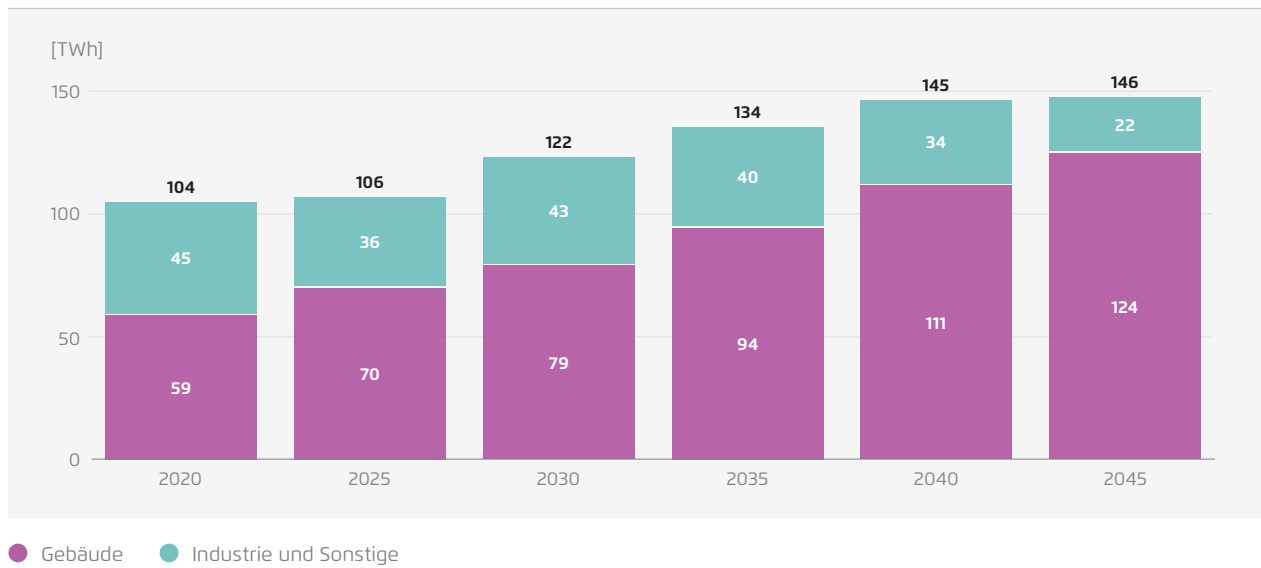
Der Ausbau der Wärmenetze erfolgt erstens durch die Verdichtung in Gebieten mit bestehenden Wärmenetzen, zweitens durch den Ausbau vorhandener Netze zum Anschluss neuer Straßen oder Stadtteile und drittens durch den Neubau von Wärmenetzen.

Mit der höheren Zahl der an Wärmenetze angeschlossenen Wohn- und Nichtwohngebäude steigt auch die Nachfrage nach Nah- und Fernwärme. Gleichzeitig dämpfen Energieeffizienzmaßnahmen (unter anderem energetische Sanierungen, effizienter Neubau) sowie der Abgang alter Bestandsgebäude den Anstieg des Verbrauchs. Im Gebäudesektor steigt die Nachfrage nach Nah- und Fernwärme von 59 TWh im Jahr 2020 auf 124 TWh im Jahr 2045.

Die Wärmelieferungen an die Industrie sinken nach 2030 durch den Rückgang der Wärmeerzeugung in Heizkraftwerken und die Umstellung von Dampfnetzen auf energieeffizientere Heißwassernetze. Der nötige Prozessdampf, der nicht mehr durch

Entwicklung und Struktur der Nachfrage nach leitungsgebundener Wärme

→ Abb. 16

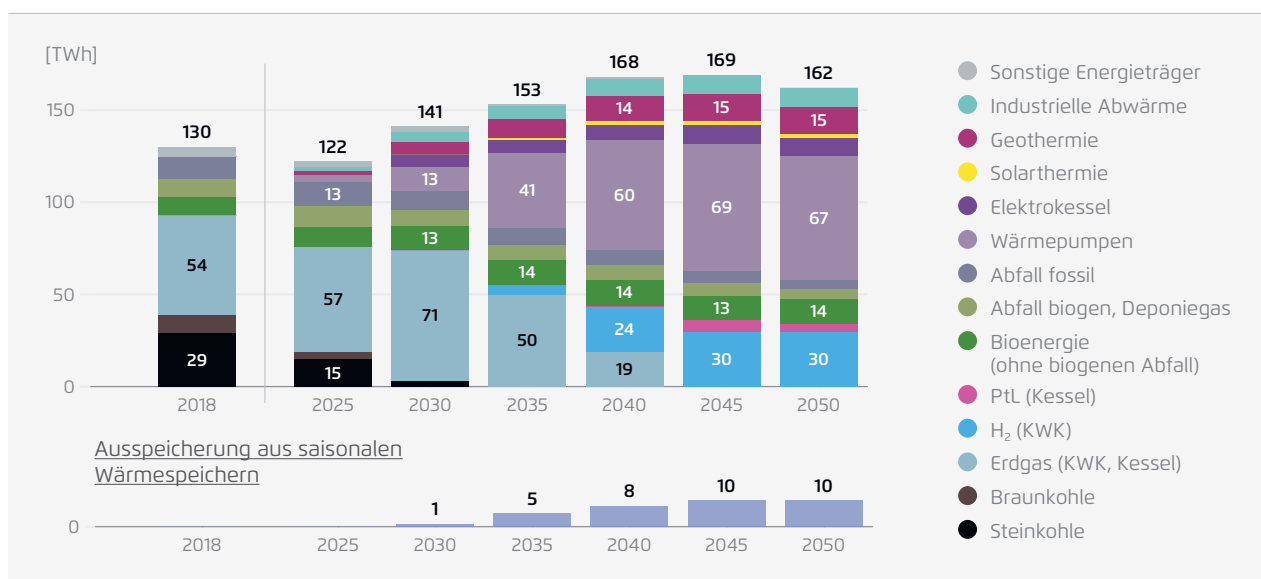


Wärmenetze geliefert wird, wird dann in den Industriebetrieben vor Ort produziert. Er wird mit Wärmepumpen (bei geringem Ziel-Temperaturniveau), Elektrokesseln oder durch den Einsatz von Biomasse und Wasserstoff erzeugt. Heizkessel werden dabei hauptsächlich flexibel in bivalenten Systemen eingesetzt und nutzen Situationen mit günstigen Strompreisen, um Brennstoff einzusparen.

Die Erzeugungsstruktur sieht in den einzelnen Wärmenetzen unterschiedlich aus. Einen großen Einfluss haben dabei lokal vorkommende Erzeugungspotenziale, zum Beispiel die tiefe Geothermie in geologisch geeigneten Gebieten, industrielle Abwärme in der Nähe von großen Industriestandorten oder vorhandene Abfallverbrennungsanlagen. In sehr vielen Wärmenetzen

Wärmeerzeugung für Nah- und Fernwärme

→ Abb. 17



spielen Großwärmepumpen und Elektrokessel eine wichtige Rolle, um in den zunehmenden Zeiten mit niedrigen Strompreisen günstig Wärme erzeugen zu können. Zur Absicherung von Verbrauchsspitzen im Winter werden ergänzend Erzeugungsoptionen wie Biomasse und PtL-Kessel eingesetzt, die keinen Strom verbrauchen, oder – einen H₂-Netzanschluss vorausgesetzt – auch Wasserstoff-KWK-Anlagen. Diese fahren ausschließlich stromgeführt, das heißt, sie werden lediglich in Zeiten hoher Strompreise eingesetzt. Wärmenetze nutzen in diesen Zeiten die Kraftwerksabwärme gesamteffizienzerhöhend.

Ebenso wie im Stromsystem nimmt durch die zunehmende Volatilität der Kosten für die Erzeugung von Nah- und Fernwärme die Bedeutung von Speichern zu. Wärme lässt sich im Vergleich zu Strom gut und kostengünstig speichern. Neben Kurzfristspeichern zur Überbrückung von Stunden bis wenigen Tagen, werden in Städten mit geeigneten Potenzialen auch Saisonalspeicher errichtet. Das können entweder Erdbeckenspeicher, wenn günstige Flächen vorhanden sind, oder untertägige Aquiferspeicher sein. Diese werden im Sommer günstig aufgeladen, zum Beispiel durch Wärmepumpen oder Elektrokessel in Zeiten mit Strompreisen von Null oder durch Abwärme oder Solarthermie, die sonst nicht genutzt werden würden. Im Winter werden die Speicher dann entladen und reduzieren den Einsatz von teuren Erzeugungsoptionen wie Biomasse oder Wärmepumpen in Stunden mit hohen Strompreisen. Bis 2045 werden Kurzfristspeicher mit einer Kapazität von 0,3 TWh und Saisonalspeicher mit in Summe 10 TWh errichtet.

Erdgas

Der Erdgasverbrauch geht bis zum Jahr 2030 um 16 Prozent auf 739 TWh gegenüber 2021 zurück. Der Großteil des Rückgangs entfällt dabei auf den Gebäudesektor: Durch den schrittweisen Übergang zu Wärmenetzen und zur Nutzung von Umgebungswärme durch Wärmepumpen sinkt der Erdgasverbrauch hier um mehr als ein Viertel auf 250 TWh. Zeitgleich sinkt der Gasbedarf der Industrie um rund 15 Prozent auf 165 TWh. In der Stromerzeugung steigt

der Erdgasverbrauch hingegen – bedingt durch den Kohleausstieg – vorübergehend an.

Zwischen 2030 und 2040 beschleunigt sich der Rückgang des Gasverbrauchs in Industrie und Gebäuden erheblich. Nach 2035 greift dann sehr schnell die Verknappung von Emissionszertifikaten im ETS I, sodass der Ausstieg aus der Verwendung von Erdgas in der Industrie 2040 praktisch vollzogen und im Strombereich sehr weit fortgeschritten ist. Im Gebäudebereich dringen Wärmepumpen und leitungsgebundene Wärme weit in den Gebäudebestand vor. Der Gasverbrauch der Industrie und Energiewirtschaft reduziert sich ebenfalls etwas, und Gas wird teilweise durch Wasserstoff ersetzt, was auch eine Umnutzung der Hochdrucknetzes impliziert.

Netzseitig wirken sich die Verbrauchsrückgänge daher am stärksten auf die Erdgasverteilnetze aus. Im Kontext der kommunalen Wärmeplanung entwickeln die Kommunen Pläne für den Umgang mit den zunehmend weniger ausgelasteten Gasverteilnetzen. Parallel dazu wird der Ordnungsrahmen für Gasverteilnetze überarbeitet, um den Netzbetreibern bei angemessenem Vorlauf Stilllegungen von Teilen der Verteilnetze zu ermöglichen, Stranded Assets zu vermeiden und Kundinnen und Kunden vor einem unverhältnismäßigen Anstieg der Gasnetznutzungsentgelte zu schützen. Die meisten Gasverteilnetze werden bis 2045 stillgelegt. Durch die Verbreitung von Wärmepumpen und den Ausbau der Fernwärmenetze, die die Versorgung mit Heizenergie sicherstellen, entfällt der Bedarf an einem verzweigten Gasverteilnetz. Gewerbliche und industrielle Verbraucher, die nicht direkt an das Transportnetz angeschlossen sind, werden über Stichleitungen mit Wasserstoff versorgt. Nur ein kleiner Teil der Netze wird später zu Wasserstoffnetzen umgerüstet; für die übrigen Netze werden Stilllegungen zum Regelfall. Gesetzlich vorgegebene Kriterien minimieren Rückbauverpflichtungen und senken so die Kosten.

Mineralölraffinerien und Substitution von Mineralölen durch klimafreundliche Grundstoffe

Die Mineralölraffinerien in Deutschland stellten im Jahr 2018 rund 80 Prozent ihrer Produkte zur energetischen Verwendung her, vor allem flüssige Kraftstoffe wie Diesel und Benzin, aber auch Brennstoffe zur Wärmebereitstellung wie Heizöl. Ein Teil der Raffinerieprodukte wird auch stofflich verwendet, zu nennen ist hier vor allem Naphtha, ein wichtiger Rohstoff in der chemischen Industrie. Naphtha macht heute über zehn Prozent der deutschen Nachfrage nach Mineralölprodukten aus. Weitere Mineralölprodukte fallen in den Raffinerien als Nebenprodukte an und werden ebenfalls stofflich genutzt, spielen aber bezüglich der Nachfrage eine eher untergeordnete Rolle, etwa das im Straßenbau genutzte Bitumen oder Schmierstoffe.

Aktuell steht die Mineralölverarbeitung in Deutschland bereits unter starkem Transformations- und Anpassungsdruck, da die Nachfrage nach Mineralölprodukten rückläufig ist: So sank der Mineralölverbrauch in Deutschland von 2018 bis 2023 um 14 Prozent. Im Szenario kommt es bis 2030 zu einer weiteren Reduktion der Mineralölnachfrage um rund ein Drittel. Der Rückgang resultiert insbesondere aus einer geringeren Nachfrage des Straßenverkehrs nach Otto- und Dieselkraftstoffen sowie des Wärmesektors nach leichtem Heizöl. Dagegen steigt die Nachfrage des Luftverkehrs bis 2030 an. Bis Ende 2045 geht die Nachfrage nach Mineralölprodukten dann sowohl bei der energetischen Verwendung als auch bei der Nachfrage der chemischen Industrie nach Naphtha vollständig zurück. Aufgrund dieses Nachfragerückgangs kommt im dargestellten Szenario die Mineralölverarbeitung in Deutschland bis 2045 vollständig zum Erliegen.

Ab 2035 werden zunächst kleinere Produktionsanlagen für Biokraftstoffe in Betrieb genommen. Diese produzieren bis 2045 rund 7 TWh Biokraftstoffe für den Flugverkehr und nutzen dafür feste Biomassen aus Kurzumtriebsplantagen. Strombasiertes Naphtha ersetzt einen Teil des fossilen Rohstoffs, eine komplette Umstellung erfolgt bis 2045 jedoch noch nicht. Die Nachfrage nach

Schmierstoffen wird aufgrund des Rückgangs an Verbrennungsmotoren bis 2045 stark abnehmen. Weiterhin notwendige Schmierstoffe werden biogen oder per Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt. Auch die Nachfrage nach Bitumen geht langfristig zurück, da Recycling, der Bau haltbarer Straßen und die Möglichkeit zur Beimischung von Zuschlagsstoffen den Bedarf reduzieren. Hier bietet sich zum einen der Abbau von Naturbitumen an, zum anderen wäre auch eine Produktion in Spezialraffinerien denkbar. In diesem Fall dürften die anfallenden Leicht- und Mitteldestillate jedoch nur treibhausgasneutral verwendet werden, etwa unter Einsatz von CCS (*Carbon Capture and Storage*) bei der Verbrennung.

5.1.4 Treibhausgasemissionen

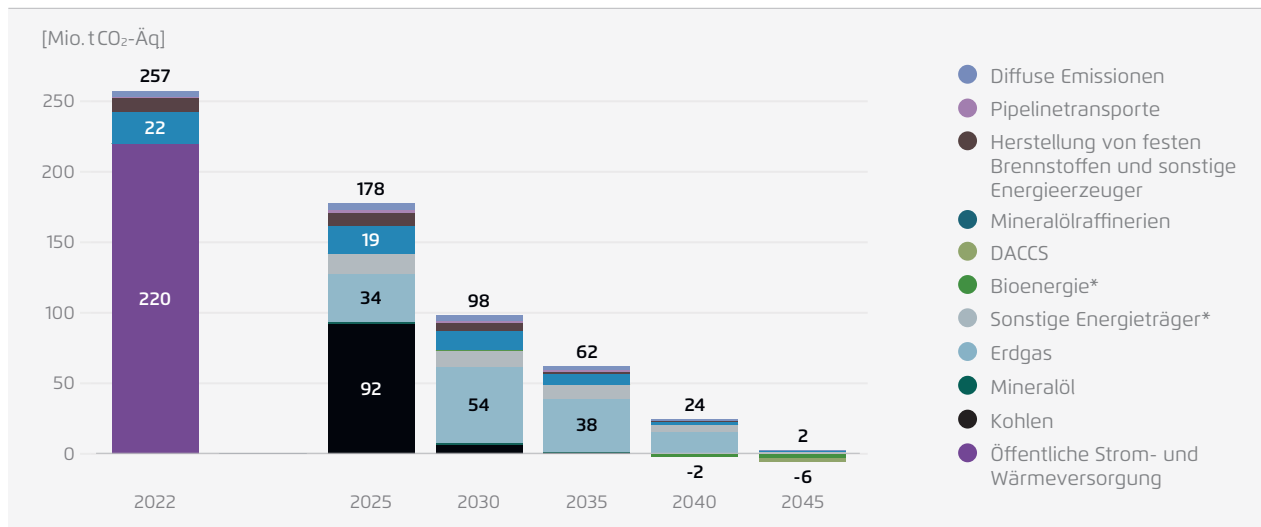
Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft zeigt Abbildung 18.

5.1.5 Zentrale Weichenstellungen

Bis die nötigen Erzeugungsanlagen, Speicher, Strom- und Wärmenetze errichtet sind, braucht es einen langen Vorlauf und Planungssicherheit. Damit die Energiewirtschaft bis 2045 Industrie, Verkehr und Wohnungswirtschaft zuverlässig mit klimaneutral erzeugter Energie versorgen kann, müssen die erforderlichen Investitionen frühzeitig erfolgen. Damit das Gesamtsystem dabei günstig bleibt, wird der Investitionsrahmen für die Kapazitäten von Erneuerbaren Energien, von Flexibilitätsoptionen und thermischen Kraftwerken näher an den Strommarkt herangeführt. Den Ausstieg aus der Kohle- und Erdgasverstromung steuert eine konsequente Fortführung des europäischen Emissionshandelssystems. Um Stromangebot und -nachfrage in jeder Viertelstunde effizient zusammenzuführen, setzen dynamische Endverbraucherpreise und lokale Strompreise systemdienliche Signale. Tabelle 6 zeigt, welche Schritte bis wann eingeleitet werden müssten, damit die Entwicklungen im Szenario Wirklichkeit werden können.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft

→ Abb. 18



Agora Energiewende und Prognos (2024) basierend auf Umweltbundesamt (2024). * inkl. CCS bzw. BECCS (CCS von biogenem Hausmüll in thermischen Abfallbehandlungsanlagen)

Zentrale Weichenstellungen im Sektor Energiewirtschaft

→ Tabelle 6

Weichenstellung	Zeitpunkt spätestens
Phase-in dynamischer Netzentgelte und Tarifmodelle	2025*
Flächendeckend günstige Strompreise für Wärmepumpen, getrieben durch Reform von Steuern und Umlagen sowie ermäßigte Netzentgelte	2025
Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes zur Absicherung der Wirtschaftlichkeit großer Erneuerbare-Energie-Projekte (produktionsunabhängige Contract for Differences (CfDs)), Stärkung der markt-basierten Erneuerbaren-Finanzierung (Power Purchase Agreements, PPA) und Förderung der Dach-Photovoltaik (einfach und marktintegrierend)	2026
Ende staatlicher CO ₂ -Zertifikatsausgabe 2039 (ETS I) und Ausschreibungen steuerbarer Backup-Kraftwerke	2026
Fortführung der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze mit 3 Mrd. EUR/Jahr, Absicherung der Risiken des Nah- und Fernwärmeausbaus. Durch Stromsteuersenkung und zeitvariable Netzentgelte Reduktion der Stromkosten für Großwärmepumpen und Förderung ihres systemdienlichen Betriebs	2026
Gasverteilnetze: Stilllegungen ermöglichen; Stranded Assets und unverhältnismäßige Anstiege der Netznutzungsentgelte vermeiden	2026
Verpflichtung der Stromversorger, die Versorgungssicherheit ihrer Kunden zu garantieren (dezentraler Markt oder Hedging-Modell)	2028
Abschaffung einheitlicher Strompreiszonen und Einführung lokaler Strompreissignale	2030

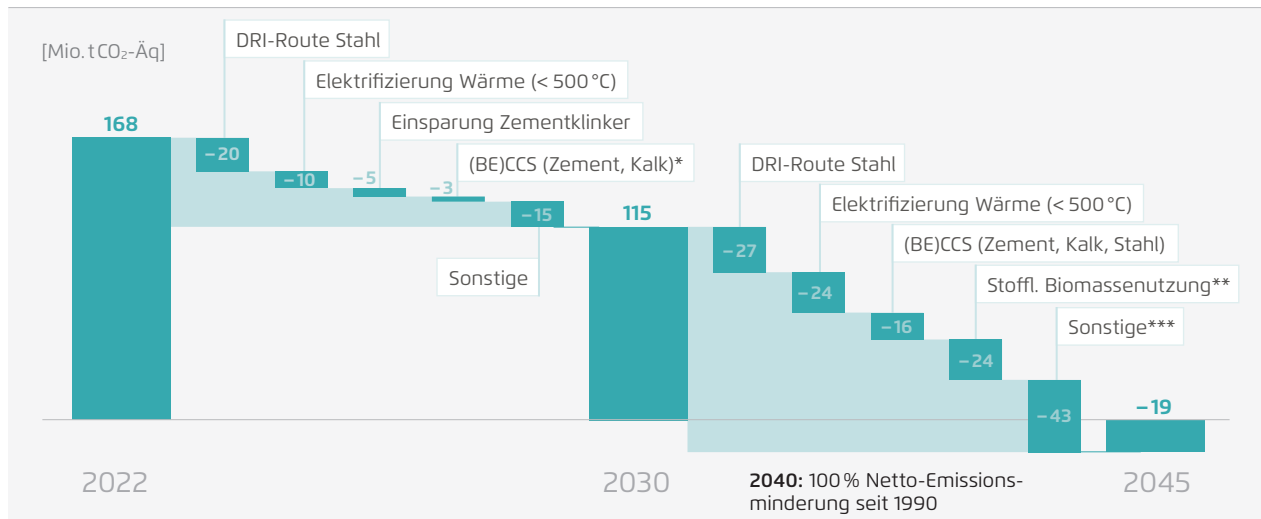
Agora Energiewende. * Modellierter Maßnahmenbeginn ist 2026. Politische Vorbereitung muss früher erfolgen.

5.2 Industrie

5.2.1 Übersicht

Industriesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. 19



Agora Industrie, Wuppertal Institut, Universität Kassel und Prognos (2024). * (BE)CCS = Abscheidung und Speicherung von Prozessemissionen und von CO₂ aus der Nutzung von Bioenergie; ** stoffliche Biomassenutzung umfasst auch die Abscheidung und Speicherung überschüssiger CO₂-Mengen in der Biomasseverarbeitung; *** Sonstige: Elektrifizierung > 500 °C sowie weitere Energieträgerwechsel und Maßnahmen zur Treibhausgasvermeidung

Industriesektor – Trends und Instrumente

Planungs- und Investitionssicherheit

- Verlässlich steigender CO₂-Preis, Ende der Neuausgabe von EU-ETS-I-Zertifikaten-Zertifikaten 2039
- Investitionsanreize durch finanzielle Absicherung des CO₂-Preisanstiegs und klimaneutrale Absatzmärkte

⚙️ Instrumente: CBAM; Auslaufen kostenfreier Zuteilung; Klimaschutzverträge; nachh. öfftl. Beschaffung

Elektrifizierung und Systemintegration

- Steigerung der Energieeffizienz und der Wettbewerbsfähigkeit durch Industriewärmepumpen
- E-Kessel zur Dampferzeugung und andere flexibel betriebene Anlagen für kosteneffiziente Elektrifizierung
- Ab 2030 Elektrifizierung von Anlagen mit Grundlastbedarf

⚙️ Instrumente: Reform der Netzentgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen; Investitionsförderung; Weiterentwicklung der Klimaschutzverträge für KMU und Dampferzeugung

Kreislaufwirtschaft, Materialeffizienz und Innovation

- CO₂-optimierte Zemente, effizienterer Betonbau und breiterer Einsatz von Recyclingstahl
- Innovative, auf Kreislauf ausgerichtete Wertschöpfungsketten

⚙️ Instrumente: Embodied-Carbon-Grenzwerte; Beton- und Zementnormen; nachhaltige öffentliche Beschaffung

Umstieg von fossilen Rohstoffen auf Recycling und Biomasse

- Hochlauf von mechanischem und chemischem Recycling
- Einstieg in die stoffliche Biomassenutzung und C-Bindung und Ausstieg aus fossilen Rohstoffen

⚙️ Instrumente: nachfrageseit. Anreize f. stoffl. Biomasseeinsatz; Rezyklateinsatzquoten; Bepreisg. foss. Feedstocks

Wasserstoffhochlauf und CCS für Restemissionen

- Wasserstoffhochlauf in Stahl, Chemie und Industrie-Kraftwerken
- CCS-Hochlauf bei Prozessemissionen (Zement, Kalk) und Restemissionen (Stahl und Chemie)
- Generierung von Negativemissionen durch stoffliche Nutzung und CCS von Biomasse

⚙️ Instrumente: regulatorischer Rahmen für CCS; RFNBO-Quote RED III; Investitionsförderung; Klimaschutzverträge

Industriesektor – Kernindikatoren

	2022	2030	2045
Industrie gesamt			
Endenergieverbrauch ¹ [TWh]	665	671	617
Stromanteil EEV [%]	30	40	73
H ₂ ² [TWh]	14	25	103
Biomasse ² [TWh]	19	24	113
CCS [Mio. t CO ₂]	0	3	34
Stahl			
Sekundärstahl-Anteil [% Stahl]	40	50	54
DRI-Einsatz [% Stahl]	3	22	46
H ₂ -Anteil DRI [%]	0	76	75
Chemie			
Methanol-Route [% HVC]	0	0	53
Abfall als Rohstoff für Kunststoffe [% Feedstock energetisch]	6	19	36
Biomasse stofflich [% Feedstock energetisch]	0	1	44
(Bio-)CCS [Mt CO ₂]	0	0	15
Zement			
Bautätigkeit [2022=100]	100	82	94
Klinkerprod. [Mio t.]	23	16	13
CCS [Mio. t CO ₂]	0	2	10
Andere energieintensive Industrie			
Stromanteil EEV Glas [%]	28	33	68
Anteil Wärmepumpen an Dampfbereitstellung Papier [%]	0	6	45
(BE)CCS Kalk [Mt CO ₂] ³	0	1	5
Nicht energieintensive Industrie			
Stromanteil EEV [%]	44	57	95
Wärmepumpen [GWth]	1	9	28
Emissionen			
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq] ⁴	168	115 (118)	-19 (31)
KSG-Ziel ⁵	n/a	122	n/a

Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). ¹gemäß AGEB-Abgrenzung. ²inkl. stofflicher Nutzung in der Chemieindustrie.

³Prozess- und energiebedingte Emissionen. ⁴Werte in Klammern ohne CCS und Negativemissionen. ⁵Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6).

5.2.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage

Der Industriesektor umfasst das verarbeitende Gewerbe und die Bauwirtschaft. Rund 60 Prozent der Treibhausgasemissionen der Industrie entfallen auf die Herstellung von Stahl, Zement und Chemieprodukten. Die restlichen 40 Prozent gehen auf die Herstellung weiterer energieintensiver Produkte,

insbesondere von Glas, Kalk, Papier und Aluminium sowie Produkte weniger energieintensiver Branchen und übrige Prozesse und Produktnutzungen¹⁰ zurück. Die Emissionen der Industrie sind zu rund zwei

¹⁰ Die Produktnutzung bezieht sich hier auf Emissionen beispielsweise aus den Ausgasungen von Lacken.

Dritteln energiebedingte Emissionen aus der Verbrennung meist fossiler Energieträger und zu einem Drittel prozessbedingte Emissionen. Raffinerien und eigenständige Kokereien sind dem Sektor Energiewirtschaft zugerechnet.

Im Jahr 2022 lagen die Treibhausgasemissionen des Industriesektors gemäß der Abgrenzung nach Klimaschutzgesetz (KSG) bei 168 Mio. t CO₂-Äq (UBA 2024). In den Jahren 2022 und 2023 gingen sie stark zurück und waren nach vorläufigen Zahlen im Jahr 2023 rund 15 Prozent niedriger als im Jahr 2021. Dieser Rückgang ist allerdings im Wesentlichen nicht auf Klimaschutzmaßnahmen zurückzuführen, sondern auf einen deutlichen konjunktur- und energiepreisbedingten Produktionsrückgang. So lag die Produktion in den energieintensiven Industriezweigen im Jahr 2023 rund 16 Prozent niedriger als im Jahr 2021 (Statistisches Bundesamt 2024a). Die Rohstahlproduktion ist in diesem Zeitraum beispielsweise um zwölf Prozent gesunken, die Zementproduktion sogar um 17 Prozent.

In den vorausgehenden sechs Jahren zwischen 2015 und 2021 hatten sich die Treibhausgasemissionen im Industriesektor jedoch nahezu nicht verändert. Um das Sektorziel¹¹ für das Jahr 2030 – maximal 122 Mio. t CO₂-Äq – zu erreichen, ist erforderlich, dass die Emissionen der Industrie in den nächsten sechs Jahren im Vergleich zum Jahr 2021 um 33 Prozent sinken.¹²

Durch Förderzusagen des Bundes und der EU (unter anderem im Rahmen des IPCEI-Programms und des Innovationsfonds) konnten bereits bedeutende Investitionen in emissionsarme Produktionsprozesse angestoßen werden. Zu den geförderten Großprojekten zählen Direktreduktionsanlagen (DRI-Anlagen) zur Eisenerzeugung, die sich zum Teil bereits in Bau befinden, sowie Anlagen zur

Abscheidung von CO₂ in Zement- und Kalkwerken. Zudem wurde auf Bundesebene die Errichtung des für die Industrietransformation zentralen Wasserstoff-Kernnetzes genehmigt, sodass erste Leitungen ab dem Jahr 2025 auf Wasserstoff umgestellt werden können.

Chancen, Herausforderungen und Handlungsansätze

Damit die Treibhausgasminderung im Industriesektor auch bei wieder ansteigenden Produktionsmengen gelingt, muss der strukturelle Wandel des Sektors hin zu emissionsarmen Prozessen deutlich beschleunigt werden. Zentrale **Handlungsansätze** sind hierbei: die Einbindung Erneuerbarer Energien (zum Beispiel durch die Umstellung der Prozesswärme von fossilen Energieträgern auf Strom aus erneuerbaren Energiequellen), der Umstieg von fossilem Kohlenstoff auf Kohlenstoff aus erneuerbaren Quellen, eine verstärkte Kreislaufwirtschaft und die Abscheidung und Speicherung verbleibender CO₂-Mengen.

Für den Übergang zu einer klimaneutralen Industrie brauchen Unternehmen Zugang zu den notwendigen Infrastrukturen (zum Beispiel Stromnetzanschlüsse oder Wasserstoffpipeline-Netze) sowie ausreichende Mengen erneuerbarer Energieträger und Rohstoffe. Die Umstellung auf emissionsarme Produktionsprozesse erfordert umfangreiche Investitionen und geht anfangs oft mit höheren Betriebskosten einher. Bis die ansteigende CO₂-Bepreisung und neu entstehende Märkte für emissionsarme Produkte die Mehrkosten decken können, sind staatliche Förderinstrumente unverzichtbar, damit die Unternehmen frühzeitig in emissionsarme Produktionsprozesse investieren können.

Ein intelligenter Mix der verschiedenen politischen Maßnahmen unterstützt die Unternehmen dabei, eine Vorreiterrolle beim Umbau der Grundstoffindustrien einzunehmen und Leitmärkte für emissionsarme Grundstoffe in Europa und weltweit zu erschließen. Der deutsche Anlagenbau könnte wiederum von Erfahrungen in einem *First Mover*-Heimmarkt profitieren, wenn zukünftig

¹¹ Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6)

¹² Gegenüber den produktionsmengenbedingt niedrigeren Emissionen des Jahres 2023 müssen die Emissionen bis 2030 für eine Zielerreichung noch um 24 Prozent sinken.

auch in anderen Ländern und Weltregionen verstärkt in klimaneutrale Produktionsprozesse investiert wird.

5.2.3 Szenariopfade

Die dargestellten Szenariopfade sind gegliedert nach den Industriebereichen Stahl, Chemie, Zement, andere energieintensive Industrie (Glas, Kalk, Zellstoff und Papier, Nicht-Eisenmetall, Gießereien, andere Herstellung mineralischer Produkte und erste Bearbeitung von Eisen und Stahl) sowie sonstiges verarbeitendes Gewerbe. Letzteres umfasst die vielfältigen Herstellungsprozesse verschiedenster Branchen, die in der Regel bei niedrigen Temperaturniveaus ablaufen (unter anderem Fahrzeug- und Maschinenbau, Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabak, Elektronikindustrie, Batteriezellproduktion). Darüber hinaus sind hier die Industriekraftwerke¹³, fluoridierte F-Gase, Nicht-CO₂-Emissionen sowie Emissionen aus der Produktverwendung erfasst. Die drei Branchen Stahl, Chemie und Zement werden wegen ihres großen Emissionsanteils ausführlicher beleuchtet.

Stahlindustrie: Umstieg von Kohle auf Wasserstoff und Recycling

Im Szenario erholt sich die Stahlindustrie Mitte der 2020er-Jahre von ihrer Konjunkturschwäche und den hohen Preisen der eingesetzten Energieträger. Durch Maßnahmen zur Erhöhung der Materialeffizienz in den stahlintensiven Bereichen Gebäude und Fahrzeugindustrie bleibt die Stahlnachfrage auch bei Wirtschaftswachstum und intensiver Bautätigkeit weitgehend konstant (Agora Industrie und Systemiq 2023). Insbesondere die Sekundärstahlerzeugung legt mit den gegenüber dem Höhepunkt der Energiekrise sinkenden Strompreisen kurzfristig wieder stark zu. Mittel- und langfristig wird die Verwendung von Stahlschrott aufgrund des geringeren CO₂-Fußabdrucks deutlich attraktiver.

Der Einsatz von Stahlschrott bei der Stahlerzeugung steigt deshalb leicht von historisch etwa 40 Prozent¹⁴ auf etwa 54 Prozent bis 2045 an (vergleiche Abbildung 21). Damit einhergehend sinken die deutschen und europäischen Nettoexporte von Stahlschrott. Insgesamt bleibt der Sekundärstahlanteil wegen der hohen Nachfrage nach Stahl in exportintensiven Industrien wie der Automobilindustrie und dem Maschinenbau und aufgrund von Qualitätsanforderungen begrenzt. Neben dem inländischen Schrottaufkommen decken Schrott- und Stahlimporte und die inländische Primärstahlerzeugung die Stahlnachfrage (vergleiche Abbildung 20).

Die Transformation der Primärstahlerzeugung ist eine zentrale Herausforderung, um klimaneutrale Grundstoffe für wichtige Wertschöpfungsketten wie den Automobil- und Maschinenbau bereitzustellen. Abbildung 22 zeigt die notwendigen Investitionen in neue Produktionsverfahren beziehungsweise Anlagen der Stahlindustrie. Die Anfang 2024 in Deutschland in Planung befindlichen Projekte zum Bau von DRI-Anlagen werden im Szenario bis Ende 2030 umgesetzt und nach 2030 um weitere Anlagen ergänzt. Damit wird bis 2035 der vollständige Ausstieg der Stahlbranche aus der emissionsintensiven Hochofenroute – und damit auch aus der Kohle – ermöglicht.

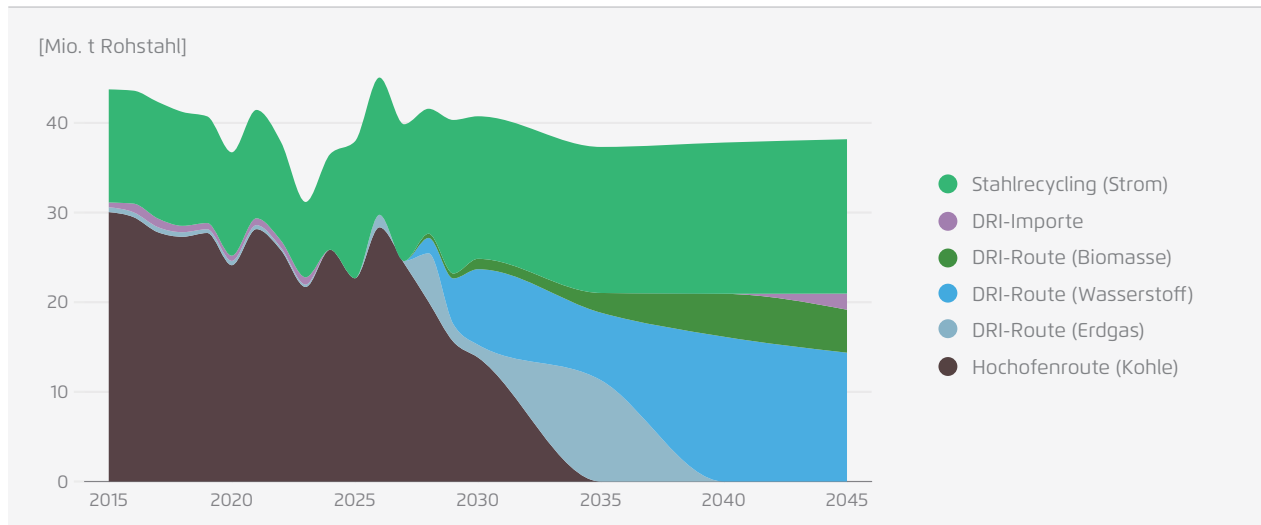
Die DRI-Anlagen werden 2030 mit 4 TWh Erdgas und 12,5 TWh erneuerbarem Wasserstoff betrieben. Dies entspricht 50 Prozent des gesamten industriellen Wasserstoffbedarfs im Jahr 2030. Bis 2040 steigt der Wasserstoffbedarf auf 41 TWh an und macht dann 44 Prozent des industriellen Wasserstoffbedarfs aus. Bis 2045 sinkt der Bedarf etwas, weil die Verfügbarkeit von Schrott leicht steigt. Diesem Rückgang steht im gleichen Zeitraum jedoch ein steigender Bedarf der chemischen Industrie gegenüber, sodass der Wasserstoffbedarf der Industrie insgesamt weiter steigt.

¹³ Ausgenommen die Kraftwerke der Chemieindustrie und der Papierindustrie, die der Chemie bzw. den anderen energieintensiven Industrien zugerechnet sind.

¹⁴ Der Einsatz von Stahlschrott ergibt sich aus dem Einsatz in der Sekundärstahlroute (Stahlrecycling) und dem Einsatz in der Primärstahlerzeugung in der Hochofenroute (derzeit rund 20 Prozent) und in Elektrolichtbogenöfen und Sauerstoffkonvertern.

Stahlproduktion nach Verfahren

→ Abb. 20



Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). Datenpunkte bis 2030 jährlich, danach für 5er-Stützjahre; DRI = Direct reduced iron

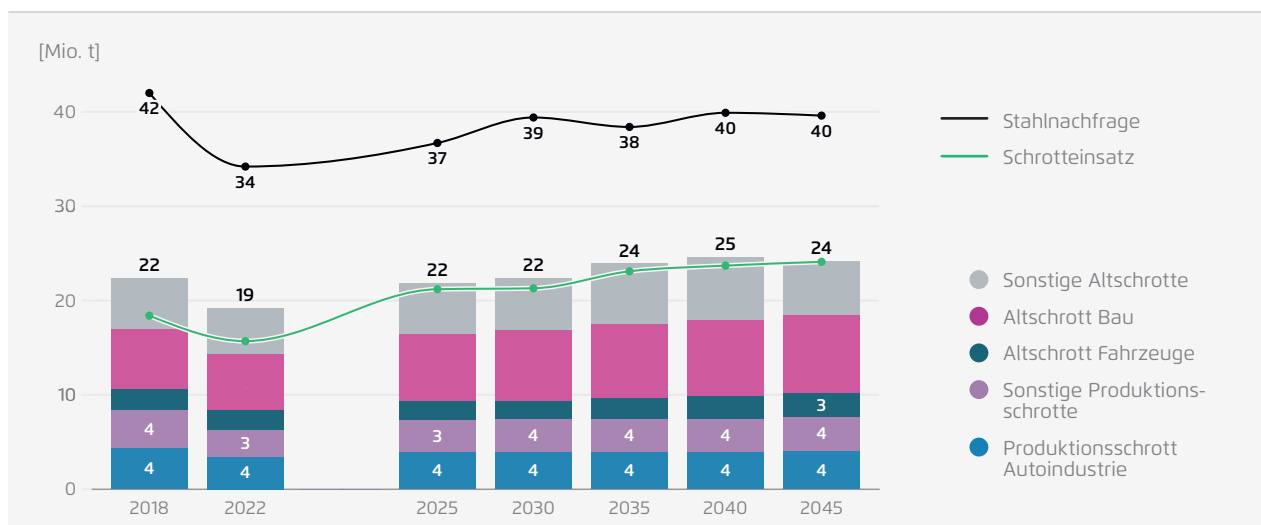
Da erneuerbarer Wasserstoff und Synthesegas aus Biomasse zu Beginn der Transformationsphase noch nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen und der Betrieb von Hochöfen aufgrund der hohen CO₂-Emissionen nicht mehr wirtschaftlich ist, nimmt Erdgas bei der Bereitstellung von Reduktionsgas zwischenzeitlich eine Schlüsselrolle ein. Beim Betrieb mit Erdgas wird entstehendes CO₂ ohnehin teilweise prozessbedingt abgeschieden. An günstig gelegenen Standorten wird das aus der

Erdgasnutzung entstehende, abgeschiedene CO₂ in die CO₂-Leitungsinfrastruktur eingespeist und Speicherräumen zugeführt. Der Einsatz von Erdgas erreicht im Jahr 2035 mit 77 TWh einen Höhepunkt. Bis 2040 wird Erdgas als Energieträger dann vollständig von Wasserstoff und Synthesegas aus Biomasse abgelöst.

Die CO₂-Infrastruktur spielt in der Stahlbranche langfristig eine wichtige Rolle, da durch die anteilige Verwendung von Biosynthesegas aus heimischen

Stahlnachfrage, Stahlschrotteinsatz und Stahlschrottaufkommen nach Branchen

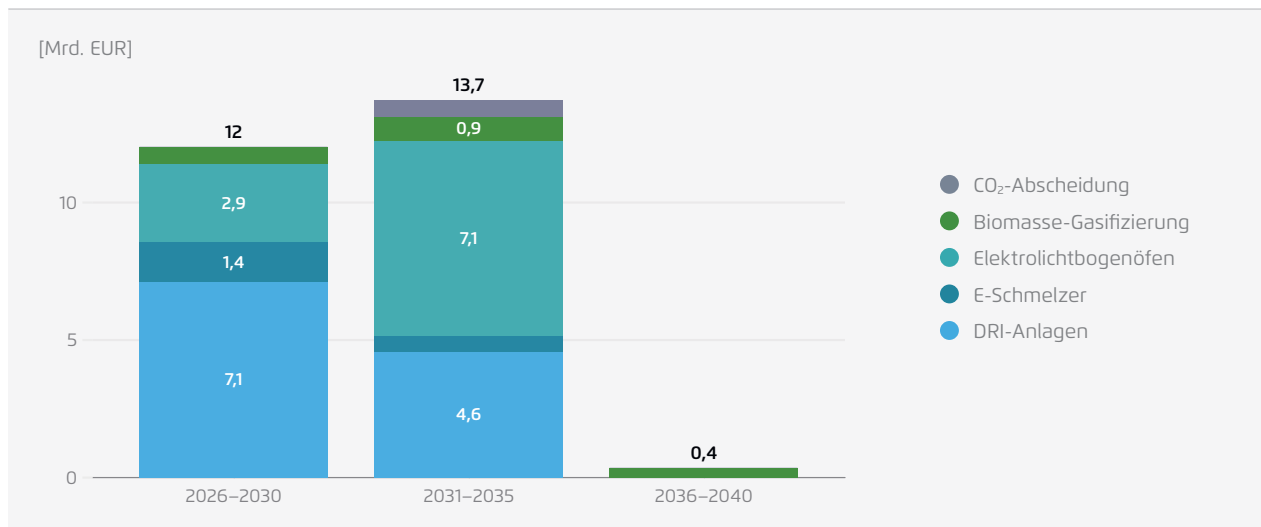
→ Abb. 21



Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

Neuinvestitionen in der Stahlindustrie

→ Abb. 22



Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). DRI = Direct reduced iron

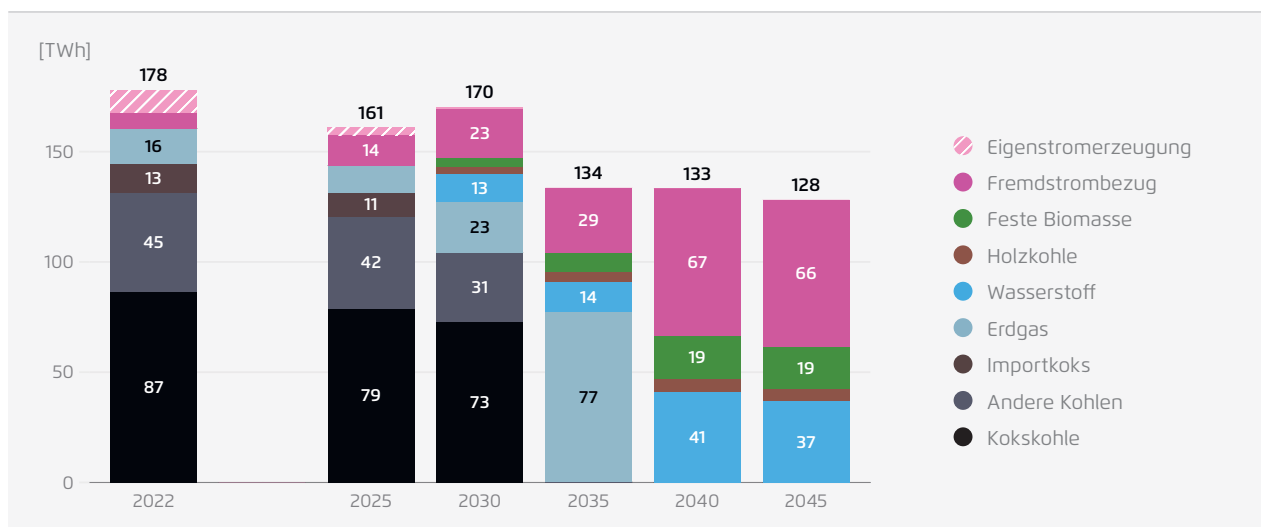
Quellen auch langfristig biogenes CO₂ entsteht. Durch die geologische Speicherung dieses biogenen Kohlenstoffs gelingt es dem Stahlsektor, ab 2040 netto-klimapositiv zu werden und jährlich drei Mio. Tonnen CO₂-Äq permanent zu binden.

Durch den Umstieg von importierter Koks-kohle auf (vor allem deutschen und europäischen) Wasserstoff und Biomasse verringert sich die Importabhängigkeit der Stahlbranche bei den Energieträgern.

Voraussichtlich wird die Direktreduktion zur Eisenproduktion in Deutschland langfristig teurer bleiben als der Betrieb vergleichbarer Anlagen an Standorten mit niedrigen Gestehungskosten für Strom aus Erneuerbaren Energien. Im Szenario wird jedoch angenommen, dass direkt reduziertes Eisen weltweit knapp sein wird und deshalb preislich nicht deutlich günstiger sein wird als die Produktion in Deutschland mit höheren Stromkosten. Durch langfristige Bezugsverträge decken die europäische und

Primärenergiebedarf der Stahlerzeugung in Deutschland

→ Abb. 23



Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

die deutsche Stahlindustrie im Szenario mit rund 2,1 Mio. Tonnen direkt reduziertem Eisen (*direct reduced iron*, DRI) im Jahr 2045 nur einen kleinen Teil ihres Einsatzes über Importe. Ein alternatives Szenario mit einer größeren Verfügbarkeit von DRI-Importen wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht (siehe Box „Was passiert, wenn ... Deutschland verstärkt grünes Eisen und Methanol importiert?“).

Chemische Industrie: biogene Rohstoffe, Recycling und Elektrifizierung

Im Szenario bleibt die Chemiebranche bis 2030 unter wirtschaftlichem Druck. Gründe dafür sind vor allem verhaltene Konjunkturerwartungen im europäischen Absatzmarkt und im internationalen Vergleich hohe Preise für die in der Branche eingesetzten Energieträger. Erst nach 2030 verbessert sich die Wettbewerbsposition spürbar durch die Nachfrage nach klimafreundlich hergestellten Produkten und sinkenden Energiekosten aufgrund der Einbindung und die zunehmend flexible Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen.

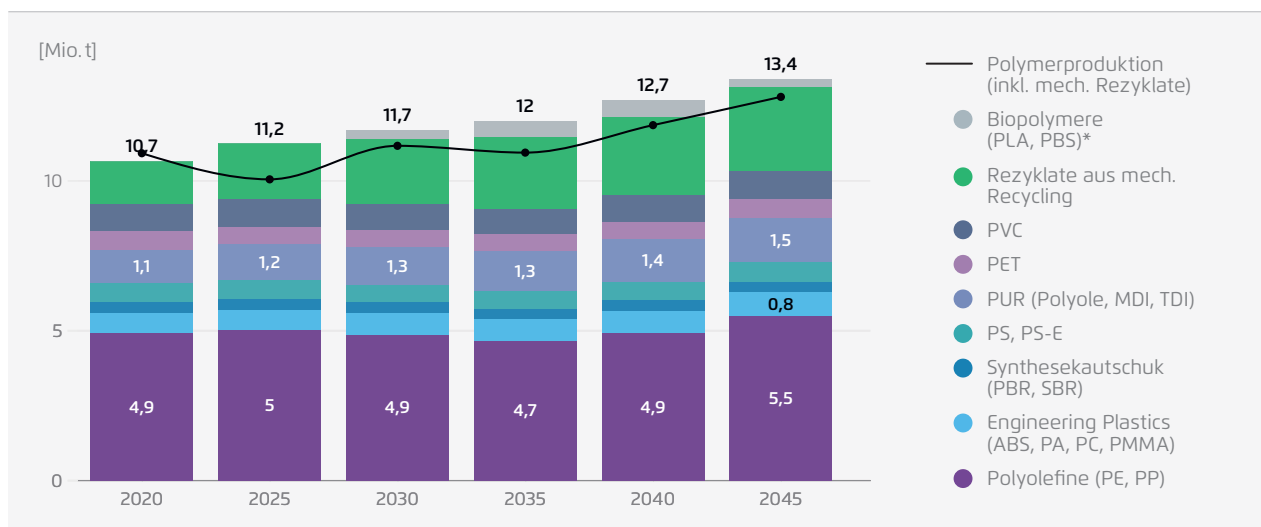
Bei den wirtschaftlich bedeutenden Wertschöpfungsketten von Kunststoffen geht das Szenario

von einer steigenden Nachfrage aus (siehe Abbildung 24). Ein Großteil des zusätzlichen Bedarfs kann durch zusätzliches mechanisches Recycling im Inland abgedeckt werden. Bei den Primärkunststoffen verschiebt sich die Handelsbilanz leicht: Die Nettoimportmengen von Polyethylen und Polypropylen steigen aufgrund der nachteiligen Wettbewerbsposition leicht. Bei anderen Kunststoffen wie PVC (Polyvinylchlorid) und Polyurethanen sinken die Nettoexporte. Bei den margenstärkeren *Engineering Plastics*, die in erster Linie durch die Automobilindustrie und im Maschinenbau nachgefragt werden, behält die deutsche Chemieindustrie eine starke Stellung.

Im Rahmen der Düngemittelproduktion importiert Deutschland im Szenario verstärkt Ammoniak oder entsprechende Derivate und Zwischenprodukte, die inländischen Produktionsmengen sinken entsprechend auf rund 60 Prozent (bezogen auf 2020). Zur Absicherung der Düngemittel- und Nahrungsmittelproduktion behält Deutschland jedoch auch eigene Anlagen für die Produktion von Ammoniak, die bis 2040 auf erneuerbaren Wasserstoff umgestellt werden und mit 9 TWh zur Wasserstoffnachfrage beitragen.

Kunststoffnachfrage und inländische Polymerproduktion (inkl. Rezyklate)

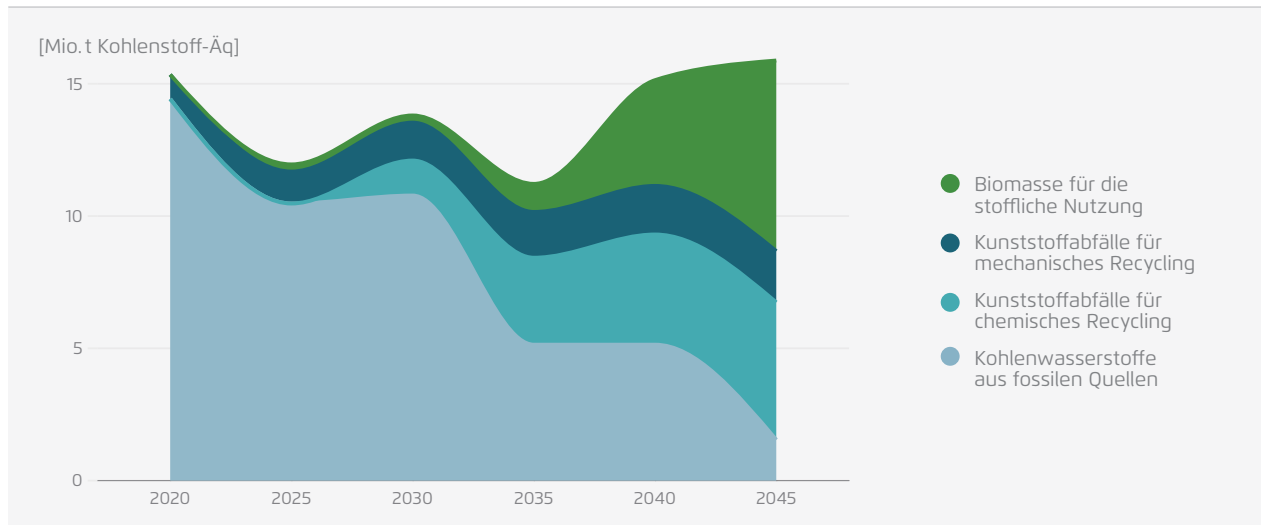
→ Abb. 24



Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). * Biopolymere (stellvertretend PLA und PBS) ersetzen Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol in ausgewählten Anwendungen

Rohstoffbasis für die Kunststoffproduktion

→ Abb. 25



Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

Mit zuletzt rund 30 bis 35 Mio. t CO₂-Äq hat die Produktion von chemischen Grundstoffen heute einen großen Anteil an den Treibhausgasemissionen der Industrie in Deutschland. Diese bilden jedoch nur einen Teil der Emissionen ab, die über den Lebenszyklus von Chemieprodukten entstehen. Denn bei Kunststoffen, die aus fossilem Öl hergestellt werden, macht die Verwertung am Ende ihrer Nutzungsphase mehr als 50 Prozent der Emissionen aus, die insgesamt mit Kunststoffen in Verbindung stehen (Agora Industrie 2023).¹⁵

Um diese Emissionen zu vermeiden, „defossilisiert“ die chemische Industrie ihre Rohstoffbasis: In dem Szenario wird anstelle von Erdöl als Rohstoff und Kohlenstoffquelle zunehmend Biomasse eingesetzt, die über die Gasifizierung erst zu Methanol und dann zu Kunststoffen weiterverarbeitet wird. Mechanisches und ergänzend chemisches Recycling sorgen dabei für eine effiziente Kreislaufführung und verringern den Bedarf an zusätzlichem Kohlenstoff.

Abbildung 25 zeigt die Rohstoffbasis für die Herstellung von Kunststoffen für den Zeitraum von 2020 bis 2045. Mechanisches Recycling nimmt im Zeitverlauf kontinuierlich zu, da immer mehr Abfallfraktionen wirtschaftlich verwertbar werden. Ab 2030 wird das chemische Recycling für Produkte, die nicht mechanisch recycelt werden können, zu einer wichtigen Säule der Kunststoffproduktion. Ab 2035 entwickelt der Hochlauf der stofflichen Nutzung von Biomasse eine starke Dynamik. Auch Beiprodukte aus der Chemieproduktion, die heute energetisch genutzt werden, werden zunehmend der rohstofflichen Nutzung zugeführt. Möglich wird das durch die fortschreitende Einbindung Erneuerbarer Energien und die Elektrifizierung der Prozesswärme.

Im Jahr 2045 werden rund 22 Mio. t Biomasse (25 Prozent der insgesamt energetisch und stofflich genutzten Biomasse¹⁶) stofflich eingesetzt. Dadurch reduziert sich der Verbrauch von fossilen Rohstoffen auf 1,5 Mio. Tonnen (rund zehn Prozent des heutigen Verbrauchs). Zur Erhöhung der Ausbeute bei der Verarbeitung von Biomasse wird bei der Gasifizierung Wasserstoff zugesetzt. Bis 2045 steigt der stoffliche Wasserstoffeinsatz auf circa 40 TWh. Die Nutzung

¹⁵ Die Emissionen entstehen dabei überwiegend bei der Verbrennung. Auch bei einer ambitionierten Kreislaufführung bleiben große Emissionsmengen am Lebenszyklusende bestehen.

¹⁶ Ausgenommen Bauholz

von CO₂ aus Punktquellen oder der Atmosphäre (*Carbon Capture and Utilization*, CCU) nimmt in dem Szenario als Kohlenstoffquelle keine relevante Rolle ein, da es sich hierbei um die teuerste inländische Produktionsroute zur Herstellung von Rohstoffen für die chemische Industrie handelt.

Bis 2050 beendet die Chemieindustrie den Einsatz von fossilen Rohstoffen. Zwischenzeitlich müssen einzelne Chemikalien wie Benzol, Toluol und Xylol, die insbesondere für *Engineering Plastics* benötigt werden, verstärkt importiert werden. Voraussetzung für den Einstieg in den Ausstieg bei der Verwendung fossiler Rohstoffe ist, dass wirtschaftliche Anreize für den Umstieg von fossilem Öl auf erneuerbare und rezyklierte Kohlenstoffquellen eingeführt werden.

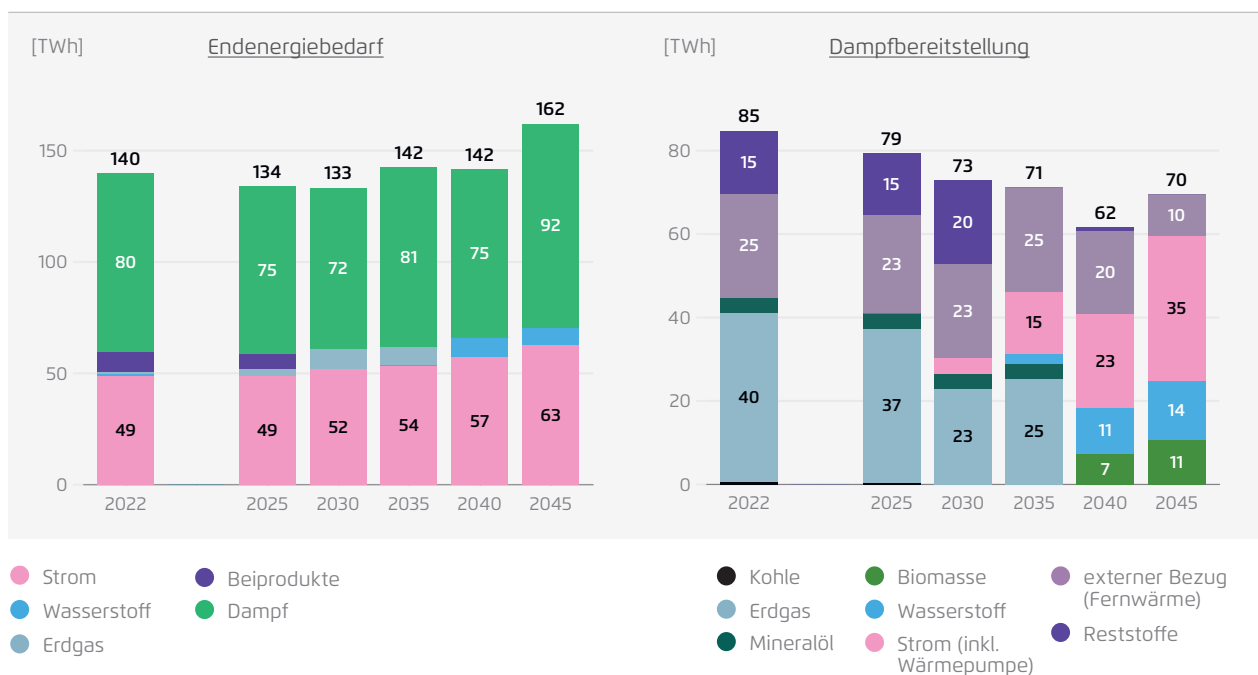
Die Biomasse wird dabei durch Umstellungen in der Land- und Forstwirtschaft verfügbar: Die Ausweitung der Agroforstwirtschaft und die Erhöhung der landwirtschaftlichen Flächen für

schnellwachsende Bäume und Gehölze erhöhen die Biodiversität und die CO₂-Speicherung und bringen auch andere positive Ökosystemleistungen mit sich. Gleichzeitig erhält die Industrie Zugang zu nachhaltigen Rohstoffen und biogenem Kohlenstoff (siehe Kapitel 6.1 Biomasse).

Durch eine effiziente Kreislaufführung wird der eingesetzte biogene Kohlenstoff möglichst langfristig stofflich gebunden. Da aber nicht alle Abfallströme recycelt werden können und auch bei der Nutzung von Biomasse und chemischem Recycling unvermeidbare CO₂-Mengen anfallen, nimmt die CO₂-Abscheidung und -Speicherung in diesen Bereichen eine wichtige Rolle ein. Die stoffliche Nutzung von Biomasse verdrängt somit nicht nur fossiles Erdöl, sondern wird darüber hinaus zum Katalysator für eine langfristige Bindung von biogenem Kohlenstoff (siehe auch Kapitel 6.3 Carbon Management und Carbon Capture and Storage). Der Chemieindustrie gelingt es dadurch, mit - 19 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045 sogar bilanziell

Endenergiebedarf und Dampfbereitstellung in der chemischen Industrie (ohne stoffliche Energieträgerbedarfe)

→ Abb. 26



Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). Ohne Brennstoffeinsatz in Steamcrackern (Beiprodukt der Produktion)

klimapositiv zu werden und die sektorübergreifende Klimaneutralität über Negativemissionen überhaupt erst zu ermöglichen. Durch den Umstieg von importiertem fossilem Öl auf inländische Biomasse und Recycling verringern sich zudem Importabhängigkeiten und es entstehen neue Wertschöpfungsketten.

Auch bei dem Umstieg von fossilen auf erneuerbare Rohstoffe ist davon auszugehen, dass die Produktion von chemischen Grundstoffen an Standorten mit geringeren Energiepreisen grundsätzlich kostengünstiger ist. Es kann jedoch angenommen werden, dass erneuerbares Methanol weltweit absehbar knapp sein wird, was zu erhöhten Weltmarktpreisen führt. Zudem generieren die erzeugten Negativemissionen zusätzliche Wertschöpfung, und die inländische Produktion verringert die Abhängigkeit von Importen. In dem Szenario spielt der Import von Methanol daher erst ab 2045 eine Rolle. Ein alternatives Szenario, das auf einer größeren Verfügbarkeit von Methanolimporten beruht, wurde mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht (siehe Box „Was passiert, wenn ... Deutschland verstärkt grünes Eisen und Methanol importiert?“).

Für die Chemieparcs und die dazugehörige Infrastruktur bedeutet diese Umstellung ihrer Rohstoffbasis eine tiefgreifende Veränderung. Steamcracker, die bisher Rohbenzin auf Erdölbasis verarbeitet haben, steigen zum Teil auf Pyrolyse-Öle aus dem chemischen Recycling um, werden aber zu großen Teilen durch *Methanol to Olefins*-Anlagen zur Produktion von Kunststoffvorprodukten ersetzt. Im Bereich Dampf und Prozesswärme und bei der Abwärmenutzung gewinnen hocheffiziente Wärmepumpen stark an Bedeutung. Auch bei höheren Temperaturen bis 500 Grad gewinnt die Stromerzeugung durch hybride Dampfbereitstellungssysteme an Bedeutung: Bereits bestehende und neu zugebaute Elektrokessel werden flexibel genutzt, wobei sich ihre Nutzung an den Preisen für Strom orientiert. Die bestehenden Erdgaskessel und KWK ergänzen Elektrokessel und Wärmepumpen als Backup und werden ab 2035 mit steigenden Anteilen von Wasserstoff betrieben. Die Chemieparcs bleiben somit wichtige Energie-Hubs und

entwickeln sich zu einem integralen Bestandteil der Strom- und Wasserstoffinfrastruktur. Durch die zunehmende Interaktion mit dem Strommarkt sind industrielle Kraftwerke strukturell vor allem in den Wintermonaten von Bedeutung, wenn Strom aus Erneuerbaren Energien deutlich knapper und damit teurer ist.

Zementindustrie: Klinkereffizienz und CCS

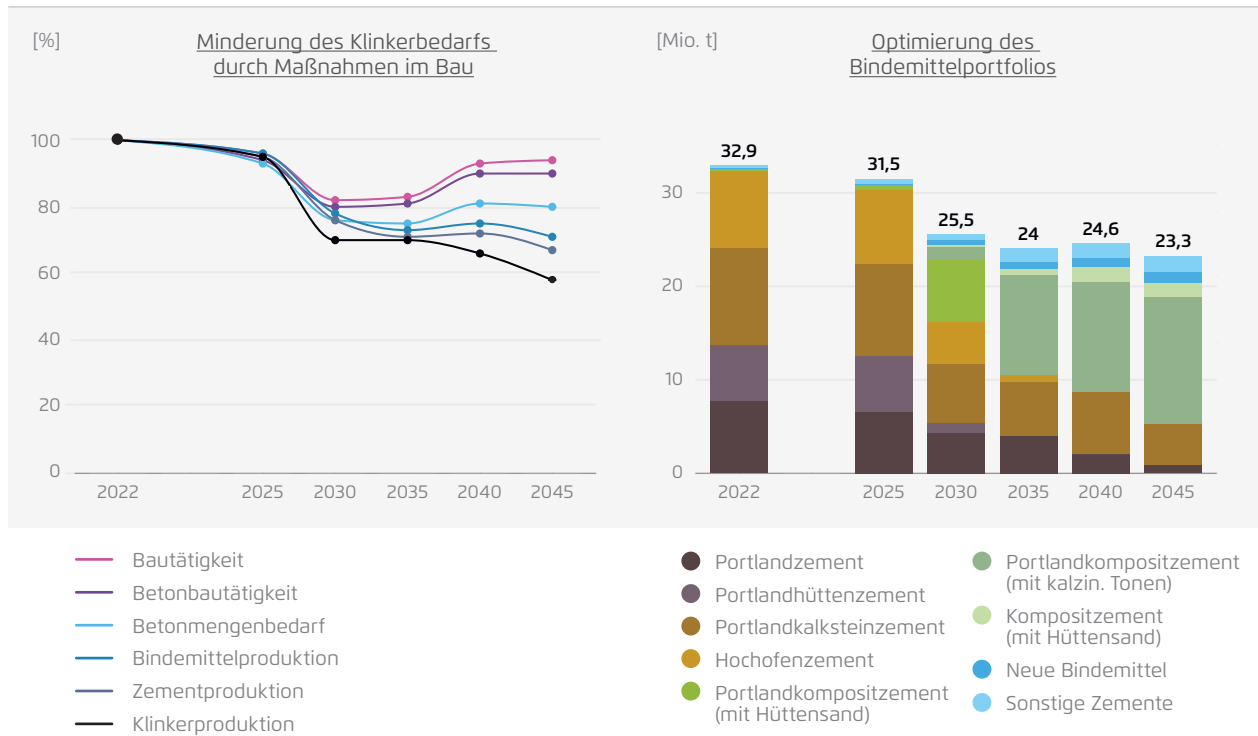
Für die Zementindustrie ergibt sich durch steigende CO₂-Preise und das Auslaufen der freien Zuteilung von ETS-Zertifikaten ein wachsender wirtschaftlicher Anreiz, den Einsatz von Zementklinker¹⁷ zu reduzieren, alternative Brennstoffe einzusetzen sowie CO₂ abzuscheiden und zu speichern (*Carbon Capture and Storage*; CCS). Bezogen auf die Produktionsmengen im Jahr 2022 sinkt die Bindemittelproduktion (Zemente und neue Bindemittel) bereits bis zum Jahr 2030 um rund ein Viertel. Etwa zwei Drittel dieser Minderung gehen auf einen geringeren Neubaubedarf aufgrund einer langsamer wachsenden Bevölkerung und einer längeren Nutzung bestehender Gebäude sowie auf vermehrten Holzbau zurück (vergleiche Kapitel 5.3 Gebäude). Das verbleibende Drittel wird durch Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette Betonbau erreicht: materialeffizienter Einsatz von Beton in Bauteilen (materialeffiziente Planung, Gradientenbeton, Hohlkörper, Carbonbeton, vorgespannte Decken und andere) sowie effizienterer Einsatz von Bindemitteln in Beton (Abbildung 27). Der durchschnittliche Klinkeranteil in Zementen sinkt zudem bis zum Jahr 2030 von circa 71 Prozent im Jahr 2021 auf 64 Prozent. Dies gelingt vor allem durch den Einsatz von innovativen Zementen mit reduziertem Klinkeranteil (beispielsweise Portlandkompositzemente CEM II/C-M; Abbildung 27).

Auch nach 2030 entwickelt die Zementindustrie die Klinkereffizienz entlang der gesamten

¹⁷ Zementklinker ist für die bindenden Eigenschaften von Zementen von zentraler Bedeutung und seine Herstellung ist aufgrund der damit verbundenen prozessbedingten CO₂-Emissionen sowie der erforderlichen großen Mengen an Hochtemperaturwärme für nahezu die gesamten direkten CO₂-Emissionen der Zementherstellung verantwortlich.

Minderung des Klinkerbedarfs durch Maßnahmen im Bau und Optimierung des Bindemittelportfolios

→ Abb. 27



Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

Wertschöpfungskette Betonbau intensiv weiter, sodass der Klinkerbedarf trotz einer in diesem Zeitraum wieder zunehmenden Bautätigkeit (getrieben durch den Tiefbau) und des überwiegenden Wegfalls von Hüttensand¹⁸ aus den Hochöfen der Stahlindustrie weiter gesenkt werden kann. Der durchschnittliche Klinkeranteil in Zementen sinkt bis zum Jahr 2045 weiter auf rund 60 Prozent, wofür der Einsatz von innovativen Zementen mit reduziertem Klinkeranteil stark ausgeweitet wird. Insgesamt beträgt die Klinkerproduktion im Jahr 2045 bei ähnlicher Bautätigkeit (94 Prozent des Niveaus von 2022) nur noch knapp 60 Prozent der Produktionsmenge des Jahres 2022.

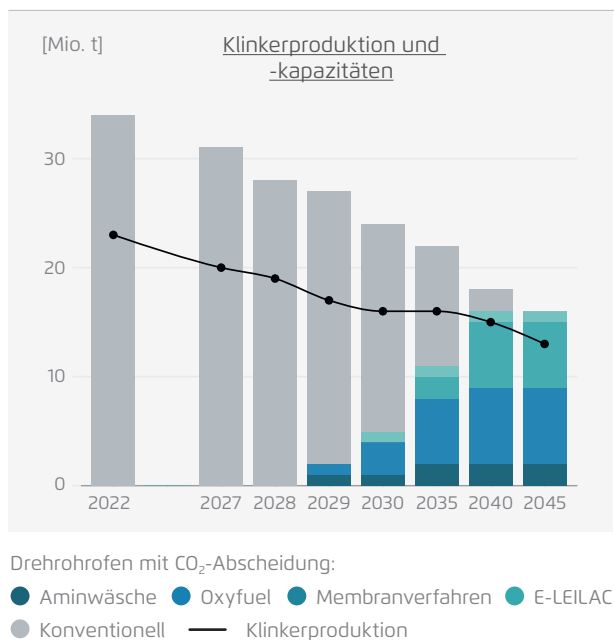
Im Zuge der Reduktion des Klinkerbedarfs gelingt eine zügige Skalierung der Verwendung abfall-basierter Brennstoffe (ABS) von 72 Prozent des gesamten Brennstoffeinsatzes im Jahr 2022 auf über 90 Prozent im Jahr 2030, da die bereits heute verfügbaren ABS-Mengen (mehr als) ausreichen, um den verringerten Energiebedarf der verbleibenden Klinkerproduktion zu decken. Langfristig werden Kunststoffabfälle vermehrt recycelt, wodurch geringere Mengen für die thermische Nutzung in Zementklinkeröfen zur Verfügung stehen. ABS werden daher um knapp zehn Prozent Biomasse ergänzt. Der Wärmebedarf der Klinkerherstellung wird so nahezu vollständig durch alternative Brennstoffe gedeckt. Der an einem Ofen genutzte Leilac-Kalzinator (siehe folgender Abschnitt und Abbildung 28) wird elektrifiziert.

¹⁸ Neuartige Hüttensande aus Einschmelzern der Stahlindustrie können auch in der Zementproduktion genutzt werden, stehen jedoch nur in vergleichsweise kleinen Mengen (etwa 0,8 Mio. t ab 2035, gegenüber 7,1 Mio. t Hüttensand im Jahr 2022) zur Verfügung.

Um die Belastung der Atmosphäre durch die verbleibenden prozessbedingten CO₂-Mengen zu vermeiden sowie biogene CO₂-Mengen aus der Wärmeerzeugung für Negativemissionen zu nutzen, kommt

der CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) eine wichtige Rolle zu. Der Aufbau von Abscheideanlagen erfolgt ab 2027 zeitlich gestaffelt. Im Szenario werden zunächst Amin-basierte CO₂-Abscheideverfahren, an einem Standort das Leilac-Verfahren und – bei Ofenneubauten – das Oxyfuel-Verfahren eingesetzt. Die energieintensive Aminwäsche wird dabei als Teilabscheidung in Abhängigkeit von am Standort verfügbarer Abwärme dimensioniert,¹⁹ und im späteren Verlauf durch innovative energieeffiziente Verfahren (in dem Szenario stellvertretend ein Membran-basiertes Verfahren) ergänzt, um eine möglichst vollständige CO₂-Abscheidung zu erreichen. Diese innovativen energieeffizienten Verfahren werden ab circa 2035 zunehmend bei der CO₂-Abscheidung eingesetzt (Abbildung 28).

Hochlauf der CO₂-Abscheidung → Abb. 28 in der Klinkerproduktion



Agora Energiewende, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). Membranverfahren stehen stellvertretend für verschiedene innovative Verfahren zur CO₂-Abscheidung

¹⁹ Die Bereitstellung von Wärme für die Regeneration der Amine ist ein zentraler Kostenfaktor bei Amin-basierten Verfahren zur CO₂-Abscheidung. In Anlehnung an die weltweit erste CO₂-Abscheideanlage in industriellen Maßstab an einem Zementwerk in Brevik (Schweden) wird angenommen, dass die Abwärme an den jeweiligen Standorten ausreicht, um 50 Prozent des entstehenden CO₂ mittels eines Aminwäsche-Verfahrens abzuscheiden.

Insbesondere in der Anfangsphase erfolgt der CO₂-Transport zu den CO₂-Speicherstätten auch per Bahn und Binnenschiff. Der CCS-Hochlauf ist deshalb nicht durch das Tempo des CO₂-Pipeline-Aufbaus begrenzt. Langfristig ist der Transport per Pipeline jedoch wirtschaftlich vorteilhaft, und CO₂-Transportkosten werden zu einem wichtigen Standortfaktor im Wettbewerb um die Produktion der verbleibenden Klinkermengen. Der Hochlauf der Anlagen zur CO₂-Abscheidung ist im Szenario bis 2040 abgeschlossen, wobei ein Ofen ohne Abscheidung erst nach 2040 stillgelegt wird, wenn dessen Produktionskapazitäten aufgrund des sinkenden Klinkerbedarfs nicht mehr benötigt wird. Das Potenzial der sogenannten Mineralisierung zur Einbindung abgeschiedener CO₂-Mengen durch innovative Prozesse in der Zement-/Beton-industrie ist aus heutiger Sicht schwer abschätzbar. Sie spielt daher im vorliegenden Szenario und insbesondere für die Dimensionierung der CO₂-Infrastruktur eine vernachlässigbare Rolle.

Andere energieintensive Industrie (Glas, Kalk, Papier, Aluminium und andere): Elektrifizierung und CO₂-neutrale Brennstoffe

Die Produktion der **Glasindustrie** erholt sich und bleibt langfristig insgesamt in etwa auf dem Niveau von 2022. Steinwolle wird im Szenario vollständig und Glaswolle zur Hälfte durch biogene Dämmstoffe (Holzwolle) ersetzt. Die Hälfte dieser Entwicklung findet bereits bis 2030 statt. Dieser Rückgang bei den Dämmstoffen wird durch leichte Zuwächse bei Behälter- und Flachglas in etwa ausgeglichen. Die Minderung der CO₂-Emissionen der Glasindustrie erfolgt primär durch die Elektrifizierung der Wärmebereitstellung und den Einsatz CO₂-neutraler Brenngase. Ein großer Teil der heutigen Glasschmelzwannen wird zu Hybridwannen weiterentwickelt, in denen der Stromanteil am Energieeintrag in die Glasschmelze langfristig bei jeweils 75 Prozent (Behälterglas, Spezialglas) beziehungsweise 45 Prozent (Flachglas) liegt (Leisin und Radgen 2022). In den Hybridwannen der Behälter- und Spezialglasindustrie wird das ergänzende Brenngas in Form von Biogas über regionale Infrastrukturen bereitgestellt. In der Flachglasindustrie wird aufgrund der größeren Wannen sowie des

höheren Brenngasanteils und der damit verbundenen größeren Energiemengen Wasserstoff eingesetzt, der über Pipelines bereitgestellt wird. Einige kleinere Glasschmelzwannen der Behälterglasindustrie sowie Wannen für die Herstellung von Glasfasern werden durch vollelektrische Wannen ersetzt. Nach 2035 sinken zudem prozessbedingte Emissionen (derzeit etwa 25 Prozent²⁰ der Gesamtemissionen des Sektors), da in zunehmendem Maße Calciumcarbonat (CaCO_3), das in der Glasherstellung als Stabilisator eingesetzt wird, durch bereits entsäuertes und somit CO_2 -freies Calciumoxid (CaO) ersetzt wird, welches in Kalkwerken unter Einsatz von CCS hergestellt wird. Hierdurch sinken die prozessbedingten CO_2 -Emissionen der Glasindustrie bis 2045 um 40 Prozent gegenüber heute. Insgesamt gelingt es der Glasindustrie, ihre Emissionen von 3,5 Mio. t CO_2 im Jahr 2022 auf 0,5 Mio. t im Jahr 2045 zu reduzieren.

Die **Kalkindustrie** verliert durch den Kohleausstieg in der Stromerzeugung und in der Stahlbranche sowie durch eine verminderte Nachfrage im Bau bis 2035 (gegenüber 2022) rund 20 Prozent ihrer Absatzmärkte für Branntkalk. Etwa ein Drittel der freiwerdenden Produktionskapazitäten wird im weiteren Zeitverlauf genutzt, um Calciumoxid (CaO) für die Glasindustrie zu produzieren. Die heute in der Kalkindustrie als Brennstoff eingesetzte Braunkohle ist im Szenario aufgrund der auslaufenden Braunkohleverstromung und der damit verbundenen Stilllegung der Tagebauten mittelfristig nicht mehr verfügbar. Die Kalkindustrie steigt ab 2026 auf Biomasse um und stillt bis 2030 mehr als 20 Prozent ihres Energiebedarfs durch Biomasse. Der vollständige Ausstieg aus der Braunkohlenutzung erfolgt bis 2035 und der Ausstieg aus allen anderen fossilen Energieträgern (vor allem Steinkohle und Erdgas) bis 2040. Feste Energieträger werden durch Biomasse ersetzt und gasförmige Energieträger durch (regionales) Biogas.

Anderweitig nicht vermeidbare prozessbedingte CO_2 -Mengen (rund drei Millionen Tonnen CO_2) werden – ähnlich wie in der Zementbranche – abgeschieden und geologisch gespeichert (CCS). Ein erstes

großes CCS-Projekt wird im Szenario im Einklang mit aktuellen Planungen bereits bis 2030 realisiert. Der weitere Hochlauf von CCS erfolgt anschließend schrittweise bis 2045. Langfristig werden nicht alle Standorte einen Anschluss an eine CO_2 -Pipeline erhalten. Von einigen Standorten erfolgt der CO_2 -Abtransport auch langfristig mit der Bahn. Durch die Kombination von Bioenergie und CCS sichert die Kalkindustrie langfristig Negativemissionen (minus eine Million Tonnen CO_2 im Jahr 2045).

In der **Papierindustrie** ist der Einsatz von Wärmepumpen für die Bereitstellung von Prozessdampf der zentrale Hebel für die Minderung der CO_2 -Emissionen. Langfristig erzeugen diese in etwa die Hälfte der Prozesswärme. Die andere Hälfte wird – ähnlich wie heute – zu großen Teilen durch die thermische Nutzung biogener Reststoffe aus der Papierherstellung sowie zu kleineren Teilen durch E-Kessel erzeugt.

In der **Aluminiumindustrie** (Primäraluminiumherstellung) wird die Entstehung prozessbedingter Emissionen aus Anodenabbrand durch den Einsatz inerter Anoden vermieden.

In der **restlichen energieintensiven Industrie** erfolgt der vollständige Ausstieg aus fossilen Energieträgern bis 2040. Für die Prozesswärmebereitstellung kommen alternative Technologien zum Einsatz, die auf Anwendungen und Temperaturniveaus abgestimmt sind (Elektrifizierung, Bioenergie, Wasserstoff).

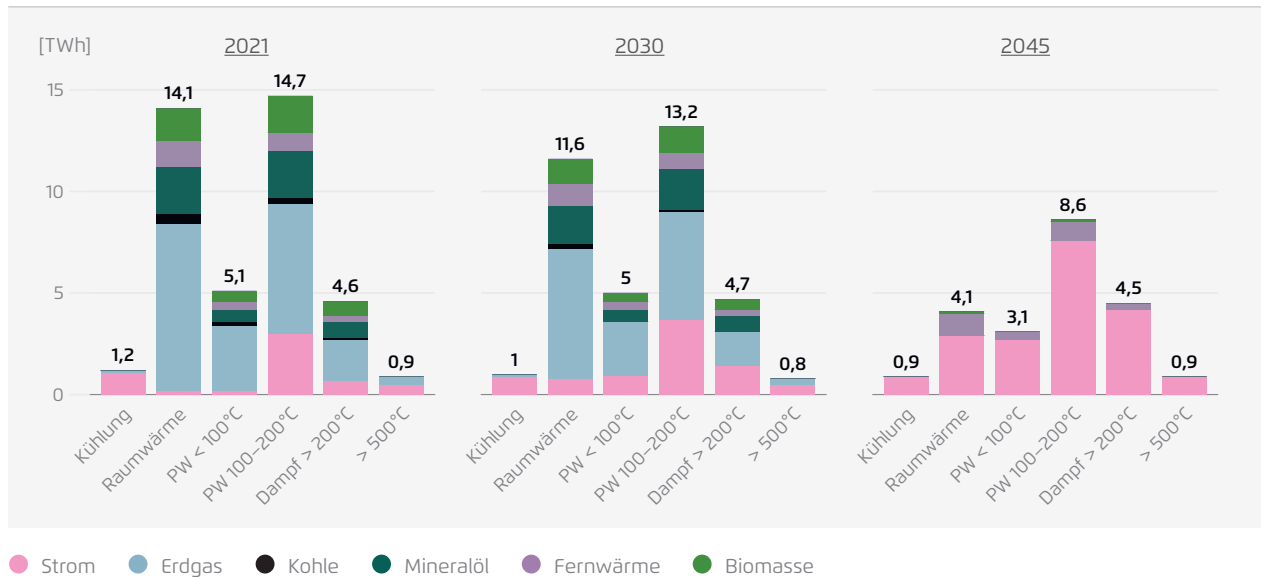
Sonstiges verarbeitendes Gewerbe

Weitere, weniger energieintensive Branchen mit in Summe erheblichen absoluten Energiebedarfen sind die **Nahrungsmittelindustrie** sowie der **Maschinen- und Fahrzeugbau**. Anders als in den vorausgehend beschriebenen Branchen sind die Bedarfe deutlich weniger räumlich konzentriert und es wird (neben Strom aus erneuerbaren Energiequellen) Wärme im Temperaturbereich unter 500 Grad, meist sogar unter 200 Grad benötigt. Somit kann die Querschnittstechnologie Hochtemperatur-Wärmepumpe bei der Transformation dieser Branchen ihre Effizienzvorteile ausspielen. Sie stellt den zentralen Hebel für

²⁰ Eigene Berechnung.

Endenergieeinsatz für Wärme und Kühlung in der Nahrungsmittelproduktion, im Maschinen- und Fahrzeugbau und sonstigen Branchen

→ Abb. 29



Agora Industrie, Wuppertal Institut, Universität Kassel und Prognos (2024). PW = Prozesswärme

Emissionsminderungen der Industrie „in der Fläche“ dar. Abbildung 29 illustriert die Entwicklung der Wärme- und Kältebereitstellung in den Branchen bis 2045 und zeigt die bis dahin bereits weitgehend erfolgte Elektrifizierung.

Industrieseitig liegt die hauptsächliche Herausforderung kurzfristig in der Skalierung der Fertigungskapazitäten für Hochtemperatur-Wärmepumpen sowie in den Entscheidungs- und Planungsprozessen für entsprechende Investitionen. Wie auch für den Gebäude- und Mobilitätsbereich müssen Engpässe in den Stromverteilnetzen schnell durch entsprechende Ausbauten beseitigt werden.

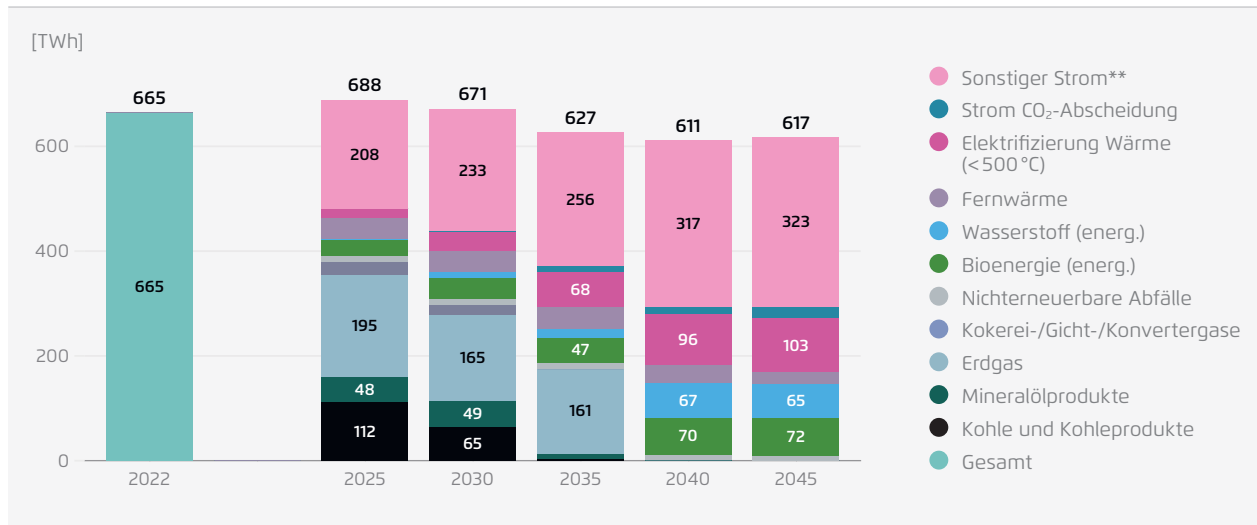
Im Kontext der Transformation zur Klimaneutralität wird neuen Industriezweigen eine größere Bedeutung zukommen. Dies betrifft etwa die Fertigung von Batterien für Elektrofahrzeuge. Der durch deutsche Hersteller angekündigte Kapazitätsaufbau in Deutschland wurde in der Modellierung berücksichtigt und zeigt sich in einem zusätzlichen Strombedarf in Höhe von 37 TWh. Ganz überwiegend ist dieser auf die Erzeugung von Prozessdampf zurückzuführen, der zu großen Teilen durch Wärmepumpen bereitgestellt wird.

5.2.4 Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen

Die Veränderung des Endenergieverbrauchs (EEV) der Industrie im Zuge der Transformation ist geprägt von der Elektrifizierung eines großen Teils der Prozesswärme. Der Stromanteil am EEV erreicht ausgehend von 30 Prozent im Jahr 2022 im Jahr 2045 73 Prozent. Im Gegenzug wird die Nutzung fossiler Energieträger in Industrieprozessen bis zum Jahr 2040 beendet – die Nutzung von Kohle (nahezu vollständig) bereits bis zum Jahr 2035. Ein großer Teil des zusätzlichen Stroms wird für die Elektrifizierung von Prozesswärme im Temperaturbereich bis 500 Grad genutzt (103 TWh im Jahr 2045). Hierbei spielen Wärmepumpen für die Wärmebereitstellung im Temperaturbereich bis 200 Grad eine zentrale Rolle. Die CO₂-Abscheidung im Industriesektor erzeugt zusätzlichen Strombedarf, der im Jahr 2045 22 TWh erreicht. Neben Strom spielen langfristig Bioenergie und Wasserstoff bei einigen Hochtemperaturanwendungen eine wichtige Rolle. Insgesamt sinkt der EEV (ohne Einbezug von Umweltwärme und Abwärme) im Zeitverlauf vor allem durch Effizienzgewinne leicht auf 93 Prozent im Jahr 2045 bezogen auf den EEV im Jahr 2022 (vergleiche Abbildung 30).

Entwicklung des Endenergieverbrauchs* in der Industrie

→ Abb. 30



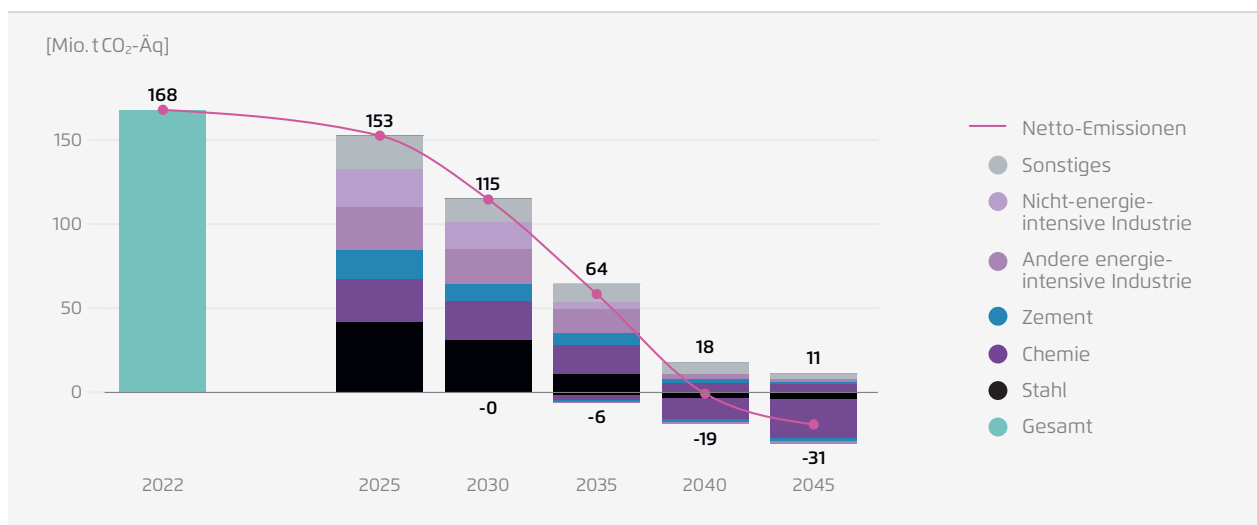
Agora Industrie, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024), historische Daten: AG Energiebilanzen (2024). * gemäß Abgrenzung der AG Energiebilanzen (AGEB); ** Sonstiger Strom umfasst den herkömmlichen industriellen Strombedarf, zusätzlichen Strom für Elektrifizierung von Prozesswärme oberhalb von 500 °C sowie für neu angesiedelte Industrien, insbesondere die Batterie- und Chipherstellung.

Die Treibhausgasemissionen sinken bis 2030 auf 115 Mio. t CO₂-Äq, womit das Sektorziel leicht übererfüllt wird (vergleiche Abbildung 31). Bis 2040 ist der Industriesektor im Szenario netto-klimaneutral. Restemissionen aus nicht abgeschiedenen Prozessemissionen, industriellen Kraftwerken sowie aus der Nutzung von fluorierten Treibhausgasen und der Produktnutzung werden durch Negativemissionen kompensiert, die aus der Nutzung

von Biomasse in der Chemie- und Stahlindustrie resultieren (siehe Kapitel 6.3 Carbon Management und Carbon Capture and Storage). Bis 2045 erreicht der Sektor durch fortgesetzte Anstrengungen bei der Vermeidung von Restemissionen und bei der Erzeugung von Negativemissionen eine Nettobilanz von - 19 Mio. t CO₂-Äq und trägt damit maßgeblich zur Bereitstellung von Negativemissionen für Deutschland bei.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Industrie

→ Abb. 31



Agora Industrie, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024), historische Daten: Umweltbundesamt (2024)

→ Infobox 4: Was passiert, wenn ... Deutschland verstärkt grünes Eisen und Methanol importiert?

Das Alternativszenario bildet die Möglichkeit ab, dass sich zügig internationale Märkte für klimaneutrale energieintensive Vorprodukte bilden. In diesem Fall könnte es statt dem Erhalt der gesamten Grundstoffindustrie in Deutschland zu verstärkten Importen kommen. Zu diesen Vorprodukten zählen direkt reduziertes Eisen (DRI), das den weitaus höchsten Energiebedarf in der Stahlwertschöpfungskette hat (Agora Industrie und Wuppertal Institut 2023), und erneuerbares Methanol für die Produktion von Chemikalien. Beide Produkte lassen sich vergleichsweise günstig über die Weltmeere transportieren. Bestehende Anlagen zur Weiterverarbeitung bleiben aufgrund ihrer hochspezialisierten Fertigung und der Marktnähe zu wichtigen Hochqualitätsstahlabnehmern sowie den qualifizierten Fachkräften weiterhin konkurrenzfähig und verbleiben in Deutschland. Der Import kostengünstiger Vorprodukte könnte die Gesamtkosten einer klimaneutralen Produktion senken und zu erheblichen Einsparungen von Strom, Wasserstoff und Dampf sowie einem verminderten CO₂-Infrastrukturbedarf führen.

In der **Stahlbranche** werden zunächst die derzeit in Deutschland geplanten und mit Förderzusagen ausgestatteten DRI-Projekte realisiert. Die bis dahin aufgebauten Kapazitäten finden in einem kleinen Weltmarkt für grünes DRI eine Nachfrage. Ab 2030 verhindert jedoch der zunehmende Wettbewerbsdruck durch günstigere DRI-Importe den weiteren Aufbau von DRI-Kapazitäten in Deutschland. Auf der nächsten Erzeugungsstufe der Stahlherstellung wird der Ausbau der Elektrolichtbogenöfen unverändert fortgesetzt. Das in diesen Anlagen eingesetzte direkt reduzierte Eisen wird aber überwiegend über Importe bezogen.

Der verringerte Bedarf an Reduktionsgas kann vollständig über Wasserstoff gedeckt werden, sodass deutlich weniger Erdgas eingesetzt werden muss. Der **Wasserstoffeinsatz in der Stahlindustrie** steigt bis 2030 stark und bis 2035 noch weiter leicht an. Ab 2035 geht von der Stahlindustrie kein weiterer Zubau-Bedarf im Bereich der Wasserstoffinfrastruktur aus. Im Jahr 2040 setzt die Stahlindustrie mit etwa 16 TWh Wasserstoff nur knapp 40 Prozent der im Basisszenario angenommenen Menge ein.

Ein weiterer Effekt der geringeren DRI-Herstellung in Deutschland ist, dass sich auch die **Anforderungen an die CO₂-Infrastruktur** im Vergleich zum Basisszenario verringern. Im Basisszenario spielen mit Erdgas und CCS betriebene DRI-Anlagen eine wichtige Rolle zur Erreichung der Treibhausgas (THG)-Minderungsziele im Jahr 2035 – in der Sensitivität entfällt ein großer Teil dieses Bedarfs durch den Import von DRI und die damit einhergehende verringerte Nutzung von Erdgas (Tabelle 7).

Für die **Chemiebranche** wurde analog untersucht, welche Effekte die Verfügbarkeit von günstigem erneuerbarem Methanol auf dem Weltmarkt auf die heimische Produktion haben könnte. Es wird in der Sensitivität davon ausgegangen, dass der für eine heimische Methanolproduktion erforderliche Aufbau von Biomassewertschöpfungsketten aufgrund von Verzögerungen beim hierfür notwendigen Umbau in der Land- und Forstwirtschaft, der hohen Material- und Energiekosten der biobasierten Kunststoffproduktion und der erforderlichen CO₂-Infrastruktur unzureichend erfolgt. Tabelle 8 fasst Einsparungen im heimischen Energiesystem zusammen, die sich durch Importe von erneuerbarem Methanol als Chemierohstoff ergeben würden.

Insgesamt lässt sich durch den vermehrten Import von DRI und Methanol der inländische Wasserstoffeinsatz im Jahr 2035 um 3 TWh senken, was einem Anteil von acht Prozent des gesamten industriellen Wasserstoffbedarfs im Basisszenario entspricht. 2040 beträgt die Einsparung 32 TWh (beziehungsweise 36 Prozent) und 2045 liegt sie bei 35 TWh (35 Prozent). Mögliche sozioökonomische Effekte infolge verstärkter Importe, etwa auf die lokale Wertschöpfung oder Arbeitsplätze, wurden in dieser Studie nicht untersucht.

Vergleich von Basisszenario und Sensitivität für Importe in der Stahlindustrie

→ Tabelle 7

	2030		2035		2040		2045	
	Basis	Sensitivität	Basis	Sensitivität	Basis	Sensitivität	Basis	Sensitivität
DRI-Produktion [Mio. t]	9,9	7,1	23,9	7,6	23,9	7,1	21,9	6,7
DRI-Import [Mio. t]	0	2,9	0	16,3	0	16,8	2,1	17,3
Inländischer Wasserstoffbedarf in DRI-Anlagen [TWh]	12,5	11,7	13,9	12,3	41,0	15,8	36,9	15,0
Inländischer Erdgasbedarf in DRI-Anlagen [TWh]	7,7	3,7	40,0	4,0	0	0	0	0

Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

Vergleich von Basisszenario und Sensitivität für Importe in der Chemieindustrie

→ Tabelle 8

	2030		2035		2040		2045	
	Basis	Sensitivität	Basis	Sensitivität	Basis	Sensitivität	Basis	Sensitivität
Methanolproduktion (für Polymere) [Mio. t]	0	0	4,9	4	8,3	4	13,6	5,7
Methanolimport [Mio. t]	0	0	0	0,8	0	4,3	0	7,8
Inländische Biomassenutzung für Methanolproduktion [Mio. t]	0	0	1,5	0	14,4	0	14,4	0
Inländischer Wasserstoffbedarf für Methanolproduktion [TWh]	0	0	8,6	7,2	14,6	7,3	24,9	11,7

Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

5.2.5 Zentrale Weichenstellungen

Die Umstellung großer Produktionsanlagen erfordert Vorlauf. Um im Jahr 2040 klimaneutral zu sein, muss die Industrie Investitionsfenster für die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung, den Einstieg in die Wasserstoffnutzung und den Umstieg von fossilen auf erneuerbare Rohstoffe in der Chemieindustrie nutzen. Finanzielle Anreize sind notwendig, um die Substitution fossiler Ressourcen zu unterstützen. Darüber hinaus braucht die

Industrie Planungs- und Investitionssicherheit sowie Zugang zu Finanzierungs- und Absicherungsinstrumenten, unter anderem durch die Fortführung und Ausweitung der Klimaschutzverträge. Damit Strom zum zentralen Energieträger werden kann, gilt es, seine Wirtschaftlichkeit gegenüber Gas zu stärken, beispielsweise durch Anreize für einen flexiblen Stromverbrauch. Tabelle 9 zeigt eine Auswahl der wichtigsten Schritte, damit die Entwicklungen im Szenario umgesetzt werden können.

Zentrale Weichenstellungen im Sektor Industrie

→ Tabelle 9

Weichenstellung	Zeitpunkt spätestens
Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Elektrifizierung von Wärme durch Investitionsförderung (zunächst prioritär für industrielle Wärmepumpen und für E-Kessel im Flex-Betrieb)	2025–2027*
Fortführung der Klimaschutzverträge, Ausweitung auf weitere Anwendungsbereiche (bspw. Dampferzeugung) und Erweiterung um vereinfachte Variante für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), um Investitionen in Prozessinnovationen abzusichern. Sicherstellung einer ausreichenden Finanzierung	2025–2027
Entlastung des Strompreises durch Fortführung der Stromsteuersenkung und Fortführung der Strompreiskompensation	2025–2027
Stärkung des mechanischen Recyclings durch Quoten, ergänzend Einführung chemischen Recyclings. Anreize für Recycling und Recycling-gerechtes Produktdesign	2025–2027
Priorisierung der Nutzung von Biomasse für stoffliche Nutzung und Hochtemperaturwärme. Harmonisierung bestehender Regularien und Strategien	2025–2027
Entwicklung eines konsistenten regulatorischen Rahmens, der CCS ermöglicht und Klarheit über zukünftige CO ₂ -Infrastruktur schafft	2025–2027
Einführung von Preissignalen für die Substitution fossiler Rohstoffe durch kurzfristig Recycling und mittelfristig durch Biomasse. Langfristig Pönalisierung der Nutzung fossiler Rohstoffe	2025–2029
Wasserstoffpipelines erreichen erste Stahlwerke; Bereitstellung ausreichender Mengen erneuerbaren Wasserstoffs	2027–2033
Schaffung von Absatzmärkten für klimafreundlich hergestellte Produkte (grüne Leitmärkte) durch Labels für klimafreundliche Grundstoffe, Mindestanforderungen für Produktgruppen (EU-Ökodesign-Richtlinie) und Vorgaben für die öffentliche Beschaffung	2027–2033
Ende der CO ₂ -Zertifikatsausgabe im EU-ETS	2039

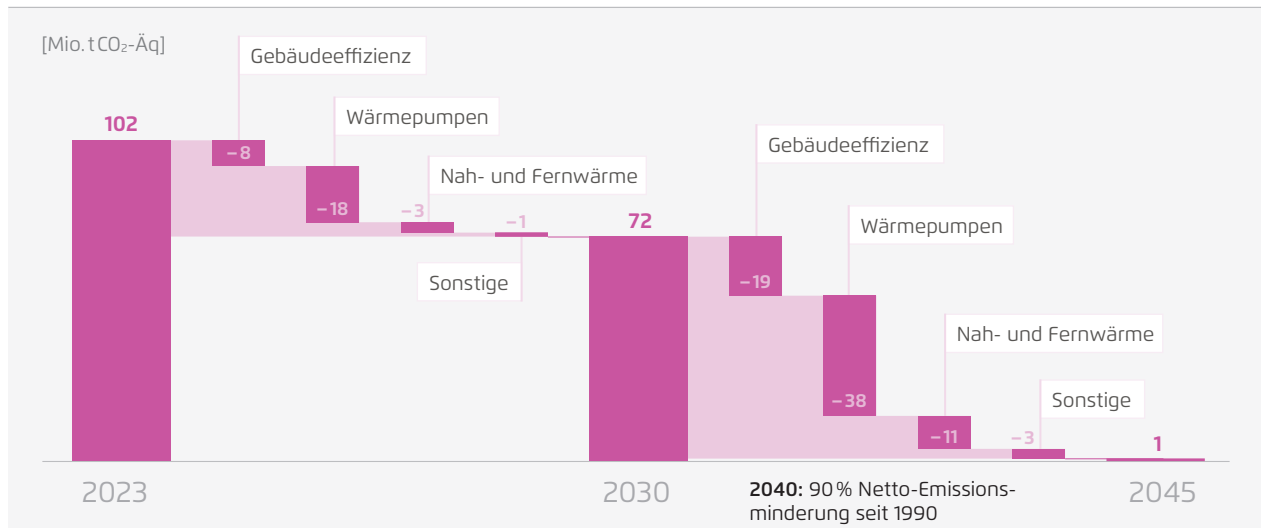
Agora Industrie, Wuppertal Institut und Universität Kassel. *Modellierter Maßnahmenbeginn ist 2026.

5.3 Gebäude

5.3.1 Übersicht

Gebäudesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. 32



Agora Energiewende und Prognos (2024)

Gebäudesektor – Trends und Instrumente

Leicht steigende Bevölkerung, weniger Erwerbstätige

- Bevölkerung steigt bis 2030 auf 85,1 Mio. und nimmt danach leicht ab (2045: 84,5 Mio.)
- Bevölkerung wird älter, Anzahl der Personen im erwerbstätigen Alter nimmt ab

Bedarfsgerecht bauen

- Bereitstellung von ausreichend Wohn- und Gewerberaum in hoher Qualität durch Neubau und Maßnahmen am Gebäudebestand

Umstellung und Dekarbonisierung der Wärmeversorgung

- Zahl der Wärmepumpen steigt bis 2030 auf rund 6 Mio. und bis 2045 auf über 15 Mio.
- Luft-Luft-Wärmepumpen beschleunigen den Hochlauf
- Anzahl der mit Nah- oder Fernwärme versorgten Gebäude steigt bis 2030 auf 2,2 Mio. und bis 2045 auf 3,8 Mio.

- ⚙️ Instrumente: CO₂-Bepreisung; Weiterentwicklung der Förderung von Wärmepumpen und Wärmenetzen; keine weitere Förderung für Öl-, Gas- und Biomassekessel; flächendeckend verfügbare vergünstigte Stromtarife für Wärmepumpen

Senkung des Energieverbrauchs – Fokus auf Raumwärme

- Erhöhung der Sanierungsrate auf rund 1,6 Prozent bis 2030
- Höhere Anlagennutzungsgrade und geringere Verteil- und Speicherverluste
- Reduktion des spezifischen Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser: bis 2045 um 34 Prozent gegenüber 2023

- ⚙️ Instrumente: Weiterentwicklung der Förderung im Rahmen der BEG; Einführung von Mindestanforderungen an Bestandsgebäude; unterstützend: serielle Sanierungen und Sanierungssprints

Gebäudesektor – Kernindikatoren

	2023	2030	2045
Bevölkerung			
Bevölkerung [Mio.]	84,4	85,1	84,5
Erwerbstätige im Sektor GHD [Mio.]	39,3	38,6	37,7
Wohnungen [Mio.]	43,4	44,1	45,1
Heizungsinfrastruktur			
Wärmepumpen [Mio.]	1,7	6	15,7
Nah- und Fernwärme – versorgte Gebäudefläche [Mio. m ² Gebäudenutzfläche AN]	723	950	1847
Gebäudesanierung			
Sanierungsrate (Vollsanierungsäquivalente) [%]*	1,1	1,6	1,5
Spezifischer Verbrauch Raumwärme und Warmwasser, Gebäudebestand [kWh/m ²]	120	103	79
Energieverbrauch			
Endenergieverbrauch [TWh]	943	863	700
Stromverbrauch [TWh]	252	263	283
Stromverbrauch Wärmepumpen [TWh]	12	41	85
Emissionen			
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq]	102	72	0,8
KSG-Ziel**	n/a	66	n/a

Prognos. * Die Sanierungsrate für 2023 ergibt sich als modellbasierte Fortschreibung einer umfassenden Erhebung von IWU (2018). Jüngere Erhebungen kommen teils zu anderen Ergebnissen, so BuVEG (2023) mit 0,8 Prozent. Einen ähnlichen Wert weist jedoch Ariadne (2024) mit gut 1,0 Prozent für selbstnutzende Eigentümer aus. ** Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6).

5.3.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage

Die **Treibhausgasemissionen** des Gebäudesektors umfassen entsprechend dem Klimaschutzgesetz (KSG) die Emissionen der Sektoren Private Haushalte (PHH; CRF 1.A.4 b) sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD; CRF 1.A.4 a).²¹ Treibhausgase aus Strom und leitungsgebundener Wärme werden im Sektor Energiewirtschaft verbucht. Bei der

Darstellung des Energieverbrauchs wird im Szenario jedoch die gesamte im Gebäudesektor verbrauchte Energie dargestellt, einschließlich Strom, leitungsgebundener Wärme, Solar- und Umweltwärme. So entsteht ein vollständiges Bild der tatsächlichen Nutzung im Gebäudesektor.²²

Im Jahr 2022 entfielen 71 Prozent des Energieverbrauchs und rund 76 Prozent der Treibhausgas- (THG-)Emissionen des Gebäudesektors auf die privaten Haushalte. Rund drei Viertel des Energieverbrauchs wurden für Raumwärme und Warmwasser aufgewendet; hiervon wiederum wurden zwei

²¹ CRF: Common Reporting Format: Kennzeichnung zur Gliederung der THG-Emissionen in den Nationalen Inventarberichten (NIR). Hinzu kommen die verbrennungsbedingten Emissionen des militärischen Bereichs (CRF 1.A.4 c). Im Gegensatz zur Energiebilanz wird der bauseitliche Verkehr im NIR nicht dem GHD-Sektor, sondern dem Industriesektor zugerechnet. In der Energiebilanz (und im NIR) umfasst der Sektor GHD außerdem den Energieverbrauch, respektive die energiebedingten THG-Emissionen des Sektors Landwirtschaft.

²² Entsprechend der Systematik der Energiebilanz fällt darunter als Teil des Sektors GHD auch die Beleuchtung von Straßen und Infrastrukturen sowie Prozessenergie im Gewerbe.

Drittel durch die fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl gedeckt. Insgesamt wurden über 50 Prozent der im Gebäudesektor verbrauchten Energie fossil erzeugt. 27 Prozent entfielen auf Strom, 15 Prozent auf Solarthermie, Umweltwärme und Biomasse (im Wesentlichen Holz) und 6 Prozent auf die leitungsgebundene Wärme. Witterungsbedingt schwanken der Energieverbrauch und die THG-Emissionen teilweise deutlich zwischen den Jahren.

Die THG-Emissionen des Gebäudesektors verringerten sich zwischen 1990 und 2023 von 210 Mio. t CO₂-Äq auf rund 102 Mio. t CO₂-Äq (-51 Prozent). Der Rückgang in den 1990er-Jahren war insbesondere auf die Reduktion der Wärmeerzeugung mit Kohle zurückzuführen. Ab etwa dem Jahr 2000 nahm auch der Verbrauch an Heizöl ab. Wichtige Maßnahmen zur Senkung der THG-Emissionen waren außerdem die gesteigerte Effizienz der Gebäudehülle und der Wärmeerzeuger sowie das Aufkommen von Heiztechnologien auf Basis Erneuerbarer Energien (unter anderem elektrische Wärmepumpen, Holzheizungen, Solarthermie).

Chancen, Herausforderungen und Handlungsansätze

Durch die Wirkung der politischen Maßnahmen, unter anderem im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2019, der Sofortprogramme 2022 und 2023, aber auch aufgrund des 2024 in Kraft getretenen Wärmeplanungsgesetzes („Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze“, WPG) und novellierten Gebäudeenergiegesetzes (GEG) werden die THG-Emissionen weiter abnehmen. Das Ziel des KSG²³ von maximal 66 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 dürfte auf Basis der Anfang 2024 gültigen Politikinstrumente jedoch nicht erreicht werden (ERK 2024b).²⁴ Um die

Klimaziele auch bei mittlerer oder kühlerer Witterung sicher zu erreichen, sind zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen notwendig. Die bisher gewählten Reduktionsstrategien gilt es zu verstärken und zu erweitern. Zugleich soll zuverlässig bedarfsgerechter Wohn- und Gewerberaum zur Verfügung gestellt werden. Daraus ergeben sich drei **zentrale Handlungsansätze**:

Erstens soll bedarfsgerecht gebaut werden. Dies umfasst nebst regional ausreichendem Gewerbe- und Wohnraum auch die Bezahlbarkeit sowie die Nutz- beziehungsweise Bewohnbarkeit der Räume (unter anderem Bereitstellung eines ausreichenden Platzangebots, privater Bereiche, barrierefreier und altersgerechter Wohnungen sowie ausreichender Belüftung und Belichtung).

Zweitens gilt es die Wärmeversorgung auf Erneuerbare Energien umzustellen, vor allem durch den Ausbau und die Dekarbonisierung der Wärmenetze und den Einsatz elektrischer Wärmepumpen.

Schließlich muss **drittens** der Energieverbrauch von Bestandsgebäuden ausreichend sinken, um eine effiziente Wärmeversorgung auf Grundlage Erneuerbarer Energien zu ermöglichen. Dafür gilt es zum einen die Sanierungsaktivitäten zu steigern (Sanierungsrate) und zum anderen den mit einer Sanierung erreichten Effizienzstandard zielkompatibel auszugestalten (Sanierungstiefe).

Weitere Handlungsstränge sind hocheffiziente Neubauten, effiziente Wärmeerzeuger, effizientere Geräte und Beleuchtung, aber auch die Steigerung der Flächeneffizienz (Prognos et al. 2022).

Diese drei zentralen Strategien leisten zugleich einen Beitrag zu Gesundheitsschutz, sozialem Ausgleich, Versorgungssicherheit und wirtschaftlichem Wohlstand: Mit Erneuerbaren Energien betriebene Heizungen und ein sinkender Wärmebedarf wappnen Haushalte und Gewerbe gegen steigende fossile Energiepreise und senken Deutschlands Abhängigkeit von fossilen Energieimporten. Ausreichend gedämmte Gebäude schützen vor Kälte und sommerlicher Hitze. Sanierungen und Heizungstausch werben den Kapitalstock auf und sichern Arbeitsplätze

²³ Basierend auf den gemäß §5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6)

²⁴ Der Projektionsbericht der Bundesregierung 2024 schätzt die verbleibenden THG-Emissionen im Gebäudesektor im Mit-Maßnahmen-Szenario auf 68 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 und auf 8 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045 (UBA 2024). Der Expertenrat für Klimafragen beurteilt diese projizierte Emissionsreduktion als unwahrscheinlich. Der Rat identifiziert erhebliche Unsicherheiten in Bezug auf die Entwicklung exogener Rahmendaten und Annahmen, die insgesamt darauf hindeuten, dass die THG-Emissionsminderung mit den aktuellen Instrumenten weniger stark ausfallen dürfte (ERK 2024b).

und Einkommen. Damit werden auch rückläufige Investitionen beim Neubau kompensiert.

5.3.3 Szenariopfade

Bedarfsgerecht bauen

Ziel des Szenarios ist, die bedarfsgerechte Versorgung mit Wohn- und Gewerbeimmobilien in allen Regionen sicherzustellen. Dabei sollen Flächen effizient genutzt und die Emissionen reduziert werden, die in der Vorkette bei der Produktion von Baustoffen entstehen (sogenannte *Embodied Carbon*-Emissionen). Angesichts gestiegener Baupreise gilt es außerdem kosteneffizient zu bauen und Fachkräfte effizient einsetzen.

Eine wichtige Rahmenbedingung bildet die Bevölkerungsentwicklung, denn der Wohnraumbedarf ist eng an die Anzahl der Haushalte geknüpft. Für die Entwicklung der Nichtwohngebäude des Sektors GHD ist vor allem die Zahl der Erwerbstätigen (nach

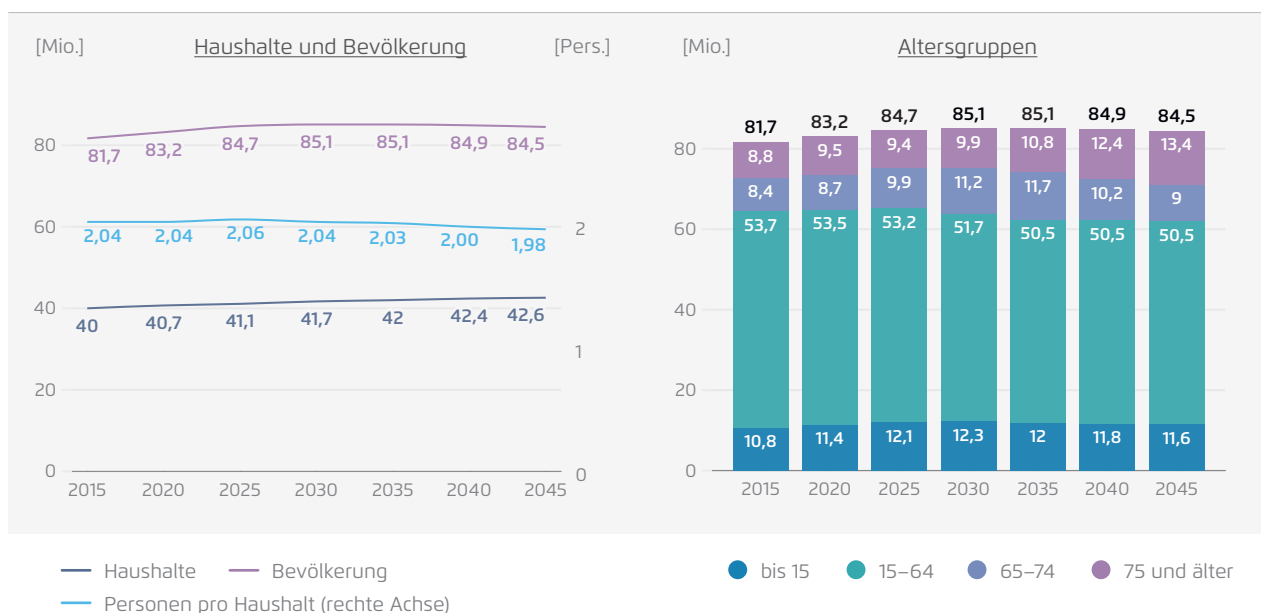
Branchen) relevant, da der Platzbedarf pro erwerbstätiger Person je nach Branche variiert.

Die Bevölkerung wächst im Szenario bis zum Jahr 2035 weiterhin leicht an und nimmt dann geringfügig ab.²⁵ Die mittlere Haushaltgröße (Anzahl Personen je Haushalt) verringert sich von 2,04 im Jahr 2020 auf 1,98 im Jahr 2045. Dies führt dazu, dass sich die Bevölkerung auf mehr Haushalte verteilt und die Zahl der Haushalte über den gesamten Zeitraum leicht ansteigt, insgesamt um fünf Prozent. Zugleich wird die Bevölkerung älter (Abbildung 33). Insbesondere verringert sich die Bevölkerung im erwerbstätigen Alter (15 bis 64 Jahre) um fünf Prozent. Damit verbunden ist ein Rückgang der Zahl der Erwerbstätigen im GHD-Sektor. Dies dämpft die nachgefragte Gebäudefläche in den Nichtwohngebäuden.

²⁵ Das entspricht in etwa dem mittleren Szenario von empirica (2024) und liegt im Vergleich mit anderen Bevölkerungsprognosen (hohes und niedriges Szenario empirica, Institut der Deutschen Wirtschaft (IW) (2024) und Pestel Institut (2024)) in der Mitte.

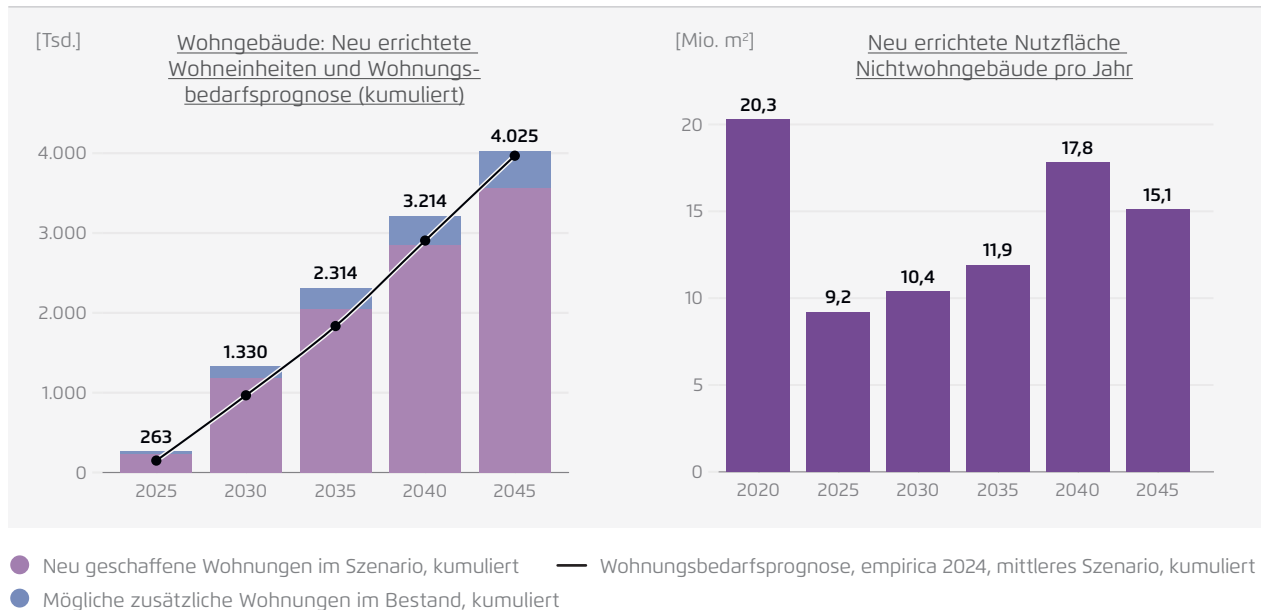
Entwicklung der Bevölkerung und Haushalte (links) und Entwicklung der Bevölkerung nach Altersgruppen (rechts)

→ Abb. 33



Agora Energiewende und Prognos (2024) basierend auf Statistisches Bundesamt (2022a)

Neu errichtete Wohngebäude im Vergleich mit Wohnungsbedarfsprognose (links) → Abb. 34 und neu errichtete Nichtwohngebäude (rechts)



Agora Energiewende und Prognos (2024) basierend auf Statistisches Bundesamt (2024b) und empirica (2024)

Wohnungsbau (Sektor Private Haushalte)

Mit der steigenden Anzahl an Haushalten steigt die Nachfrage nach Wohnungen weiter. Eine Abschätzung des zukünftigen Wohnungsbedarfs liefert eine aktuelle regionalisierte Bedarfsprognose von empirica (empirica 2024). Die Zahl der neu gebauten Wohnungen orientiert sich im Szenario näherungsweise am mittleren Szenario dieser Prognose.²⁶ Abbildung 34 (links) zeigt die kumulierte Anzahl neu geschaffener Wohnungen. Zu Beginn wird noch über den Bedarf hinaus gebaut, um etwaige Nachholbedarfe zu bedienen. Im Zeitverlauf verlangsamt sich der Zubau im Einklang mit der demografischen Entwicklung (verlangsamer Anstieg der Anzahl an Haushalten).

Zehn bis fünfzehn Prozent der Wohnungen werden kosten-, flächen- und ressourceneffizient in bestehenden Gebäuden realisiert – durch Aufstockung, Ausbau, Aufteilung oder durch Umnutzung von

Gewerbeimmobilien. Aufgrund der alternden Bevölkerung verlassen zunehmend ältere Personen ihre Häuser, sodass mehr gebrauchte Einfamilienhäuser auf den Markt kommen (BBSR 2020). Modernisierung und Nutzung dieser Bestandsimmobilien beugen einem Wertverfall vor. Zudem werden die politischen Rahmenbedingungen geschaffen, um den Wohnungsbau in Bestandsimmobilien weiter zu erleichtern und zu fördern. Auf diese Weise ist es möglich, Prognoseunsicherheiten zu begegnen: Sollte die Bevölkerung stärker wachsen als erwartet, kann die Zahl der im Bestand realisierten Wohnungen gesteigert werden, bis hin zu einer Verdopplung (Abbildung 34, blaue Balken).²⁷ Damit ergibt sich auch ein neues Geschäftsfeld für die Bauwirtschaft.

²⁶ Diese Prognose liegt im Vergleich mit anderen Prognosen im Mittelfeld (empirica 2024 hoch und niedrig, IW 2024, Pestel 2024).

²⁷ Abschätzungen der Potenziale für Wohnraum in Bestandsgebäuden finden sich bei Fuhrhop (2023), Wahlberg et al. (2022) und Zimmermann et al. (2023). Dabei besteht allerdings eine erhebliche Prognoseunsicherheit, und die Realisierung der Potenziale hängt wesentlich davon ab, inwieweit entsprechende politische Instrumente eingeführt werden. Deshalb ist der hier genannte Umfang im Vergleich mit der Literatur konservativ gewählt.

Nichtwohngebäude

(Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen)

Bei abnehmender Anzahl an Erwerbstätigen steigt aufgrund der Veränderung der Branchenstruktur der mittlere Flächenbedarf je erwerbstätiger Person leicht an. Somit verändert sich die Fläche der Nichtwohngebäude ab dem Jahr 2025 nicht mehr wesentlich. Dennoch werden neue Nichtwohngebäude zugebaut, als Ersatz für abgehende Bestandsgebäude. Dabei ist die mittlere Lebensdauer von Nichtwohngebäuden geringer als von Wohngebäuden. Aufgrund der Altersstruktur des Gebäudebestands schwanken die Neubaumengen im Verlauf der Jahre.

Bauen mit Holz

Im Szenario gewinnt Holz als Baustoff an Bedeutung, wodurch konventionelle CO₂-intensive Baustoffe substituiert werden (Abbildung 35). Dadurch bleibt der im Holz gespeicherte Kohlenstoff längerfristig gespeichert. Diese Senkenwirkung wird in der Sektorabgrenzung nach KSG nicht im Gebäudesektor, sondern im Sektor *Land Use, Land Use Change, and Forestry* (LULUCF) verbucht. Da Holz dabei

konventionelle, emissionsintensive Baustoffe ersetzt (zum Beispiel Zement und Stahl), werden im Industriesektor THG-Emissionen reduziert.

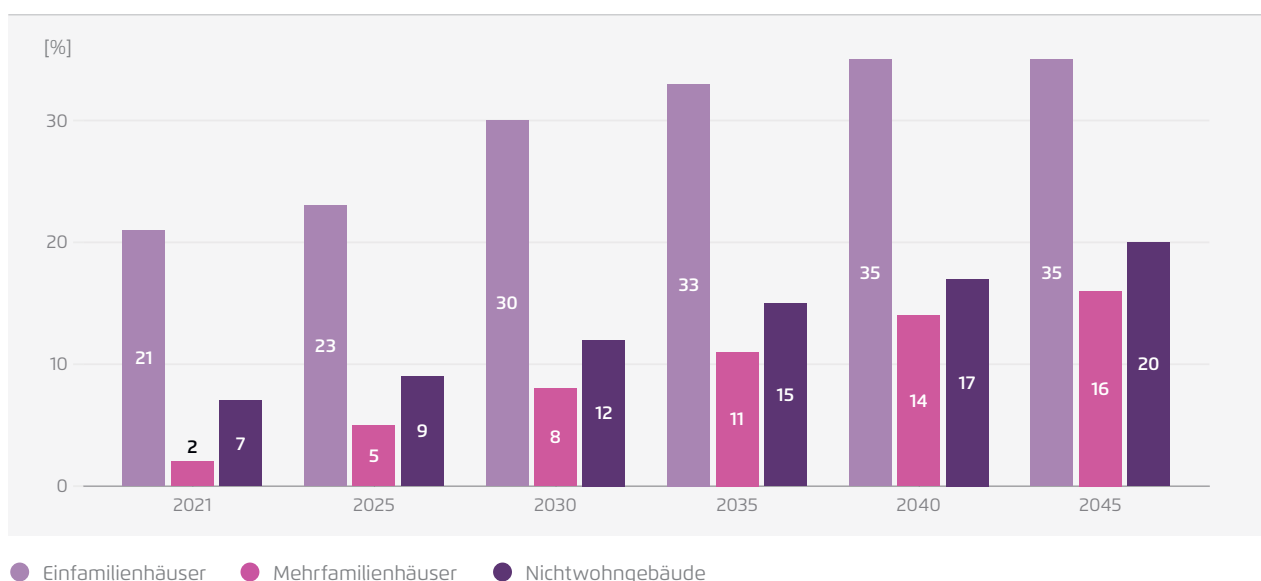
Erneuerbare Wärme

Die Wärmeversorgung wird im Szenario hauptsächlich auf dekarbonisierte Wärmenetze (Nah- und Fernwärme) und elektrische Wärmepumpen umgestellt. Grüne Gase (Wasserstoff, Biomethan) und Holz haben nur einen geringen Stellenwert. Die (nachhaltigen) Potenziale dieser Energieträger sind begrenzt. Grüne Gase sollten daher für jene Anwendungen genutzt werden, bei denen keine Alternativen zur Dekarbonisierung zur Verfügung stehen, etwa in Kraftwerken oder im internationalen Luft- und Schiffsverkehr. Holz wird vorwiegend stofflich verwendet (unter anderem als Baustoff für Gebäude), damit der Kohlenstoff gespeichert bleibt.

Der Einsatz von **Wärmenetzen** ist insbesondere in Gebieten mit hoher Wärmedichte sinnvoll. Im Szenario nimmt die Anzahl der über Wärmenetze versorgten Gebäude deutlich zu. Der Ausbau der Wärmenetze und die Schaffung von Anschlussmöglichkeiten sind

Anteil neu errichteter Gebäude mit Holz als überwiegendem Baustoff nach Gebäudetypen

→ Abb. 35



Agora Energiewende und Prognos (2024), historische Daten: Statistisches Bundesamt (2022b)

zentrale Voraussetzungen für die Umstellung der Wärmeversorgung, die umgehend angegangen werden müssen. Im Kapitel 5.1 Energiewirtschaft ist dargestellt, wie sich die Wärmenetze entwickeln.

Wo kein Wärmenetz vorhanden ist, kommen hauptsächlich **elektrische Wärmepumpen** zum Einsatz. Dabei werden sie auch vermehrt in Bestandsgebäude mit weniger hohen Effizienzstandards eingebaut. Technisch ist dies in der Regel gut umsetzbar und in vielen Fällen gegenüber einer Gasheizung bereits heute wirtschaftlich (Öko-Institut und Fraunhofer ISE 2022).

Absatzstruktur

Die Anzahl der neuen **Wärmenetzanschlüsse** steigt von aktuell rund 40.000 pro Jahr auf rund 90.000 pro Jahr bis 2030 und auf rund 110.000 pro Jahr bis 2040. Nach 2040 ist die Anzahl der neu an Wärmenetze angeschlossenen Gebäude wieder rückläufig. Das Ziel von jährlich 500.000 eingebauten **Wärmepumpen** wird ab dem Jahr 2026 erreicht. Ab dem Jahr 2028 liegt der jährliche Absatz jeweils bei rund 600.000 bis 650.000 Stück. Dies entspricht in etwa dem Mittel der in den Jahren 2018 bis 2022 verkauften Gasheizungen. Nach 2035 steigt der Absatz von Wärmepumpen nochmals deutlich an, weil zunehmend Gaskessel außer Betrieb genommen werden. Zum Erfolg der

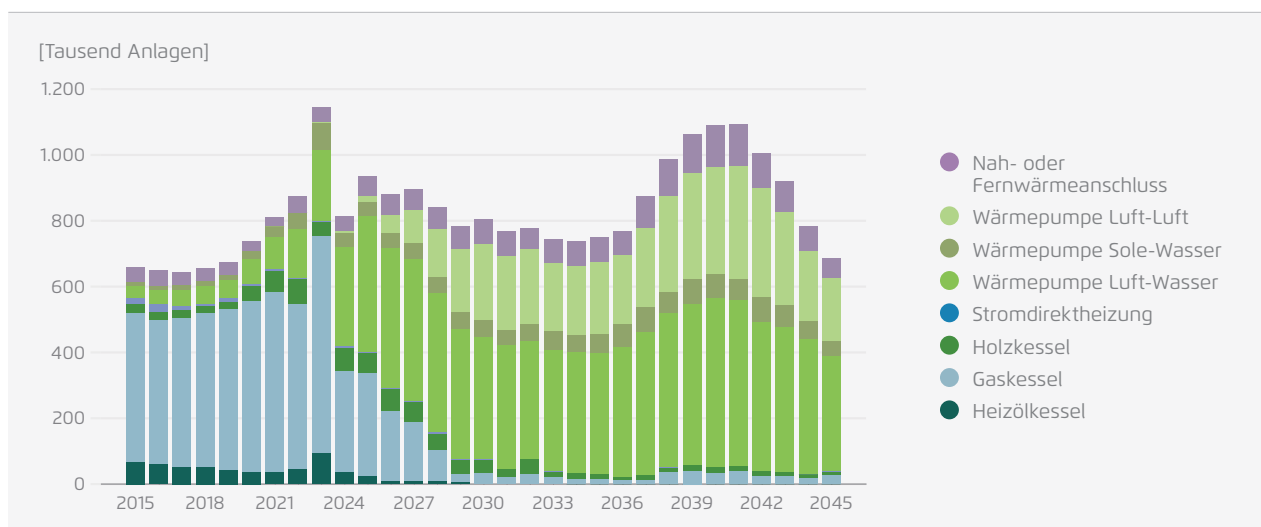
Wärmepumpen tragen Kostensenkungen durch Skaleneffekte, eine größere Zahl an Anbietern und mehr Wettbewerb, neue Vertriebsmodelle wie Plattformen oder Leasing sowie eine verlässliche Förderung bei. Zentral ist außerdem ein günstigeres Verhältnis von Strom- und Gaspreis, das Wärmepumpen im Betrieb konkurrenzfähiger gegenüber Gasheizungen macht. Dies wird im Szenario durch flächendeckend verfügbare, vergünstigte Wärmepumpen-Stromtarife unterstützt. Zudem sind etwa 25 Prozent der Wärmepumpen kleine kostengünstige Luft-Luft-Wärmepumpen (siehe Box „Luft-Luft-Wärmepumpen“).

Im Einklang mit bisherigen Trends sowie mit der Vorgabe des Gebäudeenergiegesetzes, dass neue Heizungen zu 65 Prozent erneuerbar betrieben werden müssen, werden ab etwa dem Jahr 2030 keine neuen **Heizölkessel** mehr eingebaut. Auch der Absatz von **Gaskesseln** verringert sich deutlich, insbesondere da es im Jahr 2023 erhebliche Vorzieheffekte gab. Die Absatzzahlen von Holzheizungen sind ebenfalls rückläufig, da diese im Szenario nicht mehr durch die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) gefördert werden.

Abbildung 36 zeigt die Absatzstruktur der Wärmeerzeuger in Tausend für das Segment Wohngebäude (für die Nichtwohngebäude liegen die Zahlen nicht in der entsprechenden Auflösung vor).

Absatzstruktur Wärmeerzeuger, Bereich Wohngebäude

→ Abb. 36



Agora Energiewende und Prognos (2024)

➔ Infobox 5: Luft-Luft-Wärmepumpen – ein neuer Baustein in der Wärmeversorgung

Luft-Luft-Wärmepumpen (LL-WP) sind in vielen Ländern bereits seit mehreren Jahren stark verbreitet, unter anderem in Skandinavien. Global werden jährlich über 30 Millionen Anlagen produziert. LL-WP nutzen wie die Luft-Wasser-Wärmepumpen (LW-WP) die Außenluft als Wärmequelle, geben die Wärme jedoch direkt an die Innenluft ab. Dadurch können sie mit geringen Vorlauftemperaturen betrieben werden und erreichen Jahresarbeitszahlen von über 3. Es sind bivalente Split-Geräte, die an heißen Sommertagen auch zur Klimatisierung genutzt werden können.

LL-WP können die Wärme nur begrenzt speichern. Sie heizen Räume bei Anwesenheit der Bewohnerinnen und Bewohner in kurzer Zeit auf, können aber nicht flexibel gesteuert und an das fluktuierende Stromangebot aus Erneuerbaren Energien angepasst werden. In der Regel können sie auch nicht für die Warmwasserbereitung genutzt werden. Deshalb wird hierfür ein Zusatzgerät benötigt. Beim Einsatz in Mehrfamilienhäusern kann aber der bestehende Heizkessel zunächst installiert bleiben und zur Nutzung bei Nachfragespitzen sowie zur Erzeugung von Warmwasser eingesetzt werden.

Ein interessantes Einsatzgebiet sind Mehrfamilienhäuser mit Etagenheizungen. Hier ermöglichen LL-WP eine raumsparende, individuelle Umstellung ohne Einbau einer zentralen Wärmeverteilung. Ein gewichtiger Vorteil der LL-WP liegt in den niedrigen Anschaffungskosten von rund 10.000 Euro je Wohnung. Der Einbau der Systeme ist in der Regel einfach und schnell umgesetzt. Deshalb können sie einen wichtigen Baustein der zukünftigen Wärmeversorgung darstellen und mithelfen, klimaneutrale Heizungen rasch in die Breite zu bringen.

Entwicklung des Bestandes

Wärmeerzeuger haben in der Regel eine Lebensdauer von 20 bis 30 Jahren. Jährlich werden demnach rund vier Prozent des Anlagenbestands ersetzt. Damit verändert sich zusehends die Struktur der Wärmeerzeugung. Abbildung 37 zeigt die Entwicklung der Beheizungsstruktur im Szenario nach Gebäudetypen gegliedert (bei Wohngebäuden dargestellt nach Anzahl der Wohnungen, bei Nichtwohngebäuden nach Gebäudenutzfläche). Nach 2035 beschleunigt sich der Rückgang der Gasheizungen auch im Bestand. Im Jahr 2045 werden die Ein- und Zweifamilienhäuser überwiegend durch elektrische Wärmepumpen beheizt (Anteil 82 Prozent). Bei den Mehrfamilienhäusern und den Nichtwohngebäuden spielt der Einsatz sowohl von Wärmepumpen als auch von Wärmenetzen eine sehr wichtige Rolle. Die verbleibenden Restbestände an Gaskesseln werden ausschließlich mit Biomethan oder Wasserstoff betrieben. Nahezu alle Heizölkessel sind ersetzt. Vereinzelt verbliebene

Anlagen werden mit klimaneutralem synthetischem Heizöl betrieben.

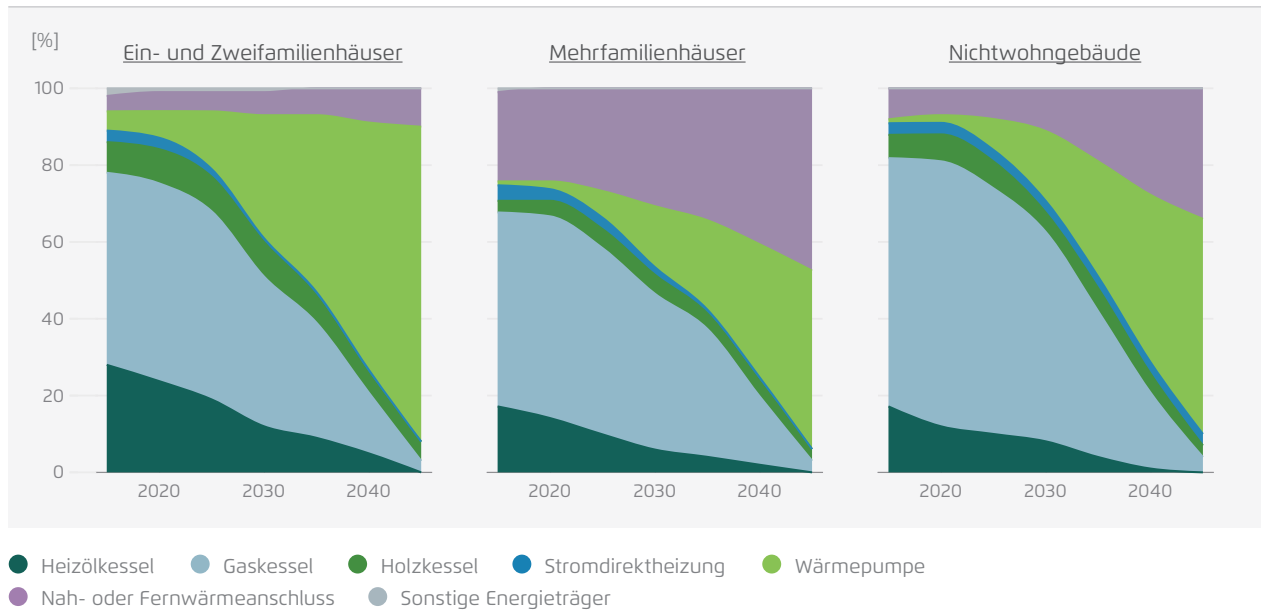
Mit der Zahl der betriebenen Wärmepumpen nimmt im Szenario der Stromverbrauch für Wärmepumpen zu. Dieser steigt bis zum Jahr 2030 auf 41 TWh, im Jahr 2045 liegt er bei 85 TWh. Gedämpft wird der Anstieg durch die verbesserte energetische Qualität der Gebäude. Außerdem werden die Wärmepumpen effizienter: Die mittlere Jahresarbeitszahl für Raumwärme steigt bei den Wohngebäuden bis zum Jahr 2045 auf rund 3,5, bei den Nichtwohngebäuden auf rund 4,0.

Energieeffiziente Gebäude

Zwar lassen sich Wärmepumpen und leitungsgebundene Wärme auch in weniger effizienten Gebäuden einsetzen. Eine geringe Gebäudeeffizienz erhöht jedoch in der Regel die notwendige Vorlauftemperatur der Heizung und führt zu einem niedrigeren Anlagennutzungsgrad und höheren Betriebskosten. Außerdem wird eine höhere Heizleistung benötigt,

Beheizungsstruktur im Gebäudebestand nach Gebäudetyp und Heizungssystemen

→ Abb. 37



Agora Energiewende und Prognos (2024). Wohngebäude nach Zahl der Wohnungen, Nichtwohngebäude nach Nutzfläche

was die Anschaffungskosten erhöht und zu einem höheren Beitrag zur Spitzenlast im Stromsystem führt. Daher ist es im Szenario wichtig, den Wärmeverbrauch in Bestandsgebäuden durch energetische Sanierungen zu senken. Dies führt auch zu einem verbesserten Innenraumklima und besserem Schutz vor sommerlicher Hitze, was sich positiv auf den Komfort, die Leistungsfähigkeit und Gesundheit der Nutzenden auswirkt (Prognos et al. 2022).

Im Szenario werden überwiegend einzelne Bauteile saniert. Individuelle Sanierungsfahrpläne helfen, die Sanierungsschritte über den Zeitverlauf passend aufeinander abzustimmen. Beim einzelnen Gebäude beginnt die Sanierungstätigkeit frühestens 15 Jahre nach Neubau oder Vollsanierung. Bis zu einem Gebäudealter von 30 Jahren steigt die Sanierungswahrscheinlichkeit dann kontinuierlich an und bleibt anschließend konstant. Die angenommenen Modernisierungsraten der zentralen Bauteile von Gebäuden über 30 Jahre sind in Abbildung 38 dargestellt. Umgerechnet in Vollsanierungsäquivalente steigt die Sanierungsrate und damit auch die jährlich sanierte Gebäudefläche nach 2025 deutlich an. Dennoch verändert sich die Energieeffizienz des

Gebäudebestands wegen der langen Lebensdauer der Bauteile weiterhin nur langsam.

Auch die Sanierungstiefe nimmt im Szenario zu. Das heißt, im Vergleich zu heutigen Sanierungen steigt die mittlere Effizienz der eingesetzten Bauteile an, und der Energieverbrauch nach durchgeführter Sanierung nimmt stärker ab. Die Effizienz der neu eingesetzten Bauteile ist näherungsweise kompatibel mit der dritthöchsten Gebäudeeffizienzkategorie, der Klasse B. Das entspräche bei Vollsanierungen für Ein- und Zweifamilienhäuser jeweils rund 55 bis 60 kWh Nutzenergie pro m² Wohnfläche und für Mehrfamilienhäuser rund 45 bis 50 kWh/m² Wohnfläche.²⁸

Energieeinsparungen werden außerdem durch noch effizientere Neubauten erreicht. Im Szenario steigen die Effizienzanforderungen ab dem Jahr 2026; sie sind für Ein- und Zweifamilienhäuser einerseits und

²⁸ Das entspricht den vom Forschungsinstitut für Wärmeschutz (FIW) im Rahmen des Hintergrundpapiers zur Gebäudestrategie Klimaneutralität vorgeschlagenen Richtwerten (Prognos et al. 2022). Hinzu kommt der Verbrauch für Warmwasser.

Modernisierungsrate der Bauteile nach Gebäudetyp (oben), Sanierungsrate (unten links) und nach Sektoren (unten rechts)

→ Abb. 38



Agora Energiewende und Prognos (2024). *in Prozent der Gebäudefläche; **Altbau: Gebäude mit einem Baualter von mindestens 30 Jahren; ***Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD): Angaben in Gebäudenutzfläche; Private Haushalte (PHH): Angaben in Wohnfläche

Mehrfamilienhäuser andererseits weitgehend identisch. Aufgrund der Gebäudegeometrie (unter anderem Verhältnis von Außenfläche zu Wohnfläche) sind die Anforderungen bei Mehrfamilienhäusern leichter zu erfüllen.

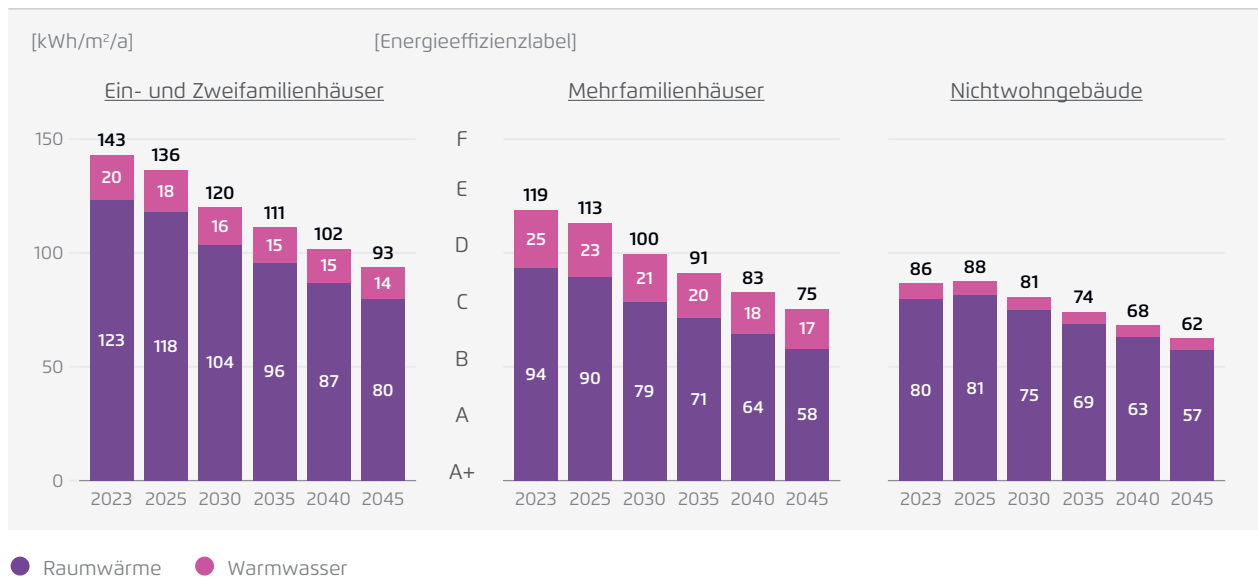
Aufgrund der energetischen Sanierungen, aber auch wegen des wärmeren Klimas und des Abgangs von alten ineffizienten Gebäuden verringert sich der mittlere spezifische Raumwärmeverbrauch im Szenario bis zum Jahr 2045 bei Ein- und Zweifamilienhäusern auf 80 kWh/m². Einschließlich Warmwasser liegen die Ein- und Zweifamilienhäuser bei

94 kWh/m² oder Gebäudeeffizienzklasse C.²⁹ Mehrfamilienhäuser erreichen einen mittleren Raumwärmeverbrauch von 58 kWh/m². Mit Warmwasser sind es 75 kWh/m², an der Grenze zu Klasse B. Bei Nichtwohngebäuden verringert sich der mittlere

²⁹ In Prognos et al. (2022) wird als langfristiges Ziel Gebäudeeffizienzklasse B für den gesamten Bestand formuliert. Im hier vorliegenden Szenario wird davon abgewichen, da die Berücksichtigung von Härtefällen, Ausnahmen beispielsweise für strukturschwache Räume und Denkmalschutz die durchschnittliche Sanierungstiefe senken. Zudem sind hier Verbrauchs-, nicht Bedarfswerte angegeben, wobei mit einem gewissen Rebound-Effekt gerechnet wird.

Mittlerer spezifischer Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser, nach Gebäudetypen

→ Abb. 39



Agora Energiewende und Prognos (2024)

spezifische Verbrauch im gleichen Zeitraum auf rund 57 kWh/m² Raumwärme und 5 kWh/m² Warmwasser (Abbildung 39).

5.3.4 Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen

Der **Endenergieverbrauch** im Gebäudesektor nimmt im Szenario weiter ab. Bis zum Jahr 2030 sinkt er auf 863 TWh, im Jahr 2045 beträgt er noch 700 TWh, jeweils inklusive Solar- und Umweltwärme (Abbildung 40). In die Berechnung einbezogen werden dabei sämtliche Energieverbräuche des Gebäudesektors, neben Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Klimatisierung also auch Beleuchtung, Informations- und Kommunikationstechnik sowie Haushaltsgeräte und gewerbliche Prozesse. Der Rückgang des Endenergieverbrauchs ist auf den verbesserten Wärmeschutz durch energetische Sanierungen, auf den Abgang von Altbauten und auf effizientere Heizungen, Anlagen, Prozesse und Elektrogeräte zurückzuführen. Auch das wärmer werdende Klima trägt zum Verbrauchsrückgang bei.

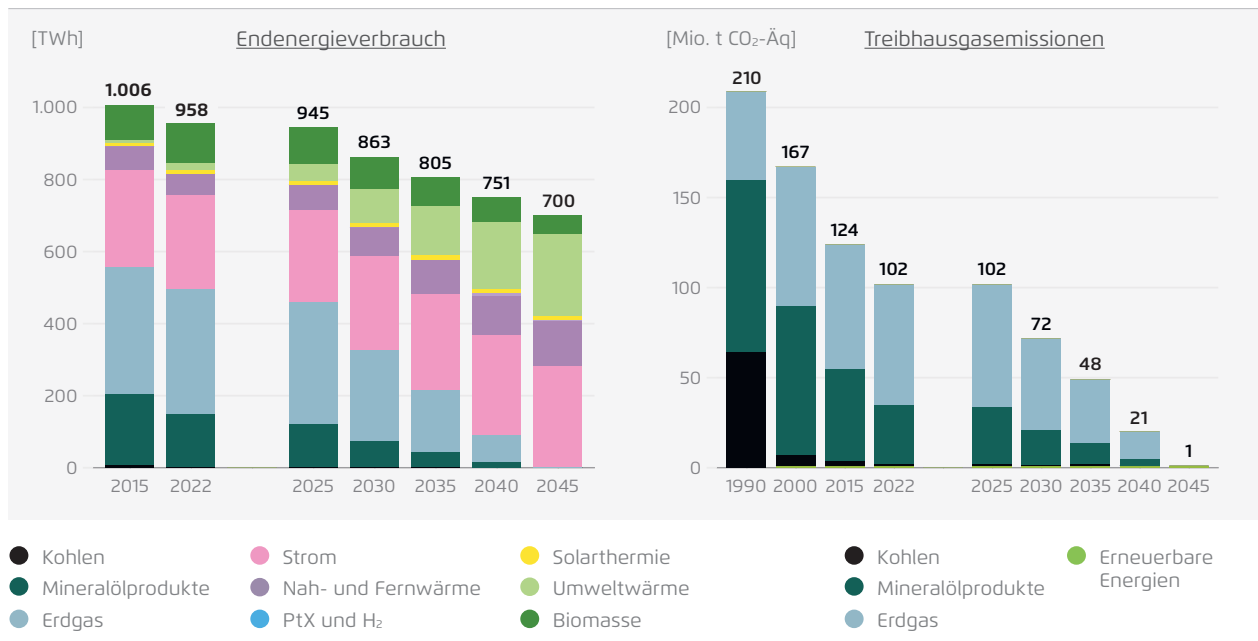
Bis zum Jahr 2045 werden keine fossilen Energieträger mehr eingesetzt. Demgegenüber stehen ansteigende Verbrauchsmengen bei der leitungsgebundenen Wärme (+ 106 Prozent gegenüber 2022) sowie bei der Umweltwärme (+ 911 Prozent). Der Stromverbrauch steigt wegen der erhöhten Effizienz hingegen nur leicht an (+ 9 Prozent).³⁰ Der Verbrauch an Biomasse (insbesondere Holz) nimmt im Szenario deutlich ab, im Zeitraum zwischen 2022 und 2045 um 52 Prozent. Ursächlich hierfür ist sowohl der geringere Einsatz in zentralen Holzheizungen (Pellet, Stückholz) als auch die rückläufige Nutzung in Ergänzungsheizungen (Kaminöfen).

Die **Treibhausgasemissionen** verringern sich bis zum Jahr 2030 deutlich auf noch 71,6 Mio. t CO₂-Äq. Dennoch wird das Sektorziel nach KSG von maximal 66 Mio. t CO₂-Äq für das Jahr 2030 bei einer unterstellten mittleren Jahreswitterung

³⁰ Die Abweichung von rund 20 TWh zum im Energiesektor angegebenen Stromverbrauch von PHH und GHD ergibt sich aus unterschiedlichen sektoralen Abgrenzungen. Die hier angegebenen rund 280 TWh enthalten nicht den Energieverbrauch der Landwirtschaft.

Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors

→ Abb. 40



Agora Energiewende und Prognos (2024), historische Daten: AG Energiebilanzen (2024) und Umweltbundesamt (2024). Sektorabgrenzung nach KSG; PtX = Power to X (strombasierte Brennstoffe)

verfehlt.³¹ Bis zum Jahr 2040 verringern sich die THG-Emissionen auf 21 Mio. t CO₂-Äq, im Jahr 2045 liegen sie bei knapp 1 Mio. t CO₂-Äq. Die im Jahr 2045 verbleibenden THG-Emissionen sind auf Methan- und Lachgasemissionen durch die Nutzung von Biomasse zurückzuführen.

5.3.5 Zentrale Weichenstellungen

Wegen der langen Lebensdauer von Gebäuden und Anlagen verändert sich der Bestand nur langsam; zugleich sollen nach Möglichkeit natürliche Investitionsfenster genutzt werden. Daher muss frühzeitig Richtungssicherheit hergestellt und ein stabiler Rechts- und Finanzierungsrahmen geschaffen werden,

um Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen. Um die Entwicklungen im Szenario zu ermöglichen, wurden folgende politischen Weichenstellungen angenommen.³²

1. Verlässliche ökonomische Anreize für Investitionen in Heizungstausch und Gebäudesanierung schaffen

Der im Szenario angenommene CO₂-Preis von **124 EUR₂₀₂₂ pro Tonne im Jahr 2030 und 188 EUR₂₀₂₂ pro Tonne im Jahr 2045** wird von weiteren ökonomischen Instrumenten flankiert: Eine Reform der Steuern, Abgaben und Umlagen macht Strom gegenüber Erdgas wettbewerbsfähiger. Übergangsweise greifen spezielle Wärmepumpentarife. Eine Reform der Netzentgelte schafft außerdem Anreize für einen flexiblen Stromverbrauch. Die EU-Taxonomie wird so umgestaltet, dass sie einen Anreiz für die Sanierung der ineffizientesten Gebäude bietet.

³¹ Für die Berechnungen des Raumwärmeverbrauchs im Szenariozeitraum wurde von einer durchschnittlichen Witterung ausgegangen (bezogen auf den Zeitraum 1990 bis 2010) und zusätzlich eine leichte Erwärmung des Klimas unterstellt. Fallen die Wintermonate im Jahr 2030 wärmer aus, würden sich die THG-Emissionen für die Erzeugung der Raumwärme entsprechend verringern. Bei einem Jahr mit sehr warmen Wintermonaten kann dies fünf bis sieben Mio. t CO₂-Äq ausmachen. Das Jahresziel 2030 wäre dann in Reichweite. Andererseits könnte bei einem kalten Winter die Zielverfehlung deutlich höher ausfallen.

³² Folgende Instrumente wurden im Szenario quantitativ modelliert: CO₂-Preis, 65-%-Regel des Gebäudeenergiegesetzes, Neubau-standards und Mindeststandards bei energetischen Sanierungen, Mindesteffizienzstandards für Bestandsgebäude, BEG-Förderung, steuerliche Förderung. Die übrigen genannten Instrumente flankieren diese Maßnahmen, um die Entwicklungen zu ermöglichen.

➔ Infobox 6: Was passiert, wenn ... die Sanierung weniger stark voranschreitet?

In einer Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, wie sich Energieverbrauch und THG-Emissionen bei abgeschwächter Gebäudeeffizienz entwickeln. Dazu wurde eine Sanierungsaktivität angenommen, die in etwa dem Niveau des Jahres 2020 entspricht: bei den Ein- und Zweifamilienhäusern liegt die Sanierungsrate ab dem Jahr 2025 bei rund 0,95 Prozent, bei den Mehrfamilienhäusern und Nichtwohngebäuden bei rund 1,1 Prozent. Im Vergleich zum Hauptszenario verringert sich dadurch die energetisch sanierte Wohnfläche um rund 35 Prozent. Außerdem wird in der Sensitivität auch eine verlangsamte Zunahme der Sanierungstiefe angenommen. Im Jahr 2045 liegt der mittlere spezifische Verbrauch bei Vollsanierungen von Mehrfamilienhäusern und Nichtwohngebäuden 10 Prozent höher und bei den Ein- und Zweifamilienhäusern 15 Prozent höher als im Basisszenario. Die übrigen Parameter bleiben unverändert, das heißt, die Umstellung der Wärmeversorgung verläuft wie im Hauptszenario.

In der Sensitivität verringert sich der Energieverbrauch im Gebäudesektor bis zum Jahr 2030 auf 872 TWh, im Jahr 2045 beträgt der Verbrauch 733 TWh (Abbildung 41). Verglichen mit dem Hauptszenario entspricht dies einem Mehrverbrauch von 8 TWh (plus ein Prozent) im Jahr 2030, respektive 32 TWh (plus vier Prozent) im Jahr 2045. Allein für Raumwärme werden 2045 acht Prozent mehr Energie verbraucht als im Hauptszenario. Die Differenz im Energieverbrauch wächst in den Jahren nach 2045 vorerst weiter leicht an.

Der Mehrverbrauch entfällt im Jahr 2030 noch überwiegend auf Erdgas. Danach verschiebt er sich durch die Umstellung der Wärmeversorgung zunehmend auf leitungsgebundene Wärme, Strom und Umweltwärme. Im Jahr 2045 ist der Verbrauch an leitungsgebundener Wärme 7 TWh höher als im Hauptszenario, beim Stromverbrauch beträgt die Differenz 5 TWh. Die zusätzliche Strommenge ist im Vergleich zur Gesamtstrommenge zwar gering. Doch fällt sie ausschließlich in den Wintermonaten an, in denen die Stromnachfrage schwieriger zu decken ist.

Damit verändern sich in der Sensitivität die Kosten und Kostenstrukturen. Die Nettoeffekte konnten im Rahmen der Szenariomodellierung nicht quantifiziert werden, jedoch können qualitative Aussagen getroffen werden: Der Investitionsbedarf für Wärmeerzeuger steigt gegenüber dem Hauptszenario, da leistungstärkere und dadurch teurere Anlagen benötigt werden. Zudem erhöhen sich die Kosten für den laufenden Energiebezug. Auch im Sektor Energiewirtschaft werden für die Erzeugung der zusätzlichen Mengen an Strom und Wärme weitere Investitionen notwendig. Dies gilt insbesondere, da in den Wintermonaten auch teure Technologien eingesetzt werden müssen (zum Beispiel Wasserstoffkraftwerke). Im Gegenzug fallen die Investitionen für die Gebäudesanierung geringer aus.

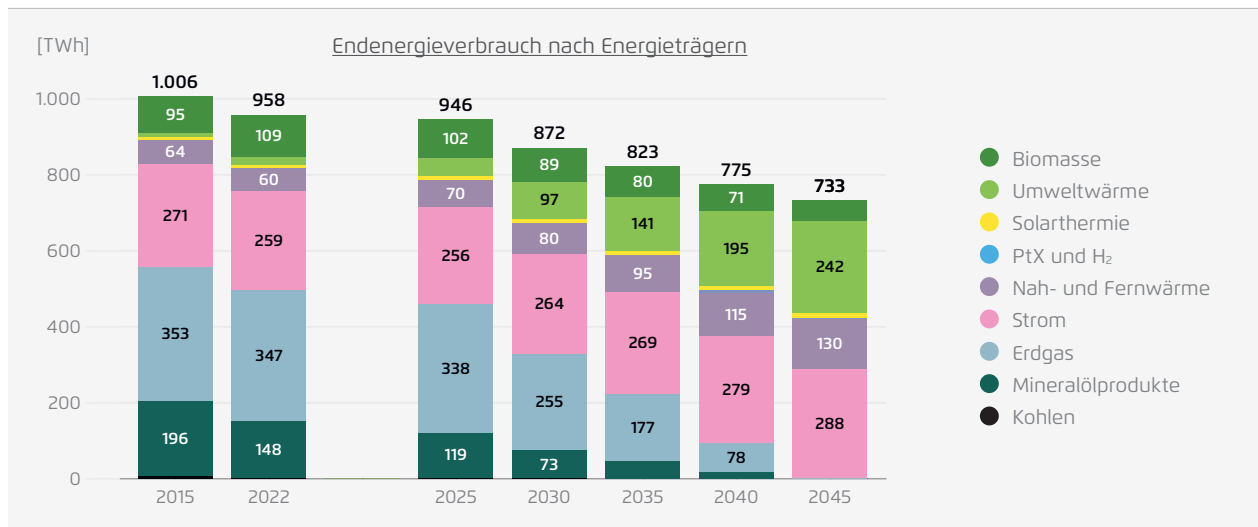
2. Planungssicherheit herstellen und Geschwindigkeit absichern

Das Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (WPG) und die Novelle des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) werden weitergeführt. **Bis spätestens Mitte 2028** hat jede Kommune ihren Wärmeplan erstellt, Kommunen mit mehr als 100.000 Einwohnern und Einwohnerinnen tun dies bereits bis **Mitte 2026**. Die Kommunen informieren Bürgerinnen und Bürger schon vor Abschluss der Planung über

Vorrang- oder Ausschlussgebiete für den Wärmenetzausbau. Fernwärme wird durch Preistransparenz und -regulierung verbraucherfreundlicher (vergleiche Agora Energiewende et al. 2024). Zudem werden zügig die rechtlichen Grundlagen geschaffen, um Gasverteilnetze mit rechtzeitiger Ankündigung gebietsweise stilllegen zu können. Dies sorgt dafür, dass ein Teil der Gaskessel schon vor Ende ihrer technischen Lebensdauer ausgetauscht wird und vereinfacht gleichzeitig Investitionen in Wärmenetze (vergleiche Agora Energiewende 2023).

Sensitivitätsanalyse: abgeschwächte Gebäudeeffizienz

→ Abb. 41



Agora Energiewende und Prognos (2024), historische Daten: AG Energiebilanzen (2024). PtX = Power to X

Da jedes Jahr nur ein geringer Teil der Bauteile ersetzt wird, sollte möglichst bei jedem anstehenden Ersatz eine Verbesserung des Wärmeschutzes erreicht werden. Daher werden die Anforderungen an Teilsanierungen ab 2026 verschärft – so wird Kompatibilität mit der Gebäudeeffizienzklasse B erreicht.

Um signifikante Einsparungen bis 2045 zu erzielen und den Gebäudebestand für die Nutzung von mit erneuerbaren Energien erzeugter Wärme fit zu machen, muss die **Sanierungsaktivität vor 2030 gesteigert werden**. Die in der europäischen Gebäuderichtlinie vorgesehenen Mindesteffizienzstandards für Nichtwohngebäude werden daher zügig implementiert und greifen **ab 2028**. Auch für Wohngebäude werden zeitlich gestaffelte Standards für die ineffizientesten Gebäude eingeführt. Die Einführung solcher Standards benötigt zeitlichen Vorlauf, zum Beispiel für den Aufbau einer Datenbasis, aber auch damit die Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer sich vorbereiten können. Die Vorarbeiten beginnen daher sofort, damit die erste Stufe im Jahr **2030 in Kraft treten kann**. Der Aufbau der Datenbasis erleichtert zugleich größeren und institutionellen Immobilieneigentümern die Erfüllung der Taxonomiekriterien und reizt so weitere Sanierungen an.

3. Investitionen finanziell ermöglichen

Die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) wird fortgeführt, um Netzerweiterung und erneuerbare Wärmeherzeugung zu finanzieren. Die Fördermittel werden auf rund 3 Mrd. Euro pro Jahr aufgestockt. Die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) wird fortgeführt und die Fördermittel verstetigt. Bestehende Förderprogramme für Aufstockung, Umbau oder Umnutzung bestehender Gebäude werden weitergeführt und stark ausgeweitet. Insgesamt werden für den Gebäudebereich bis 2030 etwa **17 Mrd. Euro Fördermittel pro Jahr bereitgestellt und nach 2030 20 Mrd. Euro pro Jahr**.

Ab 2026 wird die BEG inhaltlich reformiert. In der Wärmeversorgung wird die Förderung vollständig zu mit Erneuerbaren Energien betriebenen Heizungen umgeschichtet. Hybridlösungen und Holzheizungen werden nicht mehr gefördert. Fördermittel für die Gebäudehülle fließen nicht mehr in den ohnehin schon sehr effizienten Neubau, sondern vollständig in Bestandssanierungen. Die Förderung von Einzelmaßnahmen wird gestärkt, um in Kombination mit individuellen Sanierungsfahrplänen schrittweise Sanierungen zu erleichtern. Bei der Förderhöhe werden soziale Kriterien wie Einkommen und Vermögen besonders berücksichtigt.

4. Sozialen Ausgleich schaffen

Im vermieteten Bereich sind faire Regelungen zur Kostenverteilung zwischen Eigentümerinnen und Eigentümern einerseits und Mietenden andererseits nötig. Besonderen Schutz benötigen Mietende mit geringem Einkommen. Sinnvoll wäre eine besondere Förderung für Vermietende, die vorübergehend mit einer Mietpreisobergrenze verknüpft wird, zum Beispiel bezogen auf ortsübliche Vergleichsmieten. Wo

Investitionen nicht schnell genug kostensenkend wirken, ist es außerdem zweckmäßig, auch Kompensationsinstrumente wie Wohngeld, Bürgergeld oder ein sozial gestaffeltes Klimageld zu nutzen, um die in der Übergangszeit steigenden Energiekosten abzufedern.

Tabelle 10 zeigt, welche Schritte angenommen werden, damit die Entwicklungen im Szenario Wirklichkeit werden können.

Zentrale Weichenstellungen im Gebäudesektor

→ Tabelle 10

Weichenstellung	Zeitpunkt spätestens
Gesetzliche Regelung zur Stilllegung von Gasverteilnetzen werden geschaffen	2025*
Reform der Bundesförderung für effiziente Gebäude tritt in Kraft	2026
Abschluss der kommunalen Wärmeplanung	2026/2028
Mindeststandards für Nichtwohngebäude treten in Kraft	2028
Regelungen für Komponenten bei Teilsanierungen treten in Kraft	Vor 2030
Mindeststandards für Wohngebäude treten in Kraft	2030

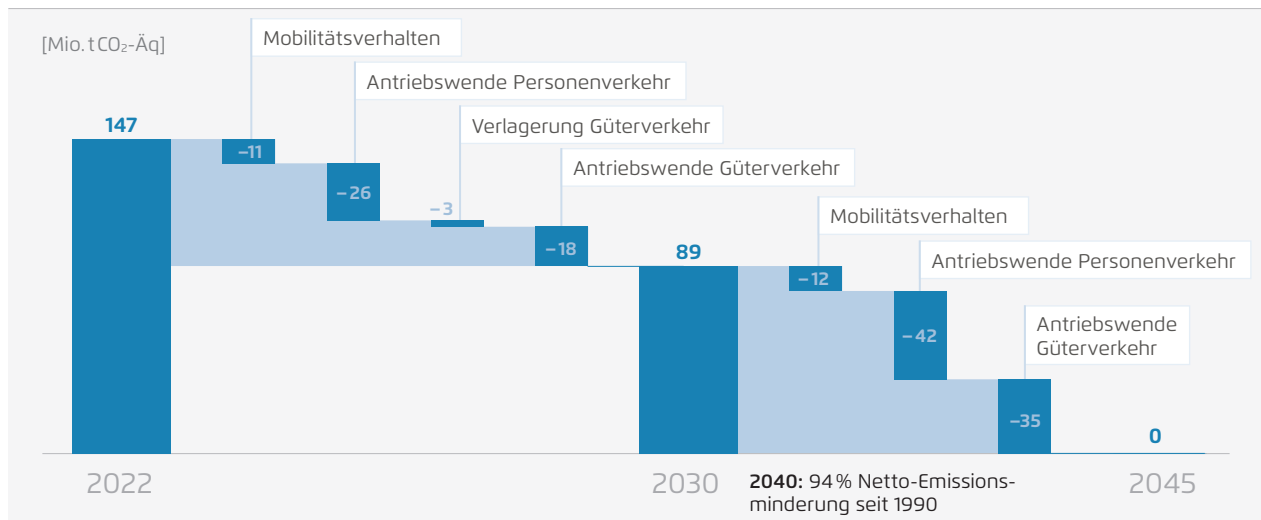
Agora Energiewende und Prognos. *Modellierter Maßnahmenbeginn ist 2026. Politische Vorbereitung muss früher erfolgen.

5.4 Verkehr

5.4.1 Übersicht

Verkehrssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. 42



Agora Verkehrswende und Öko-Institut (2024)

Verkehrssektor – Trends und Instrumente

Elektrifizierung Pkw-Verkehr

- Schneller BEV-Markthochlauf bis 2030 (12,6 Mio. im Bestand)
- Fast vollständige Elektrifizierung des Bestands bis 2045, auch durch beschleunigte Flottenerneuerung

⚙ Instrumente: EU-Flottenzielwerte; CO₂-basierte Kfz-Steuer bei Erstzulassung; Förderung günstiger und effizienter BEV; Reform Dienstwagenbesteuerung; Angleichung und Dynamisierung Energiesteuer

Elektrifizierung Lkw-Verkehr

- Schneller Markthochlauf vollelektrischer Lkw, sodass 2030 ein Drittel der Fahrleistung schwerer Lkw elektrisch erbracht wird
- Fast vollständige Elektrifizierung des Bestands bis 2045
- Aufbau der benötigten Lade- und H₂-Infrastruktur

⚙ Instrumente: EU-Flottenzielwerte; Lkw-Maut

Verlagerung und Effizienzsteigerung

- Kontinuierliche Steigerung des ÖV sowie Fuß- u. Radverkehrs; vermehrtes Car- und Ridesharing sowie Ridepooling
- Bis 2045 Rückgang des Anteils des motorisierten Individualverkehrs auf unter 60 Prozent und des Pkw-Bestands auf 40 Mio.
- Steigerung der Schienengüterverkehrsleistung

⚙ Instrumente: Steigerung und Verstetigung der Investitionen in die Schienen-, Rad- und Fußverkehrsinfrastruktur; Ausbau ÖV-Angebot; Deutschlandticket; CO₂-Bepreisung; fahrleistungsabhängige Pkw-Maut

Strom dominiert Energiemix

- Reduktion Biokraftstoffnutzung im Straßenverkehr ab 2030, maximale H₂- und PtL-Nachfrage in zweiter Hälfte der 2030er-Jahre
- Zunehmender Fokus der Nutzung alternativer Kraftstoffe auf Luft- und Schiffsverkehr

⚙ Instrumente: Fortschreibung RED (THG-Quote) und Beimischquoten gemäß eigenen Annahmen; Bereitstellung Lade- und H₂-Infrastruktur

Verkehrssektor – Kernindikatoren

	2023	2030	2045
Personenverkehr			
Bestand vollelektrischer Pkw [Mio.]	1,2*	12,6	37,8
Neuzulassungsanteil batterieelektrische Pkw [%]	18	83	100
Gesamtbestand Pkw [Mio.]	49	47,9	40,2
Verkehrsleistung Schienenpersonenverkehr [Mrd. Pkm]	102**	158	235
Modal Split MIV [% an Pkm]	77**	68	59
Güterverkehr			
Verkehrsleistung Schienengüterverkehr [Mrd. Tkm]	130**	177	182
Neuzulassungsanteil schweren Lkw mit vollelektrischem Antrieb [%]	1	71	100
Anteil elektrische Fahrleistung am Straßengüterverkehr [%]	0	33	100
Energieverbrauch			
Endenergienachfrage insgesamt [TWh]	596***	469	276
Fossile Endenergienachfrage [TWh]	547***	326	0
Stromnachfrage [TWh]	16***	95	221
Emissionen			
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq]	147***	89	0
KSG-Ziel****	n/a	82	n/a

Agora Verkehrswende und Öko-Institut, historische Daten: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), BMDV (2023): Verkehr in Zahlen 2023/2024, Zentrales System Emissionen (ZSE). *Bestand mit Stichtag 1.7. **Datenstand 2019, um keine temporären Pandemie-Effekte auf die Verkehrsleistung abzubilden. ***Datenstand 2022. ****Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6).

5.4.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage

Der **Verkehrssektor** umfasst in der Abgrenzung des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) den Straßenverkehr, den Schienenverkehr, die Küsten- und Binnenschifffahrt sowie den inländischen Luftverkehr. Mit über 95 Prozent entfallen nahezu alle Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) des Sektors auf den Straßenverkehr, die sich wiederum zu etwa 60 Prozent auf Pkw und zu knapp 40 Prozent auf Nutzfahrzeuge aufteilen. Die THG-Emissionen des Sektors entstehen durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe, insbesondere von Diesel- und Ottokraftstoff. Hinzu kommen der internationale Luftverkehr und die Seeschifffahrt, die jedoch nicht in den Gültigkeitsbereich des KSG fallen.

Viele Jahre leistete der Verkehr keinen Beitrag zur Emissionsminderung in Deutschland: Noch im Jahr 2019 lagen die Emissionen des Verkehrs auf dem

Niveau von 1990. Verminderter Verkehr im Zuge der Coronapandemie war der Hauptgrund für den sprunghaften Rückgang der Emissionen des Sektors im Jahr 2020. Mit der Rücknahme der Coronaschutzmaßnahmen stiegen die Emissionen seitdem wieder leicht an. Dadurch verfehlte der Sektor seine KSG-Sektorziele in den Jahren 2022 und 2023 deutlich. Der Projektionsbericht 2024 schätzt für die Jahre bis 2030 eine kumulierte Zielverfehlungslücke von 180 Mio. t CO₂-Äq gegenüber den Jahresemissionsmengen des Verkehrs im KSG.

Chancen, Herausforderungen und Handlungsansätze

Die Dekarbonisierungsstrategie für den Verkehrssektor ruht auf zwei tragenden Säulen: zum einen die Verlagerung vom Pkw und Lkw auf umweltverträglichere Verkehrsmittel, zum anderen die Elektrifizierung des verbleibenden Straßenverkehrs.

Dabei ist die Reduktion des fossilen Kraftstoffverbrauchs und damit der THG-Emissionen des Sektors mit mehreren Herausforderungen verbunden. Als Endverbrauchssektor ist der Verkehr in erheblichem Maße von Entscheidungen abhängig, die von privaten Haushalten oder Einzelpersonen getroffen werden. Hierbei wird oftmals nicht allein auf Basis einer systematischen Abwägung von Preisen, Reisezeiten und weiterer Kriterien entschieden, sondern es kommen auch Routinen und Gewohnheiten maßgeblich zum Tragen. Dies betrifft beispielsweise Entscheidungen über die Wahl des Verkehrsmittels, so etwa beim alltäglichen Weg zum Arbeitsort und zum Einkaufen. Aber auch die Wahl des Antriebs bei der Pkw-Anschaffung folgt häufig nicht einer reinen Optimierungslogik. Veränderungen der eingeübten Routinen und Anpassungen der Entscheidungsmuster sind eine Herausforderung für die schnelle Transformation und Dekarbonisierung des Sektors.

Die schnelle Transformation des Sektors wird zudem dadurch erschwert, dass sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr die Alternativen zum Pkw- und Lkw-Verkehr kurzfristig nur bedingt in der Lage sind, größere Verkehrsmengen aufzunehmen. Insbesondere im Schienenverkehr besteht aufgrund des über Jahre angesammelten Investitionsstaus und der bereits hohen Auslastung erheblicher Handlungsbedarf. Im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) hat das Deutschlandticket zwar maßgeblich zu einer seit der Coronapandemie wieder steigenden Nutzung beigetragen. Gleichzeitig offenbart das Ticket aber auch die Herausforderungen einer auskömmlichen ÖPNV-Finanzierung, insbesondere vor dem Hintergrund der notwendigen Ausweitung des ÖPNV-Angebots. Auch zur Steigerung der aktiven Mobilität ist eine Ausweitung der Investitionen in die Fuß- und Radverkehrsinfrastruktur erforderlich.

Um die Kapazitäten sowohl im Schienenverkehr als auch im öffentlichen Straßenpersonenverkehr auszubauen, gilt es, die bereitgestellten Finanzmittel deutlich zu erhöhen und zu verstetigen. Gleichermaßen braucht es auch im Schienengüterverkehr eine Ausweitung und Verstetigung der Mittel zum Erhalt und Ausbau der Schienen- sowie der begleitenden Infrastruktur (zum Beispiel Rangierbahnhöfe,

Umschlageterminals), um eine Verlagerung weg von der Straße zu ermöglichen. Da die Steigerung der Kapazitäten im öffentlichen Verkehr sowie auf der Schiene sehr zeitaufwändig ist, müssen die entsprechenden Maßnahmen unverzüglich ergriffen werden.

Angesichts der nur schrittweise möglichen Verlagerung – und da auch zukünftig weiterhin ein großer Teil des Verkehrs mit Pkw und Lkw abgewickelt werden wird – ist die möglichst schnelle Elektrifizierung des Straßenverkehrs zentral für die Reduktion der THG-Emissionen. Vollelektrische Fahrzeuge (insbesondere *Battery Electric Vehicle*, BEV) weisen im Pkw-Markt erst seit 2020 relevante Marktanteile auf, getrieben insbesondere durch die EU-Flottenzielwerte. Mit Blick auf die lange Verweildauer von Pkw im deutschen Bestand müssen die BEV-Marktanteile sehr schnell ansteigen, um den Pkw-Bestand hinreichend schnell zu elektrifizieren und dem Ziel der Bundesregierung von 15 Mio. BEV-Pkw im Bestand bis 2030 möglichst nahe zu kommen. Dazu braucht es über die EU-Flottenzielwerte hinaus kurzfristig weitere nationale, insbesondere nachfrageseitige Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität von elektrischen Fahrzeugen. Im Lkw-Verkehr besteht, neben den EU-Flottenzielwerten, mit der national ambitionierten Ausgestaltung der Lkw-Maut ein wichtiges nachfrageseitiges Instrument zur Elektrifizierung.

Gerade im Lkw-Verkehr ist ein hinreichend schneller und umfangreicher Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur sowie der Ladepunkte im Depot entscheidend für den schnellen Hochlauf von elektrischen Fahrzeugen. Da auch dieser Ausbau sehr zeitaufwändig ist, müssen kurzfristig Maßnahmen ergriffen werden, um die Ladeinfrastruktur rechtzeitig bereitstellen zu können.

Die Elektrifizierung des Straßenverkehrs sowie die Mobilitätswende mit der Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr (MIV) auf den Fuß-, Rad- und öffentlichen Verkehr sichern saubere, zugängliche und bezahlbare Mobilität für alle Bürgerinnen und Bürger sowie Unternehmen. Eine geringere Schadstoff- und Lärmbelastung, mit Rad- und Fußverkehr verbundene Bewegung und weniger versiegelte Flächen tragen

zu besserer Gesundheit und mehr Lebensqualität bei. Diese Entwicklungen kommen vor allem Haushalten mit geringem Einkommen zugute.

5.4.3 Szenariopfade

Verkehrsnachfrage verlagert sich

Personenverkehr

Im Personenverkehr erfolgt eine grundlegende Mobilitätswende, ohne die Gesamtverkehrsleistung zu verringern. Die Mobilitätswende führt somit nicht zu weniger Mobilität, stattdessen wird die Mobilität mit den Erfordernissen des Klimaschutzes in Einklang gebracht. Wege werden zunehmend mit öffentlichen Verkehrsmitteln, zu Fuß oder mit dem Rad zurückgelegt. Über die Zeit gewinnt auch die geteilte Mobilität über Car- und Ridesharing sowie Ridepooling weiter an Bedeutung. Entsprechende Infrastruktur- und Angebotskapazitäten werden durch eine Ausweitung und Verstetigung von Investitionen aufgebaut.

Über den gesamten Zeitraum bis 2045 bleibt die Verkehrsnachfrage pro Einwohner in etwa konstant. Die Anteile des Schienenverkehrs, des öffentlichen Straßenverkehrs sowie des Fuß- und Radverkehrs an

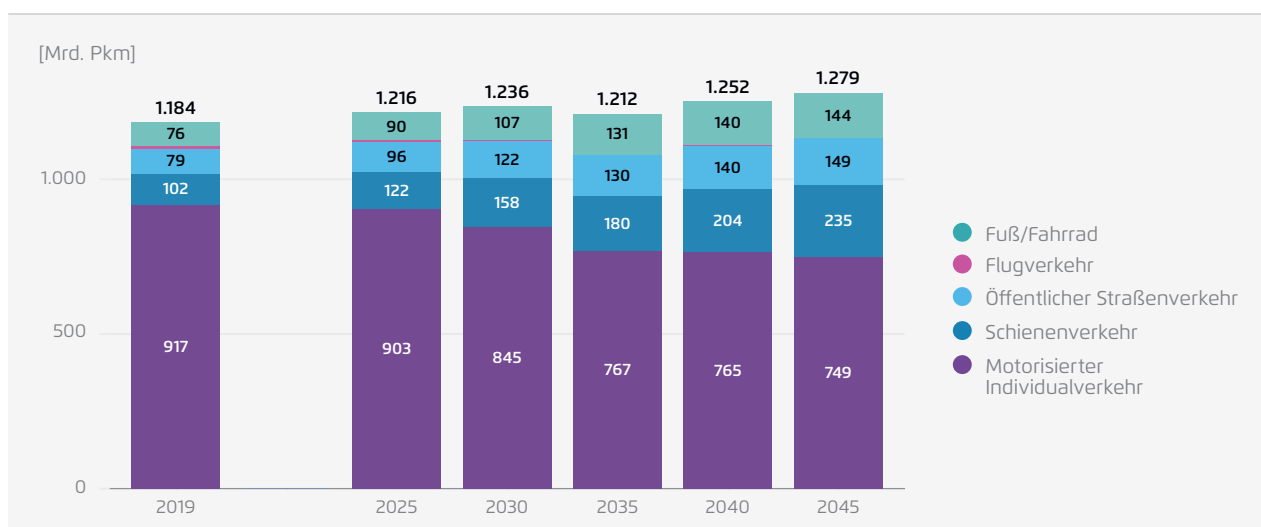
der Gesamtverkehrsnachfrage steigen bis 2045 stetig. Da die Steigerung von Kapazitäten im öffentlichen Verkehr im Allgemeinen sowie auf der Schiene im Besonderen sehr zeitaufwändig ist und sich zudem ein Investitionsstau gebildet hat, ist dies nur möglich, wenn zeitnah ausreichende Investitionen in die Infrastruktur erfolgen. Preisliche Impulse, darunter der CO₂-Preis sowie die ab 2029 erfolgende schrittweise Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut für alle Antriebe, wirken im Pkw-Verkehr als Push-Faktoren und führen zur Verlagerung aus dem MIV. Dadurch werden die steigenden Kapazitäten im öffentlichen Verkehr vollständig ausgeschöpft. Durch die schnelle Flottenumwälzung des Pkw-Bestands hin zu energieeffizienten Elektrofahrzeugen sinken die Nutzungskosten im MIV, daher verlangsamt sich der Rückgang von dessen Verkehrsleistung ab dem Jahr 2035. Die Ausweitung von geteilten Mobilitätsangeboten führt zu steigenden Besetzungsgraden der einzelnen Fahrzeuge, weshalb die Fahrleistung des MIV stärker sinkt als die Verkehrsleistung. Abbildung 43 stellt die Entwicklung der Personenverkehrsleistung nach Verkehrsmitteln dar.

Güterverkehr

Die Güterverkehrsleistung steigt aufgrund des zugrundeliegenden Wachstums des Bruttoinlands-

Entwicklung der Personenverkehrsnachfrage

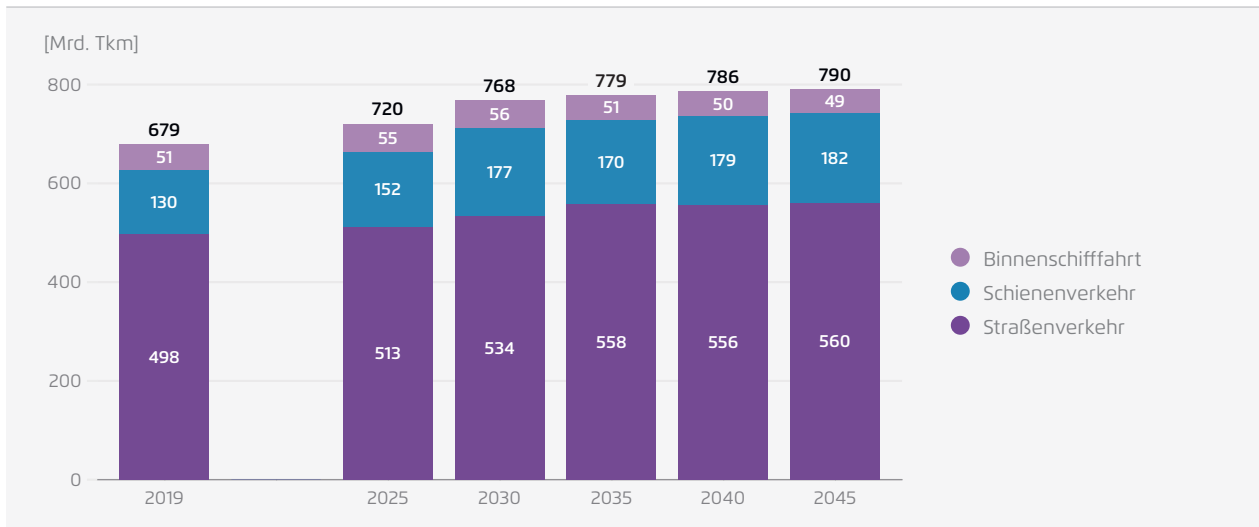
→ Abb. 43



Agora Verkehrswende und Öko-Institut (2024). Pkm = Personenkilometer

Entwicklung der Güterverkehrsnachfrage

→ Abb. 44



Agora Verkehrswende und Öko-Institut (2024). Tkm = Transportkilometer

produkts (BIP) stetig – obgleich moderat – an. Durch die Ausweitung und Verstetigung von Investitionen in die Schieneninfrastruktur sowie preisliche Impulse im Straßengüterverkehr, darunter insbesondere ein Inflationsausgleich bei der Energiesteuer und die sukzessive Angleichung der Steuersätze für alle fossilen Kraftstoffe, was eine Abschaffung des Dieselprivilegs bedeutet, steigt der Anteil des Schienengüterverkehrs an der Güterverkehrsleistung bis 2030 auf 23 Prozent – gegenüber 19 Prozent im Jahr 2019. Das Ziel der Bundesregierung, jede vierte Tonne per Schiene zu befördern, wird dennoch verfehlt. Nach 2030 verändert sich die Güterverkehrsleistung auf der Schiene nur noch geringfügig. Ursächlich hierfür sind verschiedene Effekte. Zum einen flacht das Wachstum des Güterverkehrs insgesamt nach 2030 deutlich ab und Güterstruktureffekte erschweren die Verlagerung auf die Schiene: Auf dem Weg in eine klimaneutrale Welt sinkt der Anteil bestimmter Gütergruppen, gerade von Massengütern wie Braunkohle, Steinkohle oder Rohöl, für die sich ein Transport per Schiene besonders anbietet. Zum anderen werden Transporte auf der Straße durch die hohe Energieeffizienz der zunehmend die Flotte dominierenden elektrischen Lkw relativ günstiger. Zudem wird der Personenverkehr beim Ausbau der Schieneninfrastruktur priorisiert. Abbildung 44 stellt die Entwicklung der Güterverkehrsnachfrage dar.

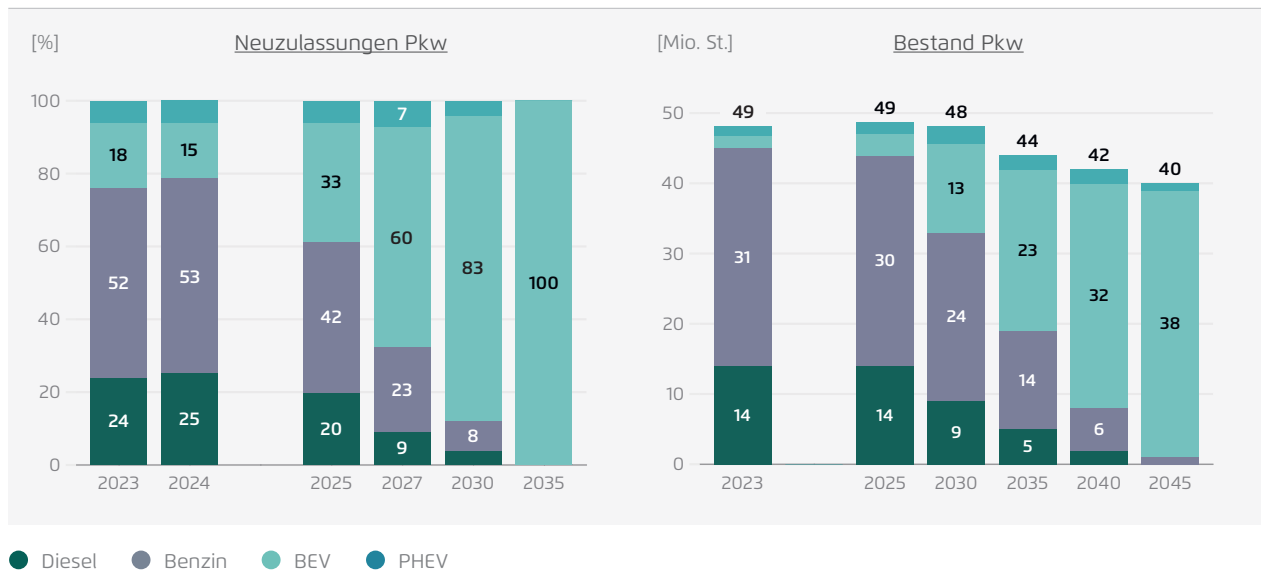
Elektrifizierung der Fahrzeugflotte

Nach dem Rückgang der Neuzulassungen von elektrischen Pkw im Jahr 2024 steigt ihr Neuzulassungsanteil im Jahr 2025 wieder, bedingt durch gestiegene Anforderungen im Rahmen der EU-Flottenziele. Zusätzliche fiskalische Maßnahmen auf nationaler Ebene – insbesondere eine Reform von Kfz- und Dienstwagenbesteuerung – lassen diesen Anteil stetig auf 83 Prozent im Jahr 2030 steigen. Ermöglicht wird die beschleunigte Elektrifizierung des Pkw-Verkehrs auch durch den adäquaten Ausbau der Ladeinfrastruktur. Ab 2035 beschränkt die geltende Fassung der EU-Flottenzielwerte die Pkw-Neuzulassungen schließlich auf emissionsfreie Fahrzeuge und damit aufgrund der geringsten Gesamtnutzungskosten faktisch fast vollständig auf BEV. Weitere Antriebsarten, wie über Brennstoffzellen betriebene Fahrzeuge (*Fuel Cell Electric Vehicle*; FCEV) spielen aufgrund ihrer höheren Gesamtkosten nur eine vernachlässigbare Rolle.

Mit den rasch steigenden Neuzulassungsanteilen von BEV-Pkw steigt deren Bestand bis 2030 auf 12,6 Mio. Fahrzeuge. Hinzu kommen 2,5 Mio. Plug-in-Hybride (PHEV), die jedoch bei den Neuzulassungen bis 2030 und danach eine immer geringere Rolle spielen. Aufgrund der Versäumnisse der vergangenen Jahre kann das Regierungsziel von 15 Mio.

Entwicklung der Neuzulassungen und des Bestands an Pkw

→ Abb. 45



Agora Verkehrswende und Öko-Institut (2024). BEV = Battery Electric Vehicle; PHEV = Plug-in Hybrid Electric Vehicle

vollelektrischen Pkw im Bestand bis 2030 dennoch nicht mehr erreicht werden – auch wenn steigende Kosten für Verbrenner-Pkw dazu führen, dass sich Haushalte früher als heute üblich von ihren Fahrzeugen trennen. Der Pkw-Bestand sinkt bis 2030 leicht, von knapp 49 Millionen Fahrzeugen in 2023 auf knapp 48 Millionen. Bis 2045 reduziert sich der Bestand in größerem Maß auf 40 Millionen Pkw, vor allem bedingt durch die Verlagerung zu öffentlichem Verkehr, Fuß- und Radverkehr sowie die stärkere Nutzung von geteilten Mobilitätsangeboten. Abbildung 45 stellt die Entwicklung der Pkw-Neuzulassungsanteile und des Pkw-Bestands dar.

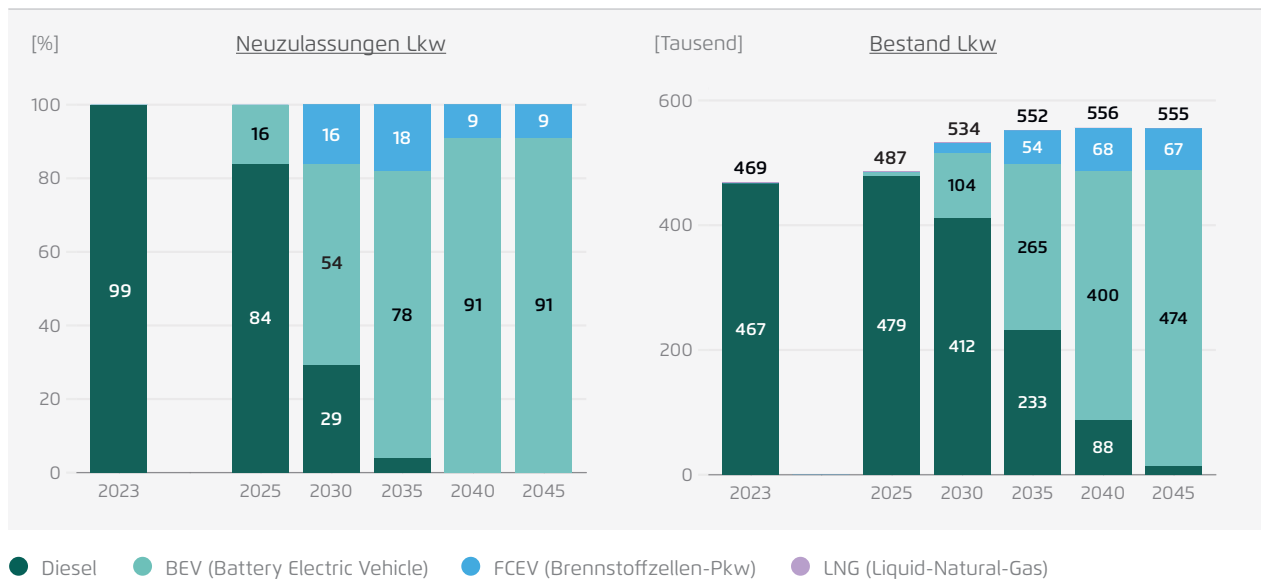
Der hier gezeigte Umstieg auf elektrische Fahrzeuge findet dabei nicht nur im europäischen Fahrzeugmarkt statt, sondern auch in anderen großen Fahrzeugmärkten (insbesondere China und Nordamerika). Der Aufbau von Wertschöpfungsketten für diese neuen Technologien durch einen starken Heimatmarkt ist daher bedeutend für den Wirtschaftsstandort Deutschland und Europa, sowohl zum Erhalt der globalen Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Industrie als auch um neue geopolitische Abhängigkeiten (beispielsweise bei Batterien und Komponenten) zu vermeiden.

Lkw

Bei den Lkw steigt der Anteil von Nullemissionsfahrzeugen ebenfalls stetig, getrieben insbesondere von der ambitionierten CO₂-Differenzierung der Lkw-Maut sowie von den EU-Flottenzielwerten für schwere Nutzfahrzeuge. Im preissensitiven Lkw-Verkehr bewirkt die CO₂-Bepreisung für eine Vielzahl an Nutzungskonstellationen Kostenvorteile von Nullemissionsfahrzeugen. Dementsprechend schnell steigt deren Anteil an den Neuzulassungen (71 Prozent im Jahr 2030 für Lkw > 12 t zGG). Auch bei den Lkw dominieren die BEV, Brennstoffzellenfahrzeuge nehmen jedoch ab Ende der 2020er-Jahre eine nicht vernachlässigbare Rolle im Antriebsmix ein. Ein hinreichend schneller und umfangreicher Ausbau der Lkw-Lade- und der Wasserstoffbetankungsinfrastruktur ist entscheidend für einen schnellen Antriebswechsel im Lkw-Verkehr. Der Anteil der elektrischen Fahrleistung beträgt im Jahr 2030 ein Drittel, damit wird das Ziel der Bundesregierung erreicht. Aufgrund relativ kurzer Verweildauern von Lkw steigt der Anteil von Nullemissionsfahrzeugen am Gesamtbestand ab 2030 rasch. Die Gesamtzahl an schweren Lkw steigt aufgrund der steigenden Straßengüterverkehrsnachfrage weiter an. Abbildung 46 stellt die Entwicklung der

Entwicklung der Neuzulassungen und des Bestands von schweren LKW*

→ Abb. 46



Agora Verkehrswende und Öko-Institut (2024). * >12 t zulässiges Gesamtgewicht; BEV = Battery Electric Vehicle; FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellen-Pkw); LNG = Liquid Natural Gas

Neuzulassungsanteile bei schweren Lkw samt deren Bestandsentwicklung dar.

5.4.4 Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen

Insbesondere die Elektrifizierung des Pkw- und Lkw-Verkehrs bewirkt einen deutlichen Rückgang des Endenergiebedarfs des Sektors. Auch die Verlagerung auf energieeffizientere öffentliche Verkehrsmittel sowie im Güterverkehr auf die Schiene trägt zur Steigerung der Effizienz des Verkehrssystems bei. Der Endenergiebedarf sinkt von 596 TWh im Jahr 2022 auf 276 TWh im Jahr 2045, was eine Reduktion um 54 Prozent bedeutet.

Der fossile Endenergiebedarf sinkt zwischen 2022 und 2030 bereits um 40 Prozent von 547 auf 326 TWh. Gleichzeitig steigt der Strombedarf von 16 auf 95 TWh, wobei der Straßenverkehr den Schienenverkehr bereits kurzfristig als wichtigsten Stromnachfrager des Verkehrssektors ablöst. Die Verwendung von Biokraftstoffen geht im Straßenverkehr ab 2030 zurück, der Bedarf an diesen Kraftstoffen fokussiert sich zunehmend auf den Luft- und Schiffsverkehr. Dabei findet auch zunehmend ein Umstieg auf Rest- und

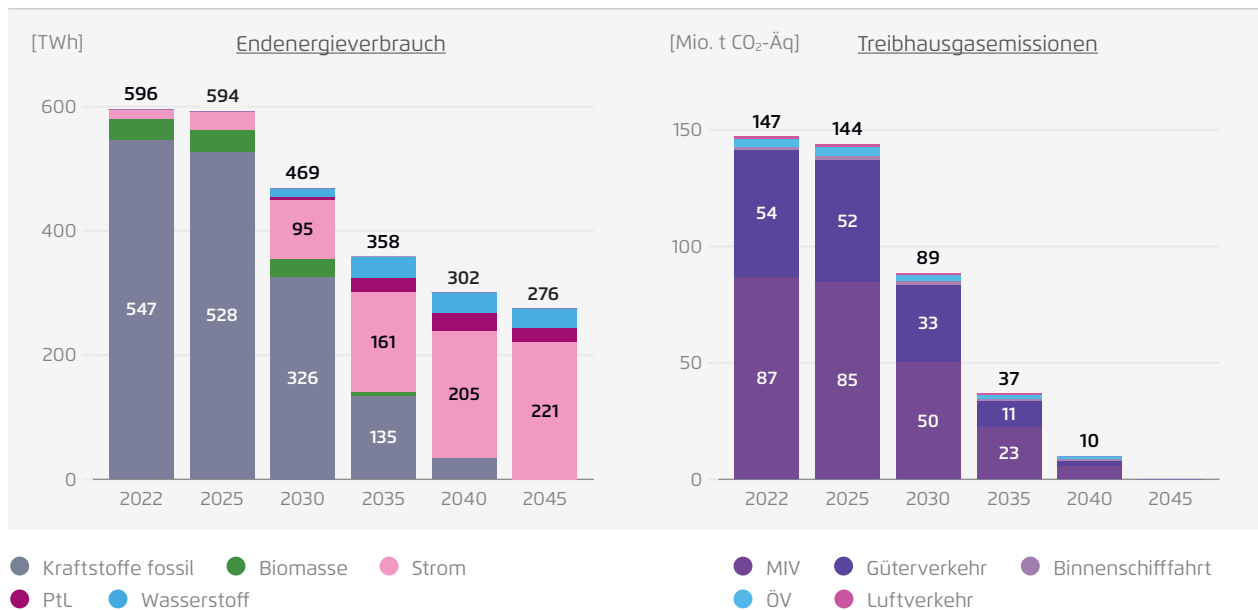
Abfallstoffe als Ausgangsrohstoff für die Herstellung fortschrittlicher Biokraftstoffe statt. Die Wasserstoffnachfrage stammt nahezu vollständig aus dem Straßengüterverkehr und steigt bis zum Jahr 2037 auf ihr Maximum von 37 TWh an. Die Nachfrage nach strombasierten Kraftstoffen (*Power to Liquid*, PtL) steigt bis auf 29 TWh im Jahr 2039 und sinkt insbesondere aufgrund des Rückgangs an Verbrennerfahrzeugen bis 2045 wieder auf 22 TWh ab.

Im Jahr 2045 wird der Endenergiebedarf des Sektors mit 221 TWh zu über 80 Prozent durch Strom gedeckt, weitere 32 TWh durch Wasserstoff, 22 TWh durch strombasierte Kraftstoffe und 0,3 TWh durch Biokraftstoffe, die im nationalen Flugverkehr zum Einsatz kommen. Geringe Bedarfe an fossilem Kerosin verbleiben im inländischen Luftverkehr (0,2 TWh), da die Kraftstoffe erst im Jahr 2050 vollständig erneuerbar zur Verfügung gestellt werden können.

Die THG-Emissionen des Sektors sinken zwischen 2022 und 2030 um 40 Prozent von 147 auf 89 Mio. t CO₂-Äq vor allem durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs. Das Sektorziel des KSG für 2030 – ursprünglich in Höhe von 85 Mio. t CO₂-Äq und durch Zielverfehlungen der vergangenen Jahre zwischenzeitlich auf 82 Mio. t CO₂-Äq

Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im nationalen Verkehr

→ Abb. 47



Agora Verkehrswende und Öko-Institut (2024). PtL = Power to Liquid; MIV = Motorisierter Individualverkehr; ÖV = Öffentlicher Verkehr

angepasst – verfehlt der Verkehr dennoch um 4 Mio. t CO₂-Äq – die kumulierte Zielverfehlung für den Zeitraum 2021 bis 2030 liegt bei 110 Mio. t CO₂-Äq. Die Anteile des MIV und des Straßengüterverkehrs an den Gesamtemissionen des Sektors verschieben sich über die Zeit leicht. Der Anteil des Straßengüterverkehrs nimmt bis 2030 zu und sinkt mit der schnelleren Elektrifizierung des Lkw-Bestands (mittels BEV und FCEV) daraufhin wieder ab. Der steigende Strombedarf des Verkehrs wird mit wachsenden Anteilen von Erneuerbaren Energien an der Erzeugung schnell klimaverträglicher und bis zum Jahr 2045 auch in der Vorkette vollständig emissionsfrei (siehe Kapitel 5.1 Energiewirtschaft). Aufgrund des noch nicht vollständig aus Erneuerbaren Energien gewonnenen Kraftstoffmix im inländischen Luftverkehr fallen im Jahr 2045 geringe Restemissionen von weniger als 0,1 Mio. t CO₂-Äq an. Abbildung 47 stellt die Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern sowie der THG-Emissionen nach Verkehrsarten dar.

Internationaler Verkehr

Der internationale Verkehr umfasst den internationalen Luft- und Schiffsverkehr. Sein

Endenergiebedarf und seine THG-Emissionen beziehen sich auf die Kraftstoffmengen, die in Deutschland für den Luft- und Schiffsverkehr abgesetzt werden, abzüglich der Mengen für den inländischen Luftverkehr sowie für die Küsten- und Binnenschifffahrt. Nur letztere sind Teil des Regelungsumfangs des KSG und liegen in der Verantwortung der Bundesregierung; sie sind in Abbildung 47 beim nationalen Endenergiebedarf und den nationalen THG-Emissionen enthalten, während Emissionen und Endenergiebedarf des internationalen Verkehrs in Abbildung 48 zu finden sind. Der internationale Verkehr ist teilweise durch EU-Instrumente abgedeckt. So sind der innereuropäische Luft- und Schiffsverkehr sowie 50 Prozent des in der EU eingehenden und ausgehenden Schiffsverkehrs Teil des EU-Emissionshandels (ETS). Zum Hochlauf der erneuerbaren Kraftstoffe im internationalen Verkehr tragen insbesondere die EU-Verordnungen „ReFuelEU Aviation“ und „FuelEU Maritime“ bei. Global liegt die Verantwortung für die Emissionsminderung im Luft- und Schiffsverkehr heute bei der *International Civil Aviation Organization* (ICAO) beziehungsweise bei der *International Maritime Organization* (IMO).

Im Szenario wird der Anstieg des Endenergiebedarfs des internationalen Luftverkehrs durch ein ambitioniertes Instrumentenset gedämpft. Als Referenzszenario dienen die *Post-COVID-19 Forecast Scenarios* der ICAO, die bis 2050 ein jährliches Wachstum der Personen- und Güterverkehrsleistung von 3,4 Prozent beziehungsweise 3,6 Prozent abschätzen. Zum Instrumentenset gehören fiskalische Elemente wie die Energiebesteuerung im innereuropäischen Luftverkehr, die Anhebung der Luftverkehrssteuer sowie die vollständige Abschaffung der freien Zuteilung und die Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekten im Emissionshandel ab 2030. Insbesondere durch die schrittweise Erhöhung der Beimischung erneuerbarer Kraftstoffe gehen die THG-Emissionen des internationalen Luft- und Schiffsverkehrs ab Anfang der 2030er-Jahre zurück. Im Szenario wird von einem stetigen Hochlauf der erneuerbaren Kraftstoffe bis zur vollständigen Deckung des Endenergiebedarfs des internationalen Verkehrs bis 2050 ausgegangen. Es verbleiben jedoch auch beim Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe Nicht-CO₂-Effekte, die beim Luftverkehr in großer Flughöhe wirksam werden und das Klima negativ beeinflussen. Zu diesen Nicht-CO₂-Effekten

zählen Emissionen von Stickoxiden, Rußpartikeln und Wasserdampf ebenso wie die teilweise damit verbundene verstärkte Zirkuswolken- und Kondensstreifenbildung.³³ Im internationalen Schiffsverkehr wurden über den Hochlauf von erneuerbaren Kraftstoffen hinaus keine weiteren Maßnahmen modelliert.

Abbildung 48 stellt die Entwicklung des Endenergiebedarfs und der THG-Emissionen samt Nicht-CO₂-Effekten für den internationalen Verkehr dar.

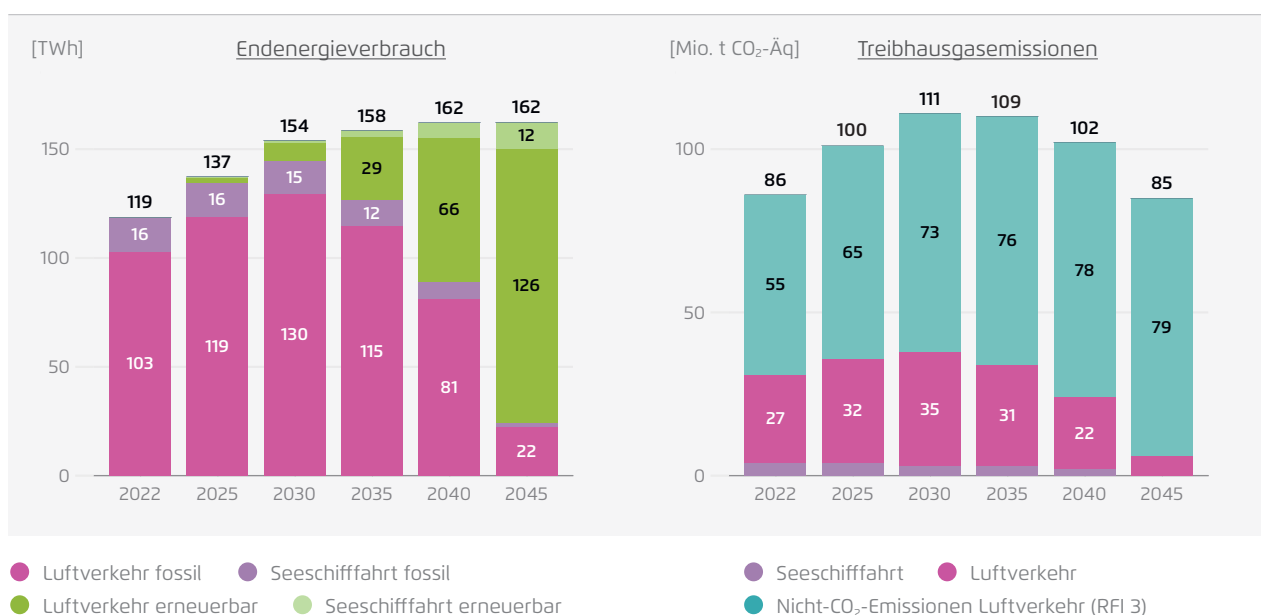
5.4.5 Zentrale Weichenstellungen

Um den Verkehrssektor auf einen steilen Reduktionspfad zu bringen, sind verschiedene Weichenstellungen nötig. Diese betreffen insbesondere die Anpassung der fiskalischen Rahmenbedingungen für die Pkw-Elektrifizierung, den Kapazitätsaufbau

³³ Zur Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte wurde ein Strahlungsantriebsindex (Radiative Forcing Index, RFI) von 3 angenommen.

Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im internationalen Verkehr inklusive Nicht-CO₂-Effekten

→ Abb. 48



im Schienenverkehr für Personen und Güter und im öffentlichen Personenstraßenverkehr sowie den Ausbau der Ladeinfrastruktur, insbesondere für die Lkw-Elektrifizierung.

Bis die nötigen Rad- und Fußwege, Schienennetze und Ladeinfrastruktur errichtet sowie die Züge und Busse angeschafft sind, braucht es einen langen Vorlauf. Und auch der Bestand an Straßenfahrzeugen wälzt sich wegen der langen Nutzungsdauer der Fahrzeuge, insbesondere der Pkw, nur langsam um.

Bei Ausbau und Erneuerung von Infrastruktur und Fahrzeugbestand sollen nach Möglichkeit natürliche Fenster für Investitionen genutzt werden. Daher muss rechtzeitig mit Planungen begonnen sowie rasch ein stabiler Ordnungs- und Finanzierungsrahmen geschaffen werden, damit 2045 klimaneutrale Mobilität für alle sichergestellt ist. Tabelle 11 zeigt, welche Schritte bis wann eingeleitet werden müssten, damit die Entwicklungen im Szenario Wirklichkeit werden können.

Zentrale Weichenstellungen im Sektor Verkehr

→ Tabelle 11

Weichenstellung	Zeitpunkt spätestens
Anpassung der fiskalischen Rahmenbedingungen für die Pkw-Elektrifizierung: → Kfz-Steuer, die sich stärker am CO ₂ -Ausstoß orientiert und unmittelbar bei der Erstzulassung greift → Angleichung der Energiesteuersätze auf Diesel und Ottokraftstoff samt Inflationsausgleich; → Dienstwagenbesteuerung, bei der der pauschal zu versteuernde geldwerte Vorteil von Verbrenner-Dienstwagen von heute 1 auf 1,5 Prozent angehoben wird	2025*
Kaufförderung bzw. Finanzierungsunterstützung für E-Autos mit Staffelung nach Preis und Energieverbrauch sowie sozialer Ausgestaltung	2025
Steigerung und Verstetigung der Mittel sowie Beschleunigung der Planung für einen schnellen Ausbau der Schienen-, Fuß- und Radverkehrsinfrastruktur sowie des ÖPNV-Angebots	2025
Ausweisung von öffentlichen Flächen für Ladepunkte sowie die Standardisierung von Ladeeinrichtungen	2025
Förderung der öffentlichen Ladeinfrastruktur – insbesondere für Lkw – sowie der Ladepunkte im Depot	2025
Energiebesteuerung von Kraftstoffen im innereuropäischen Luftverkehr sowie Anhebung der Ticketsteuer	2025
Schrittweise Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut	Ab 2029
Vollständige Abschaffung der freien Zuteilung und die Berücksichtigung von Nicht-CO ₂ -Effekten im Emissionshandel ab 2030	Ab 2030

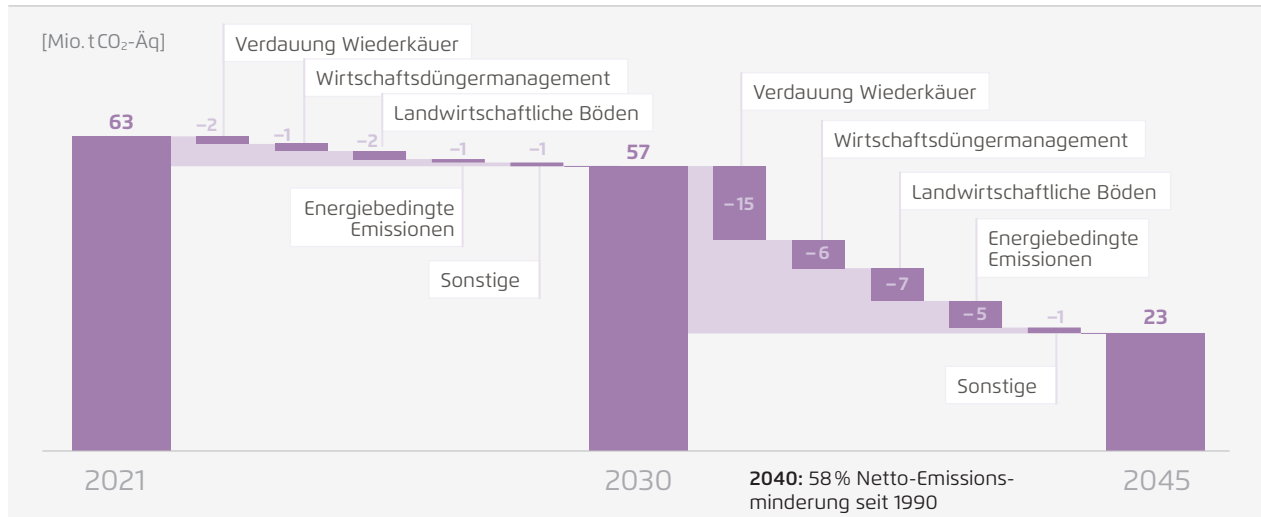
Agora Verkehrswende und Öko-Institut. *Modellierter Maßnahmenbeginn ist 2026. Politische Vorbereitung muss früher erfolgen.

5.5 Landwirtschaft

5.5.1 Übersicht

Landwirtschaftssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. 49



Agora Agrar und Öko-Institut (2024) basierend auf Umweltbundesamt (2023), Agora Agriculture (2024) und Umweltbundesamt (2024)

Landwirtschaftssektor – Trends und Instrumente

Nachhaltige Ernährung und Nutztierhaltung

- Reduktion des Tierbestands um 44 Prozent ggü. 2021 (gemessen in Großvieheinheiten), vor allem induziert durch eine geringere Nachfrage nach tierischen Produkten
- Erhöhung des Tierwohls und Ausweitung der grünlandbasierten Fütterung
- Nutzung verfügbarer technischer THG-Minderungsmaßnahmen. Darunter fallen anaerobe Vergärung, Zusatzstoffe in der Fütterung und im Wirtschaftsdünger, Züchtung, Nutzung Erneuerbarer Energien und Steigerung der Energieeffizienz

- ⚙️ Instrumente: Förderung einer nachhaltigen Ernährung; Stärkung des Tierwohls über eine Tierwohlprämie und Anhebung verbindlicher Standards

Nachhaltiger Pflanzenbau und strukturreiche Agrarlandschaft

- Verringerung der Stickstoffverluste aus Wirtschaftsdüngern durch verbesserte Lagerung und Ausbringung
- Umfangreicher Einsatz von technischen Maßnahmen zur Reduktion der N₂O-Emissionen aus Böden z. B. *Precision Farming* und Zusatzstoffe in Düngemitteln
- Etablierung von Gehölzen auf Agrarflächen, größtenteils zur Produktion fester Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung
- Ausweitung von Biodiversitätsflächen, Grünlandextensivierung
- Vielgliedrige Fruchtfolgen und Diversifizierung der Produktion zugunsten von Hülsenfrüchten, Obst und Gemüse aufgrund der erhöhten Nachfrage

- ⚙️ Instrumente: Fokussierung der EU-Agrarförderung auf Gemeinwohlleistungen; zielgerichtete Düngepolitik; Einführung eines Emissionshandels für die Landwirtschaft; Anreize für die stoffliche Nutzung von Biomasse

Landwirtschaftssektor – Kernindikatoren

	2021	2030	2045
Tierbestände			
Milchkühe und sonstige Rinder [Mio. Großvieheinheiten]	7,91	7,42	4,51
Schweine und Geflügel [Mio. Großvieheinheiten]	3,08	2,62	1,62
Weitere Indikatoren			
Stickstoffüberschüsse pro Hektar ggü. 2020 [%]		-15	-51
Bioenergie und Feedstocks für stoffliche Nutzung aus der Landwirtschaft [TWh]	76	88	120
Energieverbrauch in der Landwirtschaft [TWh]	36	34	26
Neue Gehölze auf der landwirtschaftlichen Fläche [Mio. ha]	0	0,20	1,68
Emissionen			
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq]	62,5	57	23
KSG-Ziel*	n/a	58	n/a

Agora Agrar und Öko-Institut (2024). *Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6)

5.5.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage

Im Landwirtschaftssektor fallen im Wesentlichen Emissionen aus der Nutztierhaltung, dem Wirtschaftsdüngermanagement und Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden an. Mehr als die Hälfte der Emissionen stammt aus der Nutztierhaltung – hauptsächlich durch verdauungsbedingte Methanemissionen von Wiederkäuern. Etwa ein Viertel sind Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden; energiebedingte Emissionen machen nur etwa zehn Prozent aus.

Die Landwirtschaft und die landwirtschaftliche Nutzung von Moorböden, die zum Großteil im Sektor *Land Use, Land Use Change, and Forestry* (LULUCF) erfasst wird, verursachten im Jahr 2021 zusammen etwa 12,6 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen. Dieser Anteil wird in den kommenden Jahren aufgrund der sinkenden Treibhausgasemissionen anderer Sektoren steigen.

Von 2005 bis 2016 sind die landwirtschaftlichen Emissionen um 5 Prozent angestiegen. Seit 2016 sanken sie dann insgesamt um 12 Prozent beziehungsweise 8,1 Mio. t CO₂-Äq (UBA 2023). Dies liegt vor allem an abnehmenden Beständen in der Nutztierhaltung und der Verringerung des Stickstoffeinsatzes.

Ein Grund für diese Entwicklung ist, dass der Verzehr tierischer Produkte in Deutschland rückläufig ist. Im Zeitraum von 2018 bis 2023 sank der Pro-Kopf-Verzehr von Fleisch um 15 Prozent und der von Milchprodukten um sieben Prozent. Dieser Trend, der bislang weitgehend ohne politische Anreize für einen nachhaltigeren Konsum erfolgt ist, stellt für tierhaltende Betriebe eine Herausforderung dar.

Der Projektionsbericht (UBA 2024) geht davon aus, dass die Emissionen des Landwirtschaftssektors im Mit-Maßnahmen-Szenario bis zum Jahr 2030 gegenüber 2021 um acht Prozent sinken.

Chancen, Herausforderungen und Handlungsansätze

Die Landwirtschaft produziert nicht nur Lebens- und Futtermittel und nachwachsende Rohstoffe für die Bioökonomie. Sie pflegt und gestaltet Landschaften und Ökosysteme, ist für das Wohlergehen von Nutztieren verantwortlich und kann dazu beitragen, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen und Kohlenstoff in Pflanzen und Boden zu binden. Die Landwirtschaft kann einen deutlich größeren Beitrag zur Klimaneutralität leisten als bisher, wenn ihre Treibhausgasemissionen substanziell sinken, mehr Kohlenstoff auf landwirtschaftlichen Flächen

gespeichert wird und sie mehr Biomasse für die Bioökonomie produziert.

Gleichzeitig ist es möglich, die biologische Vielfalt in Agrarlandschaften zu erhöhen und das Tierwohl zu verbessern. Klimaneutral wird die Landwirtschaft aber nicht, denn nicht alle mit der Haltung von Tieren und der Bewirtschaftung von Böden verbundenen Emissionen lassen sich vermeiden. Die verbleibenden Emissionen müssen im Jahr 2045 daher durch negative Emissionen ausgeglichen werden.

Außerdem ist es wichtig, die Landwirtschaft den Folgen des Klimawandels anzupassen. Resiliente Systeme sind eine wichtige Grundlage für die Produktivität des Sektors. Besonders wertvoll sind Maßnahmen für den landwirtschaftlichen Klimaschutz und die Klimaanpassung, wenn sie Zusatznutzen für weitere Umweltschutzziele wie den Schutz der Biodiversität oder den Boden- und Gewässerschutz sowie das Tierwohl leisten.

Wichtige Handlungsfelder für einen größeren Beitrag zum Klimaschutz sind die Förderung einer stärker pflanzenbasierten Ernährung und damit einhergehend die Verringerung des Konsums und der Produktion tierischer Produkte. Hierzu bedarf es fairer Ernährungsumgebungen für Konsumentinnen und Konsumenten, die es ihnen leicht machen, sich gesund und nachhaltig zu ernähren.

Im Bereich von Landnutzung und Ackerbau sind die Förderung von strukturvielfältigen Agrarlandschaften, die mehr Gehölze wie etwa Hecken, schnellwachsende Bäume oder Agroforstsysteme als heute enthalten, und der effiziente Einsatz von Düngemitteln relevante Ansätze für den Klimaschutz. Auch technische Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen sowohl in der Tierhaltung als auch im Ackerbau können einen Beitrag zur Emissionsminderung leisten. Besonders hohe Emissionen fallen bei der landwirtschaftlichen Nutzung entwässerter Moorstandorte an. Diese werden aber im Sektor LULUCF bilanziert.

Diese Potenziale der Landwirtschaft können mobilisiert werden, wenn durch verbesserte politische

Rahmenbedingungen der Beitrag der Landwirtschaft zu Klimaschutz und Nachhaltigkeit zu einer ökonomischen Chance für Landwirtinnen und Landwirte wird. Zentral sind hierbei marktbasierende Instrumente, wie etwa die Bepreisung von Treibhausgasemissionen, und staatliche Zahlungen für die Bereitstellung öffentlicher Güter. Zu den öffentlichen Gütern zählen beispielsweise die Speicherung von Kohlenstoff, die Erhöhung des Tierwohls oder der Schutz der biologischen Vielfalt.

5.5.3 Szenariopfade

Nachhaltige Ernährung und Nutztierhaltung

In dem Szenario basiert die Reduktion der Nutztierbestände auf einem reduzierten Konsum tierischer Produkte. Ohne eine Verringerung der Nachfrage würde der Rückgang der Produktion von tierischen Nahrungsmitteln zu einer Verlagerung der Produktion in andere Länder führen (*Leakage*-Effekt). Die Verringerung der Nachfrage nach tierischen Produkten ist daher eine wichtige Voraussetzung für einen substanziellen Beitrag der Landwirtschaft zum Erreichen der Klimaneutralität.

In dem Szenario wird angenommen, dass die Nachfrage nach tierischen Produkten bis 2030 weiterhin abnimmt und sich damit auch der seit 2018 bestehende Rückgang der Nutztierbestände fortsetzt. Damit folgen die Annahmen des Szenarios weitgehend dem Referenzszenario im Projektionsbericht 2024 (UBA 2024).

Ab 2030 skizziert das Szenario eine deutlichere Veränderung: Faire Ernährungsumgebungen tragen dazu bei, dass eine stärker pflanzenbetonte Ernährung an Bedeutung gewinnt. Im Jahr 2045 werden im Vergleich zum Jahr 2021 etwa halb so viele tierische Produkte konsumiert. Diese Entwicklung trägt dazu bei, dass sich auch die Nutztierbestände bis 2045 nahezu halbieren. Eine solche Entwicklung ist für viele tierhaltende Betriebe eine Herausforderung und deshalb ist es wichtig, ihnen andere Einkommensmöglichkeiten zu eröffnen. Die Honorierung eines höheren Tierwohls ist eine solche Einkommensmöglichkeit.

Technische Minderungsoptionen spielen im Szenario erst ab 2030 eine zunehmende Rolle. Aktuell eher wenig verbreitet, können sie mittelfristig jedoch breit angewendet werden. Zu den technischen Optionen zählen die Ausweitung der Wirtschaftsdüngervergärung, die Umsetzung weiterer emissionsmindernder Maßnahmen im Stall und Lager wie beispielsweise die Ansäuerung der Gülle, der Einsatz von Nitrifikationshemmstoffen im Wirtschaftsdünger oder die Gülle-

Daneben wird die Fütterung im Hinblick auf eine effiziente Landnutzung weiter optimiert. Für Wiederkäuer gewinnt die grünlandbasierte Fütterung an Bedeutung. Das geschieht sowohl in Form von Weidehaltung als auch über eine allgemeine Steigerung des Grasanteils in der Futtermittelration.

Ackerbau und strukturreiche Agrarlandschaften

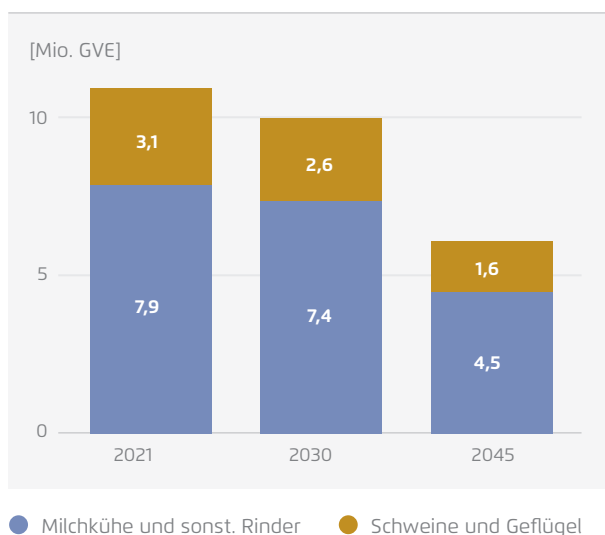
Die Flächennutzung verändert sich in dem Szenario bis 2045:

Die Strukturvielfalt in der Agrarlandschaft wird durch eine größere Kulturartendiversität und durch Streifenanbau erhöht. Außerdem hat die stärkere Integration von Gehölzstrukturen auf landwirtschaftlichen Flächen, zum Beispiel in Form von Kurzumtriebsplantagen und Agroforstsystemen, vielfältige Potenziale. Gehölze binden CO₂ aus der Atmosphäre in der oberirdischen Biomasse und im Wurzelsystem, produzieren Biomasse, mit der fossile Rohstoffe ersetzt werden können, und leisten einen Beitrag zum Schutz der Biodiversität und zur Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel, wenn sie sinnvoll in die Agrarlandschaft integriert werden.

Der Kohlenstoffgehalt in landwirtschaftlichen Böden bleibt im Szenario stabil. Möglich wird das durch humuserhaltende Fruchtfolgen mit einem hohen Anteil an Zwischenfrüchten, angepasste Bodenbearbeitung und bedarfsgerechte Düngung.

Die Stickstoffbilanzüberschüsse und damit die Lachgasemissionen aus der Düngung sinken in dem Szenario bis 2045 deutlich ab. So fällt aufgrund sinkender Nutztierbestände in den tierintensiven Regionen weniger Wirtschaftsdünger an. Eine emissionsarme Wirtschaftsdüngerausbringung trägt zur Senkung der Überschüsse bei, ebenso wie die Optimierung der Nährstoffkreisläufe beispielsweise durch die Vergärung von Reststoffen und Zwischenfrüchten. Maßnahmen wie *Precision Farming* und der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren bei der Stickstoffdüngung wirken ebenfalls emissionsmindernd.

Entwicklung des Tierbestands → Abb. 50



Agora Agrar und Öko-Institut (2024) basierend auf Umweltbundesamt (2023), Agora Agriculture (2024) und Umweltbundesamt (2024). GVE = Großvieheinheiten

kühlung. Eine angepasste Zucht von Wiederkäuern kann die Widerstandsfähigkeit gegenüber Umweltstressoren erhöhen sowie die Futtereffizienz in grünlandbasierten Fütterungssystemen steigern. Mit bestimmten Maßnahmen könnten gezielt Methanemissionen gemindert werden. Dazu zählen die Gabe von Zusatzstoffen zur Reduktion der CH₄-Emissionen aus der anaeroben Verdauung (3-Nitrooxypropanol, Leinöl, Fütterung mit niedrigem Proteingehalt)³⁴, die nitratreduzierte Fütterung sowie die Impfung gegen methanogene Bakterien.

³⁴ In Bezug auf die Reduktion der verdauungsbedingten CH₄-Emissionen durch Züchtung, Fütterung etc. bestehen noch große Unsicherheiten in Bezug auf die langfristige Minderungswirkung sowie die Umwelt- und Gesundheitseffekte.

Energieverbrauch in der Landwirtschaft

Energiebedingte Emissionen können durch eine Verbesserung der Energieeffizienz und den Einsatz von Erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2045 nahezu vollständig vermieden werden. Im Bereich der Landmaschinen kann ein Teil des Energiebedarfs elektrifiziert werden, während der für viele Feldarbeiten erforderliche Leistungsbedarf, beispielsweise bei der Bodenbearbeitung oder bei der Ernte, weiterhin mit flüssigen Kraftstoffen aus Biomasse oder *Power to Liquid* erreicht wird. Gleichzeitig wird in dieser Phase des Szenarios auf landwirtschaftlichen Flächen durch die Etablierung von Wind- und Sonnenenergie ein großer Beitrag zur Energiewende geleistet.

5.5.4 Treibhausgasemissionen

In dem Szenario werden zwischen 2030 und 2040 viele der oben skizzierten politischen Maßnahmen in der Breite wirksam, sodass der Reduktionspfad der Treibhausgasemissionen in diesem Zeitraum steiler wird.

Im Jahr 2030 liegen die Emissionen noch bei 56,7 Mio. t CO₂-Äq. Bis zum Jahr 2045 können die Treibhausgasemissionen des Landwirtschafts-

sektors gegenüber 2021 dann um 63 Prozent auf 23,4 Mio. t CO₂-Äq reduziert werden (siehe Abbildung 51).

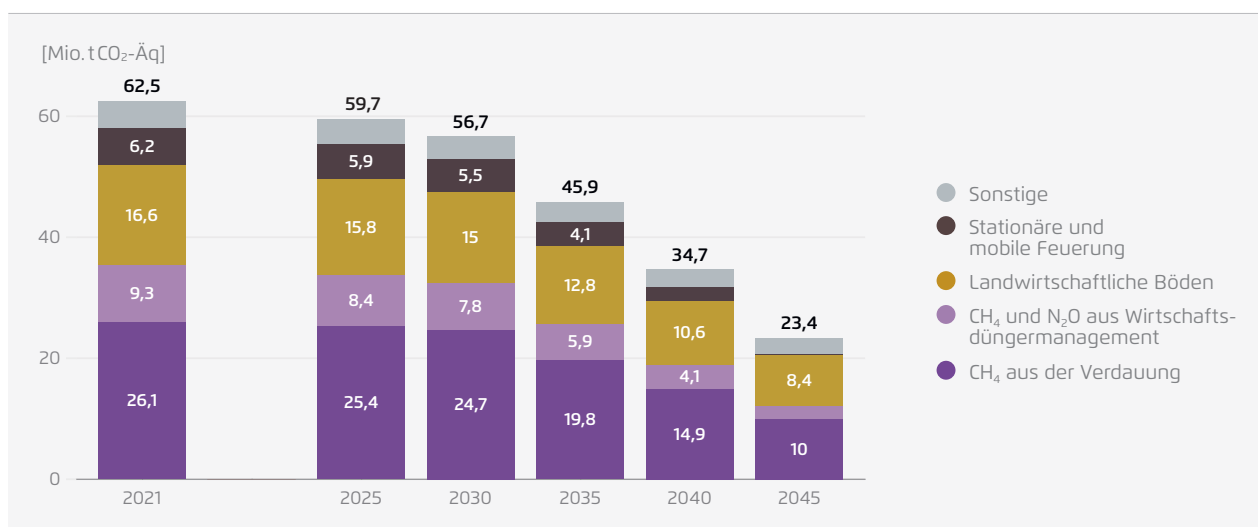
Den größten Beitrag zu dieser Reduktion leisten die geringeren Emissionen im Bereich der Tierhaltung, die gegenüber 2021 um zwei Drittel sinken. Die Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden gehen um etwa die Hälfte zurück, und die Treibhausgasminderungen im Bereich der energiebedingten Emissionen und bei den sonstigen Emissionsquellen betragen zusammen 7,7 Mio. t CO₂-Äq.

5.5.5 Politische Handlungsoptionen

Planungs- und Investitionssicherheit durch stabile politische Rahmenbedingungen sind eine wichtige Voraussetzung, damit die Landwirtschaft bis 2045 ihre vielfältigen Aufgaben wirtschaftlich tragfähig ausfüllen kann. Diese Rahmenbedingungen sollten so gestaltet werden, dass die Transformation der Landwirtschaft im Sinne des Klimaschutzes wirtschaftliche Chancen eröffnet. Ein ambitionierter Minderungspfad für Treibhausgasemissionen ab 2030 braucht zeitlichen Vorlauf. Daher ist es wichtig, zeitnah förderliche politische Rahmenbedingungen zu schaffen. Einige Optionen hierfür werden im Folgenden vorgestellt.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft

→ Abb. 51



Agora Agrar und Öko-Institut basierend auf Umweltbundesamt (2023), Agora Agriculture (2024), Umweltbundesamt (2024)

Eine wichtige Handlungsoption ist eine umfassende Klimapolitik für die Landwirtschaft und die landwirtschaftliche Nutzung der Moore. Bis 2030 sollten die Eckpfeiler stehen. Dazu gehören unter anderem klare Zielvereinbarungen über die Höhe der Treibhausgasemissionen für die Jahre 2040 und 2045. Die Bepreisung von Emissionen, aber auch die Entlohnung negativer Emissionen setzen Anreize für den Klimaschutz. Ein mögliches Instrument ist ein EU-Emissionshandel für die Landwirtschaft und landwirtschaftlich genutzte Moore. Dieser Emissionshandel sollte die wichtigsten Emissionsquellen einbeziehen: die Emissionen aus der Tierhaltung, die Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden und die Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Mooren. Eine Bepreisung der Emissionen aus der Tierhaltung sollte mit einem Grenzausgleich für emissionsintensive Produkte wie etwa Milchpulver, Butter und Rindfleisch einhergehen.

Die Honorierung der Bereitstellung öffentlicher Güter ist ein wichtiges Element eines förderlichen politischen Rahmens. Ein Instrument hierfür ist die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) der EU. Diese sollte zunehmend zur Entlohnung von gesellschaftlich gewünschten Leistungen eingesetzt werden. Praktiken, die diese Leistungen hervorbringen, sind beispielsweise eine standortangepasste und vielfältige Fruchtfolgegestaltung, die Bewirtschaftung kleiner landwirtschaftlicher Bewirtschaftungseinheiten, der Erhalt und die Pflege halbnatürlicher Landschaftselemente sowie der Erhalt und die schonende Bewirtschaftung von Dauergrünland.

Die Ausweitung der landwirtschaftlichen Flächen mit Gehölzen kann auch durch Investitionszuschüsse

und gegebenenfalls Erhaltungsprämien für Kohlenstoff- oder Biodiversitätsleistungen unterstützt werden.

Tierwohlleistungen sollten mit staatlichen Tierwohlprämien unterstützt werden, damit die Tierhaltung in Deutschland im internationalen Wettbewerb bestehen kann. Wichtig ist, dass Landwirtinnen und Landwirte für das verbesserte Tierwohl langfristig verlässlich entlohnt werden, damit sie entsprechende Investitionsentscheidungen fällen können.

Faire Ernährungsumgebungen tragen dazu bei, dass eine gesunde und nachhaltige Ernährung zugänglich und erschwinglich für alle Bürgerinnen und Bürger ist. Hierzu gehört unter anderem, dass öffentliche Einrichtungen wie Krankenhäuser, Schulen oder Pflegeeinrichtungen eine Verpflegung anbieten, die an gesundheitliche Qualitätsstandards gebunden ist. Eine beitragsfreie Verpflegung in Kita und Schule ermöglicht allen Kindern den Zugang zu gesunden Mahlzeiten und macht Inhalte der Ernährungsbildung erlebbar.

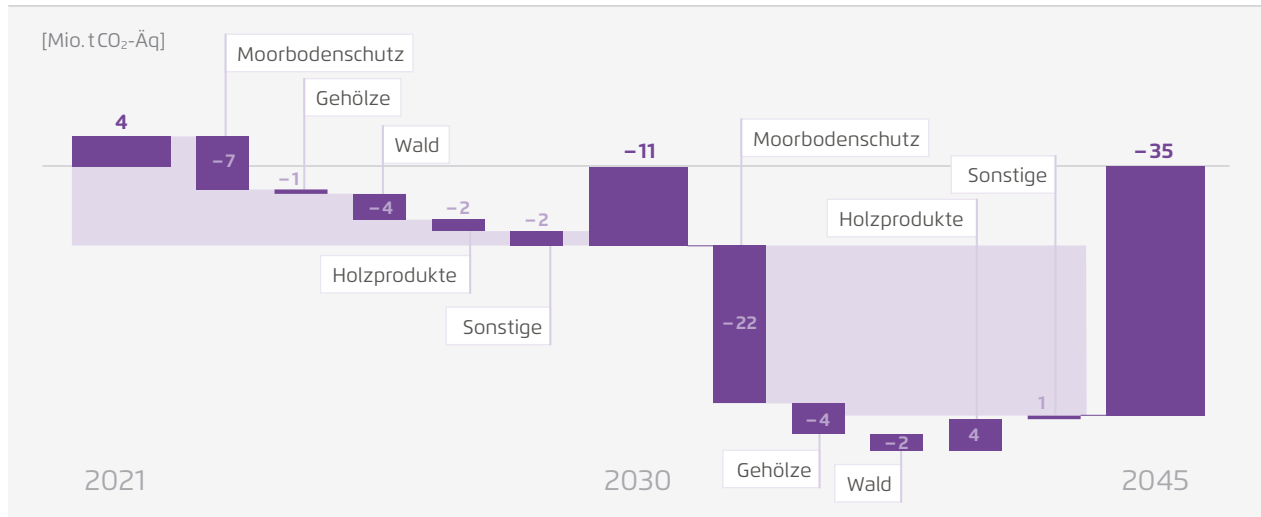
Anreize für eine stärker pflanzliche Ernährung können auch durch eine veränderte Besteuerung von Lebensmitteln gesetzt werden: zum Beispiel durch eine schrittweise Anhebung des reduzierten Mehrwertsteuersatzes für tierische Produkte auf das reguläre Maß und eine Reduzierung des Steuersatzes für Obst, Gemüse oder Hülsenfrüchte. Gleichzeitig ist es wichtig, dass die Sozial- und Fiskalpolitik den Zugang zu gesunden und nachhaltigen Ernährungsweisen auch in den sozioökonomisch vulnerablen Teilen der Bevölkerung unterstützt und so Ernährungsarmut mindert.

5.6 Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Wald (LULUCF)

5.6.1 Übersicht

LULUCF-Sektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. 52



Agora Agrar und Öko-Institut (2024)

LULUCF – Trends und Instrumente

Quellen im LULUCF-Sektor reduzieren

- Bis 2045 Wiedervernässung von ca. 80 Prozent des Acker- und Grünlands auf drainierten Moorböden (Vollvernässung)
- Schrittweise Einstellung des Torfabbaus
- Optimierung des Wassermanagements in bestehenden Feuchtgebieten

- ⚙️ Instrumente: Verbindliche langfristige Wiedervernässungsziele; Wiedervernässungsprämien; Entwicklung von Märkten für Paludikulturprodukte; Entwicklung von freiwilligen Kohlenstoffmärkten; Einbindung von Emissionen aus Moorböden in einen Emissionshandel; Anpassung der GAP zugunsten des Moorbodenschutzes

Senken im LULUCF-Sektor sichern und steigern

- Der Wald wird von einer Nettoquelle (2018–2022 aufgrund extremer Witterungsbedingungen) wieder zu einer Nettosenke; Sicherung und Erhöhung dieser Senke bis 2045
- Bindung von zusätzlichem Kohlenstoff auf neuen Wald- und Agroforstflächen

- ⚙️ Instrumente: Förderung von Waldumbau von instabilen zu widerstandsfähigeren Beständen (langfristig stabile Senke); Förderung der Extensivierung in stabileren Beständen, um die Senke zu sichern und möglichst zu erhöhen, z. B. Aussetzung der Nutzung für 20 Jahre auf bspw. 5 Prozent der Waldfläche; Maßnahmen im Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz, z. B. Anlage von Agroforst

LULUCF-Sektor – Kernindikatoren

	2021	2030	2045
Moorbodenschutz			
Anteil wiedervernässter Moorböden (heute Grünlandnutzung; voll- und teilvernässt) [%]	0	27,7	93,6
Anteil wiedervernässter Moorböden (heute Ackernutzung; voll- und teilvernässt) [%]	0	3,6	94,1
Reduktion der Torfabbaufäche [%]	0	50	100
Optimierung der Wasserstände in bestehenden Feuchtgebieten [%]	0	80	100
Wald und Holz			
Neue Gehölze auf der landwirtschaftlichen Fläche [1000 ha]	0	195	1680
Waldmehrung (Anlage/Trend) [1000 ha]	0	A: 41 T: 94	A: 128 T: 172
Verringerung der Laubholzentnahme [Mio. m ³]	0	3	7
Neu geschaffene Solar-Freiflächenanlagen (inkl. Agri-PV) [1000 ha]	0	51	144
Emissionen			
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq]*	3,6	-11	-35
KSG-Ziel	n/a	-25	-40

Agora Agrar und Öko-Institut (2024). *Basisjahr 2023.

5.6.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage

Treibhausgasemissionen, die bei der Landnutzung anfallen, werden für Deutschland mit Ausnahme der Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft im **Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Waldbewirtschaftung** (LULUCF) berichtet. Das bedeutet, dass diese Emissionen dem LULUCF-Sektor zugerechnet werden und nicht den Sektoren Landwirtschaft, Verkehr oder Gebäude. Beispiele sind die CO₂-Freisetzung bei der landwirtschaftlichen Nutzung drainierter Moorflächen, beim Bau von Verkehrswegen und bei der Anlage von Bauland. Ebenfalls werden die Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen, etwa beim Umbruch von Grünland zu Ackerland, im Sektor LULUCF berichtet.

Die Emissionsbilanz im LULUCF-Sektor wird vor allem durch vier Flächentypen beeinflusst: Acker- und Grünlandflächen auf trockengelegten Mooren, Feuchtgebiete und Wälder. In Summe betrugen im Jahr 2021 die Emissionen aus den

Nettoquellen (das heißt ohne Wald und Holzprodukte) knapp 54 Mio. t CO₂-Äq.

Trockengelegte Moore machen lediglich sieben Prozent der landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland aus. Mit 40 Mio. t CO₂-Äq pro Jahr tragen sie jedoch mit knapp fünf Prozent deutlich zu den deutschen Gesamt-Treibhausgasemissionen bei. Weitere 10 Mio. t CO₂-Äq stammen aus Feuchtgebieten. Dabei spielen Torfabbaufächen und stehende künstliche Gewässer wie Fischteiche eine wichtige Rolle.

Die wichtigste potenzielle Kohlenstoffsенке des LULUCF-Sektors ist der Wald. Er nimmt CO₂ aus der Luft auf und bindet den Kohlenstoff vor allem in Bäumen und dem Waldboden. Im Mittel der Jahre 2013 bis 2017 lag die jährliche Treibhausgasbilanz des Waldes bei -55 Mio. t CO₂-Äq. Der vierten Bundeswaldinventur (BWI) zufolge ist der Wald jedoch seit 2017 zu einer Nettoquelle von Treibhausgasen geworden (BMEL 2024). In dieser Studie wurden die Ergebnisse der vierten BWI noch nicht berücksichtigt. Angaben zu Treibhausgasbilanzen der Vergangenheit beruhen auf

der offiziellen Berichterstattung.³⁵ Demnach war der LULUCF-Sektor in den Jahren 2018 bis 2022 mit Emissionen von circa 2 Mio. t CO₂-Äq pro Jahr (4 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2021) eine geringe Nettoemissionsquelle.

Chancen, Herausforderungen und Handlungsansätze

Maßnahmen zur Steigerung der Senkenleistung im LULUCF-Sektor gehören zum natürlichen Klimaschutz, der etwa durch das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) mit öffentlichen Mitteln gefördert wird. Viele der Maßnahmen haben auch positive Auswirkungen auf die lokale Biodiversität³⁶ und tragen zur Anpassung an den Klimawandel bei. Staatliche Maßnahmen sind auch deshalb volkswirtschaftlich sinnvoll, weil die Möglichkeit, Negativemissionen zu generieren, derzeit in nennenswertem Umfang nur durch landbasierte Maßnahmen im LULUCF-Sektor besteht. Fuss et al. (2018) gehen davon aus, dass die meisten

landbasierten Maßnahmen auch langfristig kostengünstiger sein werden als die technischen Optionen.

Im Klimaschutzgesetz (KSG) werden für den LULUCF-Sektor verbindliche Ziele festgelegt: 2030 soll eine Senke von -25 Mio. t CO₂-Äq erreicht werden. Diese Senke soll sich bis 2040 auf -35 Mio. t CO₂-Äq und bis 2045 auf -40 Mio. t CO₂-Äq ausweiten. Angesichts der aktuellen Treibhausgasbilanz des LULUCF-Sektors sind diese Ziele sehr ambitioniert.

Um den Beitrag des LULUCF-Sektors zur Klimaneutralität zu verbessern, ist es wichtig, die Treibhausgasemissionen aus den landwirtschaftlich genutzten Mooren zu verringern, die Kohlenstoffspeicherung im Wald wieder zu verbessern und sie auf landwirtschaftlichen Flächen zu erhöhen.

5.6.3 Szenariopfade

Moorbodenschutz

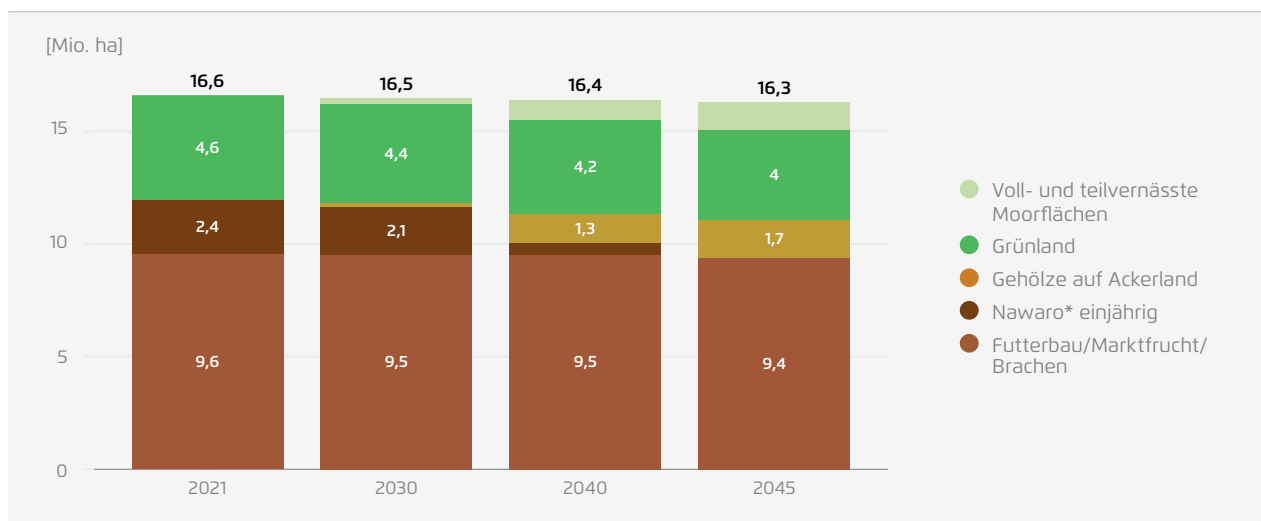
Die durch Moore verursachten Emissionen können durch drei Maßnahmen reduziert werden: erstens durch die Wiedervernässung von trockengelegten landwirtschaftlich genutzten Mooren, die zu einem großen Teil nass weiterhin bewirtschaftet werden

³⁵ In der Modellierung der Entwicklung des Waldes für diese Studie wurde der Rückgang der Senkenleistung ab 2018 in einer ähnlichen Größenordnung abgeschätzt, wie er jetzt durch die BWI bestätigt wurde. Zudem wurden in der Fortschreibung erhöhte natürliche Störungen berücksichtigt. Somit bleiben die Projektionen der absoluten LULUCF-Treibhausgasbilanz in der Zukunft von den BWI-Ergebnissen unberührt.

³⁶ Synergien sind insbesondere mit neuen Anforderungen aus dem EU-Renaturierungsgesetz zur Wiederherstellung geschädigter Ökosysteme bis 2050 zu erwarten.

Entwicklung der Flächennutzung

→ Abb. 53



Agora Agrar und Öko-Institut (2024) basierend auf FNR (2023), Destatis (2023), Umweltbundesamt (2024). *Nawaro = Nachwachsende Rohstoffe

können, zweitens durch die Einstellung des Torfabbaus und drittens durch ein optimiertes Management von Feuchtgebieten.

In dem Szenario sind bis zum Jahr 2045 knapp 80 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Moore vollständig wiedervernässt und die Wasserstände in heute schon bestehenden Feuchtgebieten optimiert. Ab 2040 ist der Torfabbau eingestellt.

Über Jahrhunderte war die Trockenlegung von Mooren gesellschaftlich gewünscht und leistete in vielen Regionen einen wichtigen Beitrag zu einer ausreichenden Versorgung mit Nahrungsmitteln. Aufgrund der historisch großen gesellschaftlichen Bedeutung der Trockenlegung ist auch die Wiedervernässung eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Diese kann nur in enger Zusammenarbeit mit Landwirtinnen und Landwirten gelingen. Insofern ist es wichtig, dass die nasse Moornutzung ihnen wirtschaftliche Perspektiven eröffnet.

Ausbau der Waldsenke

In dem Szenario wird die Senkenleistung des Waldes durch eine reduzierte Laubholzentnahme³⁷ in ausgewählten Wäldern mit stabilen Beständen erhöht. Außerdem wird die Senkenleistung durch

Managementmaßnahmen zur Anpassung des Waldes an den Klimawandel wie beispielsweise den Umbau von reinen Nadelbaumbeständen zu strukturreicheren, resilienteren Mischwaldbeständen und eine leichte Aufforstung (0,3 Mio. ha bis 2045) gefördert.

Wird die Holzernte für langlebige Holzprodukte genutzt, bleibt der Kohlenstoff weiterhin gespeichert, was die Kohlenstoffsенке stärkt. Eine Ausweitung dieser Speicherung in langlebigen Holzprodukten (insbesondere im Bau) kann durch eine Vergütung dieser Form der Kohlenstoffspeicherung und eine Förderung der Kaskadennutzung von Holzprodukten erreicht werden.

Durch den Anbau von Gehölzen auf landwirtschaftlichen Flächen können zusätzliche Treibhausgase aus der Atmosphäre gebunden werden. Die reduzierte Holzentnahme aus Wäldern wird in dem Szenario durch die Produktion von Biomasse auf landwirtschaftlichen Flächen kompensiert. Das reduziert den Druck auf die Wälder als Biomasselieferant und stärkt insgesamt die Senkenleistung des Sektors. Biomasse wird auf 1,7 Mio. ha landwirtschaftlicher Fläche in Form von Kurzumtriebsplantagen, Agroforstsystemen und Hecken produziert (Abbildung 54, siehe auch Kapitel 5.5 Landwirtschaft und Kapitel 6.1 Biomasse).

Für die Treibhausgasbilanz des LULUCF-Sektors ist auch der Bodenkohlenstoff landwirtschaftlich genutzter Böden relevant. Der Erhalt des gegenwärtigen Niveaus an Bodenkohlenstoff ist in Anbetracht des fortschreitenden Klimawandels bereits ein

³⁷ Mit der Holzernte wird dem Wald gebundener Kohlenstoff entzogen. Wenn das Holz zersetzt oder verbrannt wird, wird der Kohlenstoff als CO₂ freigesetzt. Im Jahr 2030 werden drei Mio. m³ weniger an Laubholz entnommen. Im Jahr 2045 beträgt die Reduktion der Laubholzentnahme sieben Mio. m³.

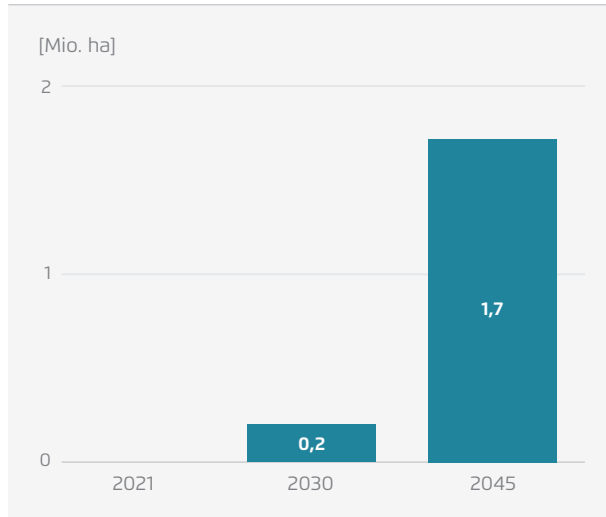


Infobox 7: Was passiert, wenn ... der Klimawandel sich anders auf den Wald auswirkt?

Der Umfang der Senkenleistung des Waldes hängt davon ab, wie sich der Klimawandel zukünftig auf die Wälder auswirkt und in welchem Umfang klimaangepasste Waldbewirtschaftungsstrategien umgesetzt werden. Aufgrund der großen Unsicherheiten bezüglich der möglichen Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels wurden neben dem Hauptszenario, in dem ein mittleres Niveau natürlicher Störungen für den Wald angenommen wurde, zwei Sensitivitätsanalysen mit geringen beziehungsweise hohen Störungen durchgeführt (vgl. Pfeiffer et al. 2023). Mittlere natürliche Störungen im Wald resultieren in einer Netto-Senkenleistung des LULUCF-Sektors im Jahr 2045 von -35 Mio. t CO₂-Äq. Demgegenüber ergibt sich bei geringen Störungen für den LULUCF-Sektor im Jahr 2045 eine Netto-Senkenleistung von -53 Mio. t CO₂-Äq, bei hohen Störungen von -18 Mio. t CO₂-Äq.

Neue Gehölze auf landwirtschaftlichen Flächen

→ Abb. 54



Agora Agrar und Öko-Institut (2024)

ambitioniertes Ziel. Deshalb werden landwirtschaftlich genutzte Böden im Szenario nicht als zusätzliche Kohlenstoffsенке betrachtet.

5.6.4 Treibhausgasemissionen

Durch den Moorbodenschutz wird in dem Szenario bis 2030 eine Minderung der jährlichen Emissionen

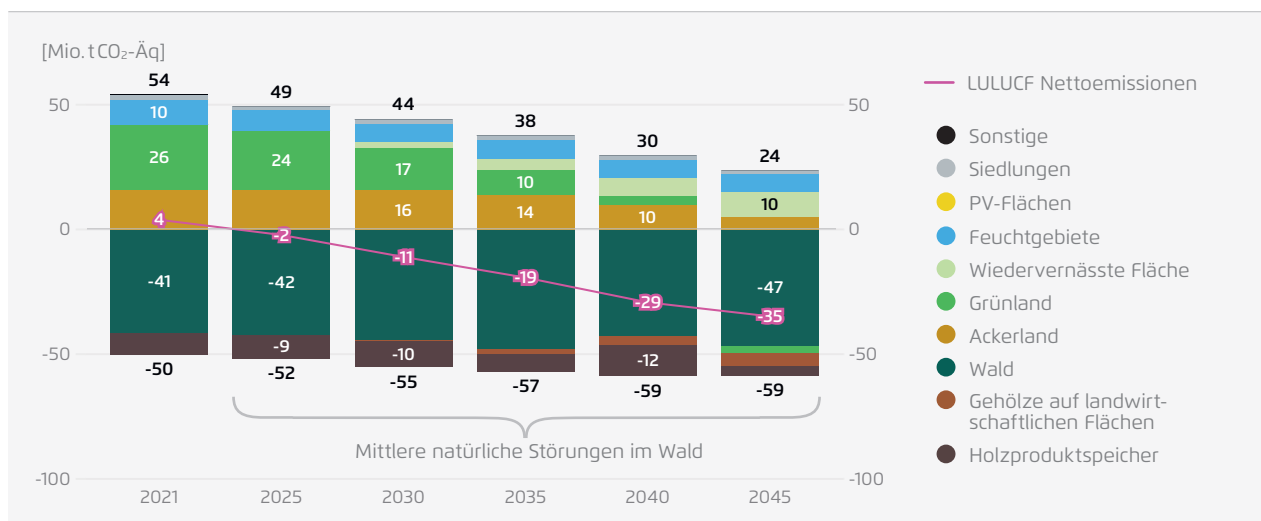
um sieben Mio. t CO₂-Äq erreicht. Weitere sieben Mio. t CO₂-Äq werden bis 2030 durch die Stärkung des Waldes als Kohlenstoffsенке, die Ausweitung der Kohlenstoffsенке im Holzproduktspeicher und durch den gesteigerten Anbau von Gehölzen auf landwirtschaftlichen Flächen jährlich zusätzlich gespeichert. Alle Maßnahmen zusammen führen im Jahr 2030 zu einer Netto-Emissionsbilanz von etwa -11 Mio. t CO₂-Äq im LULUCF-Sektor insgesamt. Selbst bei Umsetzung dieser Maßnahmen würde der Sektor das Ziel des KSG in Höhe von -25 Mio. t CO₂-Äq für 2030 damit jedoch deutlich verfehlen.³⁸

Von 2030 bis 2045 erreicht der Moorbodenschutz jährliche Emissionseinsparungen von 22 Mio. t CO₂-Äq. Gehölze auf landwirtschaftlichen Flächen führen zu einer Netto-Senkenleistung von -4 Mio. t CO₂-Äq und im Wald steigt die Netto-Senkenleistung um weitere -2 Mio. t CO₂-Äq auf -47 Mio. t CO₂-Äq.

³⁸ Treibhausgas-Ziele für den LULUCF-Sektor wurden im Bundes-Klimaschutzgesetz auf Basis der Treibhausgas-Berichterstattung vor dem Jahr 2021 abgeleitet. Deutliche methodische Veränderungen nach 2021, insbesondere zur Kohlenstoffeinbindung in Waldböden und zu Methanemissionen aus künstlichen stehenden Gewässern wie Fischteichen führen zu einer Verschlechterung der berichteten Treibhausgasbilanz für den LULUCF-Sektor um circa 17 Mio. t CO₂-Äq. Da die Ergebnisse dieser Studie auf dem THG-Inventar von 2023 aufbauen, ist diese rein methodische Veränderung bei der Interpretation der LULUCF-Ergebnisse zu berücksichtigen.

Treibhausgasbilanz des LULUCF-Sektors

→ Abb. 55



Agora Agrar und Öko-Institut (2024) basierend auf Umweltbundesamt (2023), Agora Agriculture (2024), Umweltbundesamt (2024)

Insgesamt generiert der LULUCF-Sektor im Jahr 2045 eine Netto-Senkenleistung in Höhe von -35 Mio. t CO₂-Äq. Das Ziel aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz in Höhe von -40 Mio. t CO₂-Äq wird in dem Szenario leicht verfehlt (Abbildung 55). Zeitlich betrachtet wird der größere Teil der Treibhausgasmindering nach 2030 erreicht.

5.6.5 Politische Handlungsoptionen

Um den Waldumbau und die Moorwiedervernässung erfolgreich zu gestalten, braucht es ausreichend Zeit und Planungssicherheit. Daher ist es wichtig, die notwendigen politischen Maßnahmen möglichst frühzeitig zu beschließen. Außerdem sollten die politischen Rahmenbedingungen so gestaltet sein, dass die Beiträge zu Klimaschutz und Nachhaltigkeit wirtschaftlich attraktiv für Landnutzerinnen und Landnutzer sind.

Verschiedene Instrumente können die Moorwiedervernässung fördern:

- Die Schaffung der rechtlichen, wasserbaulichen und institutionellen Voraussetzungen für die Wiedervernässung;
- Wiedervernässungsprämien für Landwirtinnen und Landwirte;
- Investitionsförderung für den Anbau von Paludikulturen, Zuschüsse zur Anschaffung neuer Maschinen;
- Förderung neuer Wertschöpfungsketten für die Nutzung von Produkten aus Paludikulturen.

Die finanziellen Mittel können sowohl aus Mitteln der Gemeinsamen Agrarpolitik als auch anderen Haushaltsmitteln stammen. Als Finanzierungsquelle kann aber auch die Ausweitung freiwilliger

Kohlenstoffmärkte dienen, die als Ergänzung zu den verpflichtenden Klimaschutzmaßnahmen zusätzliche Anstrengungen für den Klimaschutz entlohnen. Eine weitere Option ist die Bepreisung und Einbeziehung von Emissionen aus entwässerten Moorböden in ein mögliches EU-Emissionshandelssystem für die Landwirtschaft und landwirtschaftlich genutzte Moore. Die Landwirtinnen und Landwirte sollten die Zertifikate für Emissionen aus Moorböden für eine mittlere Zeitspanne kostenlos erhalten. Die CO₂-Vermeidungskosten für viele der trocken genutzten Moorflächen sind niedriger als die Kosten von Minderungsmaßnahmen in anderen Sektoren. Daher kann eine Einbindung der Emissionen des Landnutzungssektors in CO₂-Handelssysteme Minderungsmaßnahmen in diesem Bereich unterstützen.

Ein weiterer wichtiger Beitrag zur Minderung der Emissionen des LULUCF-Sektors ist die Beendigung des Torfabbaus bis 2040 und die Wiedervernässung der ehemaligen Torfabbauflächen.

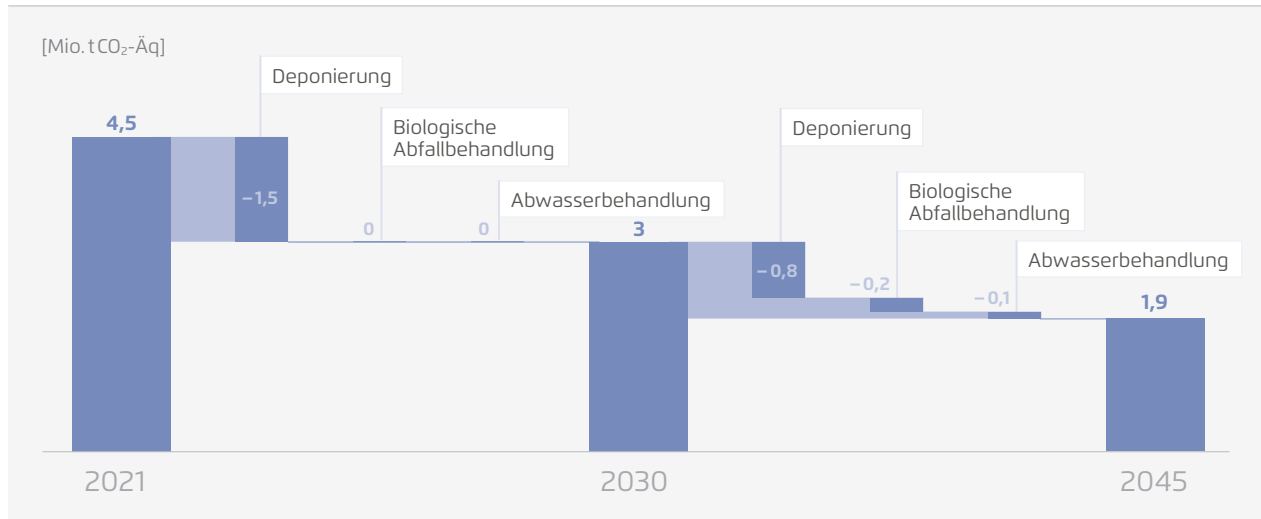
Die Senkenleistung des Waldes sowie die Ausweitung der Kohlenstoffspeicherung auf landwirtschaftlichen Flächen und im Holzproduktspeicher haben einen gesellschaftlichen Wert und Maßnahmen zu ihrer Stärkung sollten daher entlohnt und gefördert werden. Für die Finanzierung können sowohl reguläre Haushaltsmittel als auch Einnahmen aus einem ETS oder freiwillige Kohlenstoffmärkte genutzt werden. Aufgrund des Risikos der Nicht-Permanenz sollten diese negativen Emissionen nicht direkt in das ETS einbezogen werden. Um die stoffliche Nutzung zu fördern, sollte außerdem die Annahme der Kohlenstoffneutralität der energetischen Nutzung von Holz im ETS überprüft werden.

5.7 Abfall

5.7.1 Übersicht

Abfallsektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen

→ Abb. 56



Agora Energiewende und Öko-Institut basierend auf Umweltbundesamt (2023). Müllverbrennung wird im Sektor Energiewirtschaft bilanziert

Abfallsektor – Trends und Instrumente

Biologische Behandlung von Bioabfällen

- 2030: Erhöhung der biologischen Behandlung von Bioabfällen (Vergärung, Kompostierung) durch Getrenntsammlung; Steigerung der Vergärung von Bioabfällen von 38 Prozent auf 44 Prozent; Reduktion der Lebensmittelabfälle
- 2045: Steigerung der Abfallvergärung auf 70 Prozent, Halbierung der Lebensmittelabfälle gegenüber 2021

⚙️ Instrumente: Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes; Förderung der Abfallvergärung über EEG

Ausbau der Deponiebelüftung und Gaserfassung

- 2030: Umsetzung von bis zu 7 großen Deponiebelüftungsprojekten pro Jahr; Ausweitung der Gaserfassung
- 2045: Umsetzung von bis zu 5 großen Deponiebelüftungsprojekten pro Jahr; Ausweitung der Gaserfassung

⚙️ Instrumente: Weiterführung und Intensivierung der bestehenden Fördermaßnahmen im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI), nach 2030 Einführung von ordnungsrechtlichen Maßnahmen

Kreislaufwirtschaft

- Verbesserung der Trennung und Sortierung
- Anreize für auf Kreislauf ausgerichtete Wertschöpfungsketten und Recycling-gerechtes Produktdesign
- Steigerung der Materialeffizienz und der Nutzungsdauer von Kunststoffen
- Maximierung von mechanischem sowie Einführung von chemischem Recycling für Verwertung von Kunststoffabfällen

⚙️ Instrumente: Anpassung von Produktstandards; *Embodied Carbon*-Grenzwerte; Abbau regulatorischer Hürden für zirkuläre Produkte und Prozesse

CCS für Restemissionen

- Abscheidung und geologische Speicherung von verbleibenden Restemissionen
- Generierung von Negativemissionen durch die geologische Speicherung von biogenem CO₂

Abfallsektor – Kernindikatoren

	2021	2030	2045
Bioabfälle			
Vergärung [Mio. t]	5,5	6,1	3,2
Kompostierung [Mio. t]	9,1	7,9	7,5
Reduktion der Lebensmittelabfälle ggü. 2021 %		-0,19	-0,5
Bioenergie			
Biogas aus dem Abfallsektor [PJ]	57,9	58,4	63,7
Deponierung			
Einsparung aus Deponiebelüftung ggü. ohne Belüftung		-0,19	-0,57
Gaserfassung [% CH ₄ -Emissionen]	0,5	0,59	0,62
Emissionen			
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq]	4,5	3	1,9
KSG-Ziel*	n/a	5	n/a

Öko-Institut basierend auf Umweltbundesamt (2023). * Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6)

5.7.2 Sektorabgrenzung und Ausgangslage

Der **Abfallsektor** umfasst sowohl die CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Deponierung und biologischen Behandlung von organischen Abfällen (Kompostierung und Vergärung) als auch die Emissionen aus der Abwasserbehandlung. Mit einem Anteil von rund 57 Prozent der Gesamtemissionen des Abfallsektors dominieren die Methanemissionen aus der Deponierung von organischen Abfällen. Der Anteil der Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung beträgt rund 22 Prozent, während die Emissionen aus der Abwasserbehandlung einen Anteil von rund 20 Prozent an den Gesamtemissionen des Sektors ausmachen. Emissionen aus der Abfallverbrennung werden dem Stromsektor zugeordnet, während die Erhöhung von Recyclingraten im Industriesektor sichtbar wird. Im Jahr 2021 lagen die Emissionen des Abfallsektors bei 4,5 Mio. t CO₂-Äq. Gegenüber 1990 konnten die Emissionen des Sektors bereits um 89 Prozent reduziert werden, was unter anderem auf das Deponierungsverbot von unbehandelten organischen Abfällen aus dem Jahr 2005 und den hohen technischen Stand der Abwasserbehandlung zurückzuführen ist.

Das Sektorziel³⁹ für den Abfallsektor liegt nach dem Klimaschutzgesetz bei 5 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030. Aufgrund methodischer Änderungen und neuerer Daten im Bereich der Deponierung werden seit der Inventarsubmission 2023 deutlich geringere Emissionen aus dem Abfallsektor berichtet. Damit ist die Zielerreichung des Sektors im Jahr 2030 relativ sicher.

Das technische Minderungspotenzial des Sektors ist weitgehend erschlossen. Ein verbleibender **Handlungsansatz** ist vor allem die Deponiebelüftung und damit einhergehend eine weitere Reduktion der Emissionen aus der Deponierung. Wegen der biologischen Prozesse, die bei der Abfall- und Abwasserbehandlung stattfinden, werden auch im Abfallsektor Restemissionen verbleiben.

5.7.3 Szenariopfade

Bis zum Jahr 2045 sinken die Emissionen des Abfallsektors von 4,5 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2021 um

³⁹ Basierend auf den gemäß §5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6)

weitere 2,5 Mio. t CO₂-Äq. Es verbleiben Restemissionen in Höhe von 1,9 Mio. t CO₂-Äq. Gegenüber 1990 können die Emissionen um 95 Prozent gemindert werden. Der Großteil der Reduktion entfällt auf die Minderung der CH₄-Emissionen aus der **Deponierung** durch Maßnahmen zur Deponiebelüftung, aber auch aus dem anhaltenden Rückgang der Emissionen aufgrund des Deponierungsverbots von unbehandelten organischen Abfällen.

Im Bereich der **biologischen Abfallbehandlung** bestimmen Bevölkerungsentwicklung, die Verpflichtung zur getrennten Erfassung von Bioabfällen und die Reduktion der Lebensmittelabfälle das Abfallaufkommen. Durch eine Verbesserung der Anlagen (beispielsweise Reduktion von Leckagen bei Biogasanlagen, Abdeckung der Lager) können die Emissionen weiter reduziert werden. Zudem

kann durch eine gesteigerte Behandlung der Bioabfälle in Vergärungsanlagen der Anteil der Reststoffnutzung für Bioenergie weiter erhöht werden.

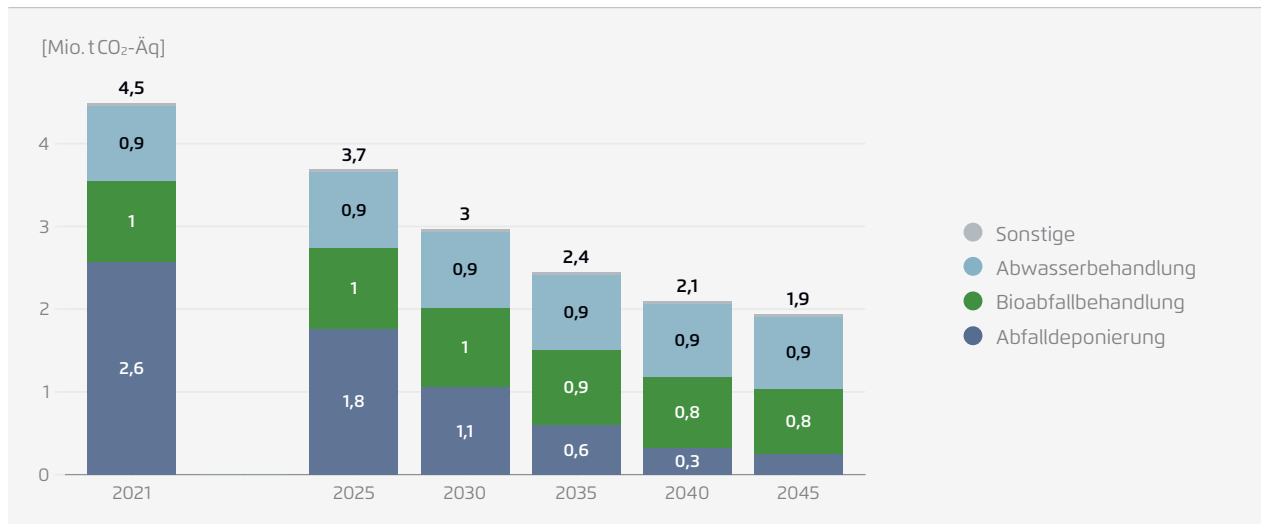
Aufgrund des hohen technischen Stands der **Abwasserbehandlung** inklusive dem hohen Anschlussgrad an die Kanalisation besteht in diesem Bereich nur noch geringes Treibhausgasminderungspotenzial. Über eine weitere Erhöhung der Anschlussrate als auch über die Verbesserung der Faulschlammbehandlung können weitere geringe Minderungspotenziale realisiert werden.

5.7.4 Treibhausgasemissionen

Abbildung 57 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Abfallsektor.

Reduktion der Treibhausgasemissionen im Abfallsektor

→ Abb. 57



Agora Agrar und Öko-Institut basierend auf Umweltbundesamt (2023). Müllverbrennung wird im Sektor Energiewirtschaft bilanziert

6 Ergebnisse für Querschnittsthemen

6.1 Biomasse

6.1.1 Relevanz

Nachhaltig produzierte und genutzte Biomasse kann einen wichtigen Beitrag zur Klimaneutralität leisten. 2045 wird Biomasse vor allem dort genutzt, wo keine effizienteren Optionen zur Ersetzung fossiler Rohstoffe zur Verfügung stehen. Durch zunehmende stoffliche und materielle Nutzung und abnehmende energetische Nutzung kann Biomasse der Industrie als nachhaltige Kohlenstoffquelle dienen, zum Beispiel bei der Kunststoffherstellung. Bei diesem Prozess kann aus Biomasse stammendes CO₂ abgeschieden und langfristig gespeichert werden (Bio-CCS (*Carbon Capture and Storage*)).

Die nachhaltige Produktion von Biomasse durch Agroforstsysteme und andere Gehölzstrukturen stellt eine ökonomische Chance für die Landwirtschaft

dar, ermöglicht die Speicherung von Kohlenstoff und fördert die Biodiversität. Bis 2045 löst diese Art der Biomasseproduktion einjährige Energiepflanzen sukzessive ab. Dadurch entstehen Kohlenstoffsinken auf der landwirtschaftlichen Fläche und das Risiko indirekter Landnutzungseffekte wird stark gemindert. Rest- und Abfallstoffe werden verstärkt genutzt und die Holzentnahme aus dem Wald reduziert, was ebenfalls natürliche Senken stärkt.

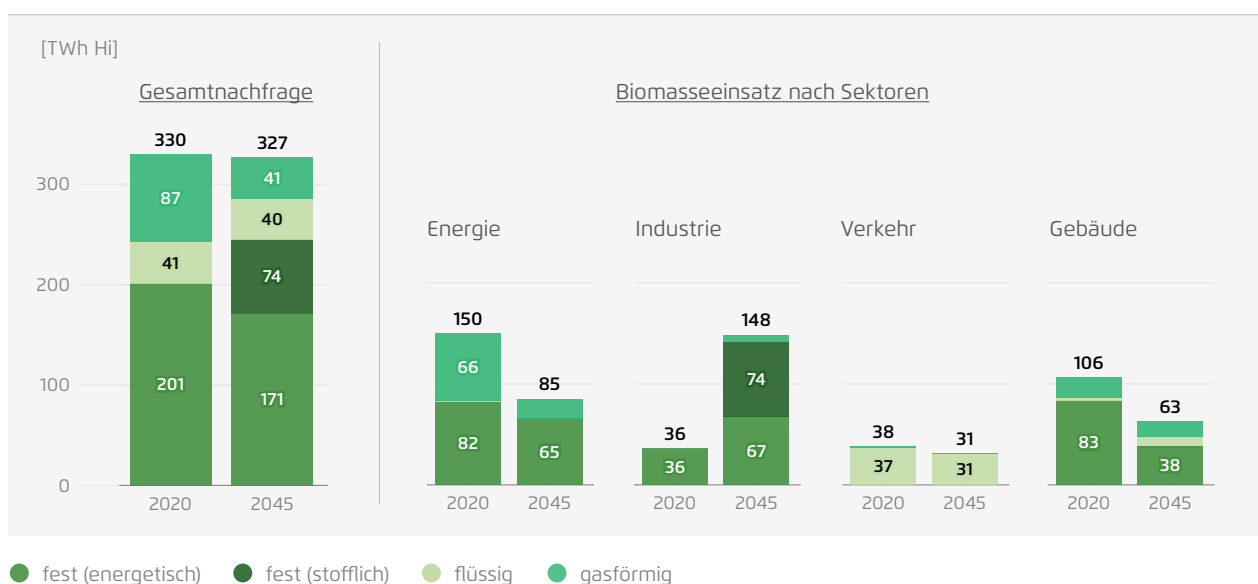
6.1.2 Szenariopfade

Nachfrage

Die Nachfrage nach Biomasse bleibt 2045 mit 327 TWh auf dem Niveau von 2020, allerdings verschieben sich die Nutzung und die Anteile der genutzten Biomassetypen. Der Gesamtanteil fester Biomasse an der Biomassenachfrage steigt im Zeitraum 2020 bis 2045 um 22 Prozent auf 245 TWh. Die energetische

Biomasse nach Sektoren: energetischer Einsatz und Feedstock für die stoffliche Nutzung*

→ Abb. 58



Agora Think Tanks, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). *ausgenommen Bauholz

Nutzung von fester Biomasse geht insgesamt zurück, nur nicht im Industriesektor. Die stoffliche Nutzung fester Biomasse nimmt stark zu und beträgt 74 TWh im Jahr 2045. Diese Nachfrage kommt fast ausschließlich aus der Industrie. Rückläufig ist dagegen die Nutzung von flüssigen Biokraftstoffen beziehungsweise Biobrennstoffen sowie von Biogas.

Energiewirtschaft

In der Energiewirtschaft werden derzeit rund drei Viertel der Bioenergie – ohne Berücksichtigung des biogenen Abfalls – dezentral in kleinen bis mittelgroßen Biogasanlagen erzeugt. Um den Erfordernissen des zukünftigen Energiesystems Rechnung zu tragen, wird der Bestand dieser relativ inflexiblen Anlagen langfristig zurückgefahren. Feste Biomasse wird in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) für Wärmenetze ohne Wasserstoffanschluss sowie zur Absicherung der Winterspitze genutzt.

Industrie

Auch die Verwendung von Biomasse als Rohstoff in der Industrie gewinnt deutlich an Bedeutung, diese steigt bis 2045 auf 74 TWh. Biogener Kohlenstoff wird insbesondere in chemischen Produkten (Kunststoffen) gebunden; durch eine Kreislaufrückführung der Produkte kann die Dauer der Kohlenstoffbindung erhöht werden. Bei der stofflichen Nutzung in der chemischen Industrie fällt CO₂ an, das abgeschieden und gespeichert wird, sodass hierdurch Negativemissionen geschaffen werden (Bio-CCS). Innovative biomassebasierte Verfahren in der chemischen Industrie könnten entsprechend finanziell gefördert werden. Die hierfür nötigen finanziellen Mittel könnten zum Beispiel durch eine Umlage auf Kunststoffprodukte generiert werden. Mittelfristig scheint außerdem eine Bepreisung des stofflich genutzten fossilen Kohlenstoffs sinnvoll (siehe Kapitel 5.2 Industrie).

Bis 2045 verdoppelt sich die energetische Nutzung von Biomasse in der Industrie gegenüber 2020 und steigt auf 74 TWh. Biomasse wird hierbei vor allem verwendet, um Hochtemperaturwärme zu erzeugen, beispielsweise in der Zement- und Kalkbranche.

Verkehr

Im Verkehrssektor wird Biomasse heute fast vollständig als Biokraftstoff im Straßenverkehr eingesetzt. Hier gibt es mit der Elektrifizierung eine effizientere Alternative, weshalb im Szenario die Biokraftstoffe mittelfristig nur noch im Flug- und Schiffsverkehr eingesetzt werden. Zunächst bleibt die Nachfrage nach Biokraftstoffen im Szenario bis 2029 in etwa konstant, da sich eine steigende Beimischung und ein sinkender Gesamtbedarf an Flüssigkraftstoffen aufgrund der Elektrifizierung in etwa ausgleichen. Ab 2030 geht die Verwendung von Biokraftstoffen aufgrund der Elektrifizierung des Straßenverkehrs sowie einer sinkenden Beimischung zurück. Der Bedarf nach Biokraftstoffen kommt zunehmend aus dem internationalen Luft- und Schiffsverkehr. Dabei wird der in Deutschland vertankte Kraftstoff für den internationalen Verkehr berücksichtigt. Dieser liegt im Jahr 2030 bei 6 TWh und steigt bis 2045 aufgrund angenommener steigender Beimischung auf 31 TWh an. Die Beimischung von Biokraftstoff im internationalen Luft- und Schiffsverkehr steigt per Annahme bis zum Jahr 2050 stetig auf 20 Prozent, während dann 80 Prozent dieser Kraftstoffe strombasiert sind.

Gebäudesektor

Bauholz ist eine wichtige Verwendungsform von Biomasse im Gebäudesektor. Durch die Nutzung wird das biogene CO₂ langfristig in Gebäuden gespeichert. Im Szenario erhöht sich der Holzbauanteil bei Ein- und Zweifamilienhäusern von rund 21 Prozent im Basisjahr auf rund 35 Prozent im Zieljahr. Bei Mehrfamilienhäusern und Nichtwohngebäuden steigt der Bedarf von weniger als fünf Prozent auf 15 bis 20 Prozent.

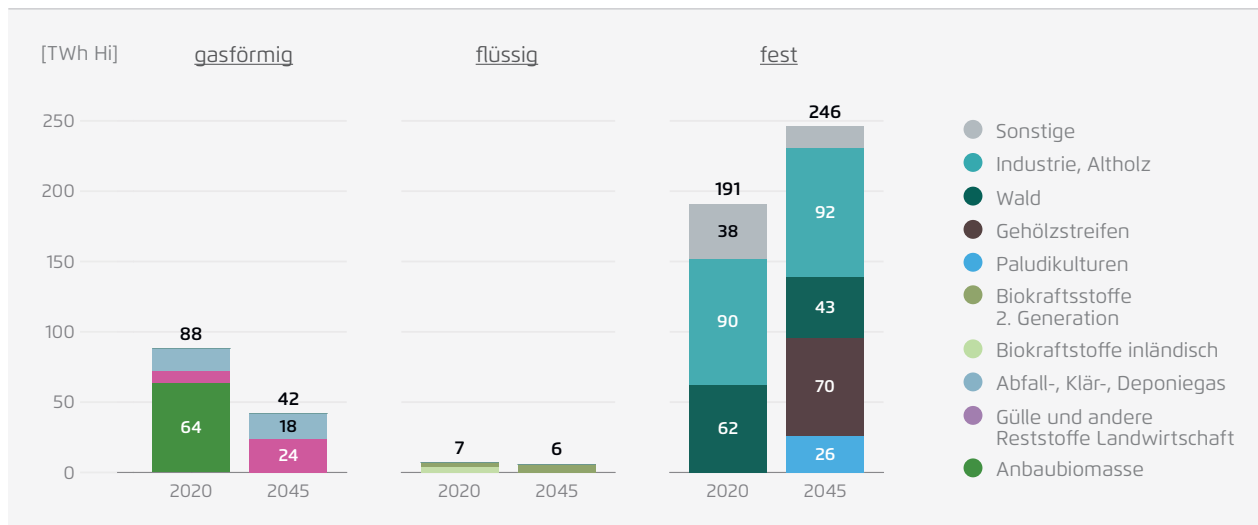
Die energetische Biomassenutzung für die Gebäudeheizung geht im Szenario zurück, da Wärmepumpen kostengünstiger sind.

Angebot

Die Biomassenachfrage im Jahr 2045 wird durch eine Vielzahl von Angebotsquellen bedient: Wald, Gehölze auf landwirtschaftlichen Flächen,

Inländisches Biomasse-Angebot für den energetischen Einsatz und als Feedstock für die stoffliche Nutzung*

→ Abb. 59



Agora Agrar und Öko-Institut (2024) u. a. basierend auf FNR (2023). *ausgenommen Bauholz

Paludikulturen⁴⁰ auf wiedervernässten Mooren, Altholz, Abfälle, Gülle und Biokraftstoffe der zweiten Generation⁴¹.

Um die Funktion des Waldes als Kohlenstoffsенке zu stärken, sinkt bis 2045 die Holzentnahme für die energetische Nutzung um 31 Prozent gegenüber 2022. Zugleich werden jedoch Gehölzstrukturen und Paludikulturen auf Agrarflächen angelegt und genutzt. Dadurch steigt das Angebot an fester Biomasse von 191 TWh im Jahr 2020 auf insgesamt 246 TWh im Jahr 2045. Im Gegenzug entfällt der Anbau von einjährigen Ackerfrüchten (Mais, Raps, Getreide) für die Bereitstellung von Biogas und Biokraftstoffen. Bis zum Jahr 2045 wird das Reststoffangebot aus der Landwirtschaft gegenüber heute mehr als verdoppelt (Wirtschaftsdüngervergärung, Zwischenfrüchte, Stroh und andere Erntereste).

Importe von nachhaltig produzierten Biokraftstoffen und eine geringe inländische Produktion von

Biomass to Liquid decken einen Teil der Nachfrage des Luft- und Schiffsverkehrs.

Durch die veränderte Flächennutzung kann ein wertvoller Beitrag zu einer vielfältigen Agrarstruktur mit einer Verringerung des Einsatzes von Pflanzenschutz- und Düngemitteln geleistet werden. Gehölzstrukturen schaffen Kohlenstoffsенке auf der Fläche, tragen zum Schutz der Biodiversität bei und erleichtern die Anpassung an den Klimawandel. Indem die Landwirtinnen und Landwirte für ihre Leistungen in den Bereichen Kohlenstoffspeicherung und Biodiversität, die der Allgemeinheit zugutekommen, entlohnt werden, wird diese Art der Biomasseproduktion für die Produzenten rentabel.

6.1.3 Politische Handlungsoptionen

Eine wichtige politische Gestaltungsaufgabe im Bereich Biomasse ist, die politischen Anreize so zu setzen, dass die nur begrenzt vorhandene Biomasse dort eingesetzt wird, wo es keine effizienteren Alternativen gibt. Solche Alternativen gibt es vor allem im Bereich der energetischen Nutzung, zum Beispiel in Form von Wind- oder Solarenergie. Eine weitere Aufgabe der Politik ist es, die stoffliche Nutzung von Biomasse zu stärken und

⁴⁰ Anbau von Pflanzen auf nassen Moorböden, zum Beispiel Schilf oder Rohrkolben.

⁴¹ Diese werden nicht aus Ölen, Stärke oder Zucker hergestellt, sondern aus Ligno-Zellulose aus entsprechenden Pflanzen, Ko-Produkten, Ernterückständen oder Abfällen. Synonym wird häufig die Bezeichnung „nachhaltige Biokraftstoffe“ verwendet.

so die temporäre Kohlenstoffbindung in langlebigen Produkten zu fördern.

Grundsätzlich sollten die politischen Anreize so gesetzt werden, dass Biomasse weniger energetisch und stärker stofflich genutzt wird. Fehlanreize, die derzeit aus der Klima- und Energiepolitik resultieren, sollten abgebaut werden. Ein Beispiel für diese Fehlanreize ist die THG-Minderungsquote im Verkehrssektor, die vor allem durch Biokraftstoffe erreicht wird: Durch sie werden die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors gesenkt, obgleich die Elektrifizierung der Fahrzeuge eine deutlich effizientere Variante zur Senkung der Emissionen wäre. Außerdem entsteht im europäischen Emissionshandel durch die Kohlenstoffneutralität von Biomasse ein falscher Anreiz zu ihrer energetischen Nutzung.

Sinnvoll hingegen ist die stoffliche Nutzung von Biomasse in der Industrie. Dort kann biogener Kohlenstoff fossilen Kohlenstoff ersetzen und in langlebigen oder mehrfach recyclebaren Produkten eine temporäre Kohlenstoffsinke bilden. Diese stoffliche Nutzung von Biomasse wird aber durch die Klimapolitik derzeit nicht gefördert.

Mögliche Instrumente zur Förderung der stofflichen Nutzung wären eine gesonderte Bepreisung für den Einsatz fossiler Rohstoffe in Materialien oder eine Regelung über Quoten für biogenen Kohlenstoff. Um die stoffliche Nutzung zu fördern, sollte außerdem die Annahme der Kohlenstoffneutralität der energetischen Nutzung von Holz im ETS überprüft werden.

Um eine volkswirtschaftlich optimale, d.h. auch ökologisch sinnvolle Biomassenutzung zu realisieren, bedarf es einer langfristig angelegten Strategie zur Schaffung der erforderlichen Rahmenbedingungen. Dazu sollten konkrete Maßnahmen in der Nationalen Biomassestrategie (NABIS) ausformuliert werden und diese Strategie zeitnah beschlossen werden.

Die verlässliche Honorierung nachhaltiger Biomasseproduktion ist eine zweite wichtige Voraussetzung für eine Weiterentwicklung der

Bioökonomie. Ein Großteil der geeigneten Produktionssysteme benötigt hohe Anfangsinvestitionen und weist lange Amortisationszeiten mit hohem Risiko auf. Unternehmerinnen und Unternehmer werden dieses Risiko nur dann eingehen, wenn sie von Abnehmerseite langfristige Abnahmesicherheit erhalten. Die Honorierung der Gemeinwohl- beziehungsweise Ökosystemdienstleistungen durch die Gesellschaft ist dabei ein Ansatz, ihnen schon frühzeitig Einnahmen zu garantieren. Außerdem kann der Staat hier auch selbst als Abnehmer auftreten.

Unterstützungsmaßnahmen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) sind ein weiterer möglicher Weg hin zu einer verlässlichen Vergütung für die nachhaltige Produktion von Biomasse. Schon heute werden beispielsweise Agroforstsysteme in geringem Umfang durch die GAP gefördert. Diese Förderungen sind jedoch für die Landwirtinnen und Landwirte nicht attraktiv genug, da die Beantragung der Subventionen komplex ist und die Zahlungen die Anfangsinvestitionen nicht decken. In diesen Fällen könnte eine Anschubfinanzierung sinnvoll sein, damit die Anfangsschwierigkeiten überwunden werden und langfristig ökonomisch rentabel produziert werden kann. Darüber hinaus kann der Staat die Entwicklung von Geschäftsmodellen und den Aufbau von Lieferketten im Rahmen der klassischen Wirtschaftsförderung unterstützen, die vor allem auf Ebene der Bundesländer und Landkreise etabliert ist.

Freiwillige Kohlenstoffmärkte können die Finanzierung der Umstellung auf nachhaltige Biomasseproduktion punktuell unterstützen. Landwirte können dann zum Beispiel ihren Kohlenstoffaufbau durch den Anbau von Gehölzen zertifizieren lassen und die entsprechenden Zertifikate an Unternehmen verkaufen, die sie zur Erreichung ihrer Nachhaltigkeitsziele einsetzen. Politisch sollte diese Finanzierungsoption so gestaltet werden, dass die generierten Zertifikate eine Zusätzlichkeit der Senkenleistungen garantieren. Wichtig ist außerdem, dass die Nutzung von Senkenzertifikaten nicht dazu führt, Emissionen weniger stark zu reduzieren.

6.2 Wasserstoff und strombasierte Energieträger

6.2.1 Relevanz

Grüner Wasserstoff ist ein wichtiger Baustein für die Erreichung der Klimaneutralität. In einem von Energieeffizienz, Elektrifizierung und Erneuerbaren Energien geprägten System erfüllt Wasserstoff drei wichtige Funktionen: Erstens ist er langfristig in großen Mengen günstig speicherbar. Damit spielt er eine tragende Rolle beim Backup der Erneuerbaren Energieträger in einem klimaneutralen Stromsystem. Zweitens ist er aufgrund seiner stofflichen Eigenschaften für bestimmte Industrieprozesse nötig, die heute noch auf dem Einsatz fossil erzeugter Stoffe beruhen, beispielsweise in der Stahlherstellung und der Chemieindustrie. Und drittens kann Wasserstoff zu synthetischen Kraftstoffen mit hoher Energiedichte weiterverarbeitet werden, die mittelfristig im Langstreckenflug- und Schiffsverkehr eingesetzt werden.

Der Aufbau einer klimaneutralen Wasserstoffwirtschaft ist damit ein Schlüssel für das Erreichen der deutschen und europäischen Klimaziele. Zwar wird Wasserstoff bereits heute in größerem Umfang in der Mineralölverarbeitung (Raffinerien), Ammoniakherstellung und Methanolherstellung eingesetzt. Jedoch handelt es sich dabei um Wasserstoff aus fossilen Energieträgern, der typischerweise verbrauchsnahe hergestellt wird. Im Szenario wird Wasserstoff hingegen vor allem aus Strom aus Erneuerbaren Energien produziert, häufig über größere Distanzen transportiert und länger gespeichert. Ein Großteil des grünen Wasserstoffs wird dabei in Ländern mit günstigen Bedingungen für die Produktion von Strom aus Erneuerbaren Energien produziert und anschließend nach Deutschland exportiert, wofür eine neue Transportinfrastruktur aufgebaut werden muss.

Deutschland hat in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte beim Wasserstoffhochlauf gemacht und unter anderem ein Finanzierungskonzept für ein etwa 9.000 km langes Wasserstoffkernnetz entwickelt. Die im Szenario beschriebenen

Entwicklungen setzen voraus, dass in vier Handlungsfeldern in den nächsten Jahren Fortschritte erzielt werden, und sich der Wasserstoffhochlauf so weiter beschleunigt (siehe Abschnitt 6.2.3 „Zentrale Weichenstellungen“):

- Sicherung der Nachfrage durch zusätzliche ambitionierte Politikinstrumente, damit künftige Kunden weitere Abnahmeverträge zeichnen;
- Vereinbarungen zwischen den beteiligten Staaten zur Unterstützung der Wasserstoffimportkorridore aus umliegenden Produktionsländern;
- Unterstützung beim Aufbau der Wasserstoffspeicher;
- Förderung der heimischen Wasserstoffproduktion.

6.2.2 Szenariopfade

Nachfrage

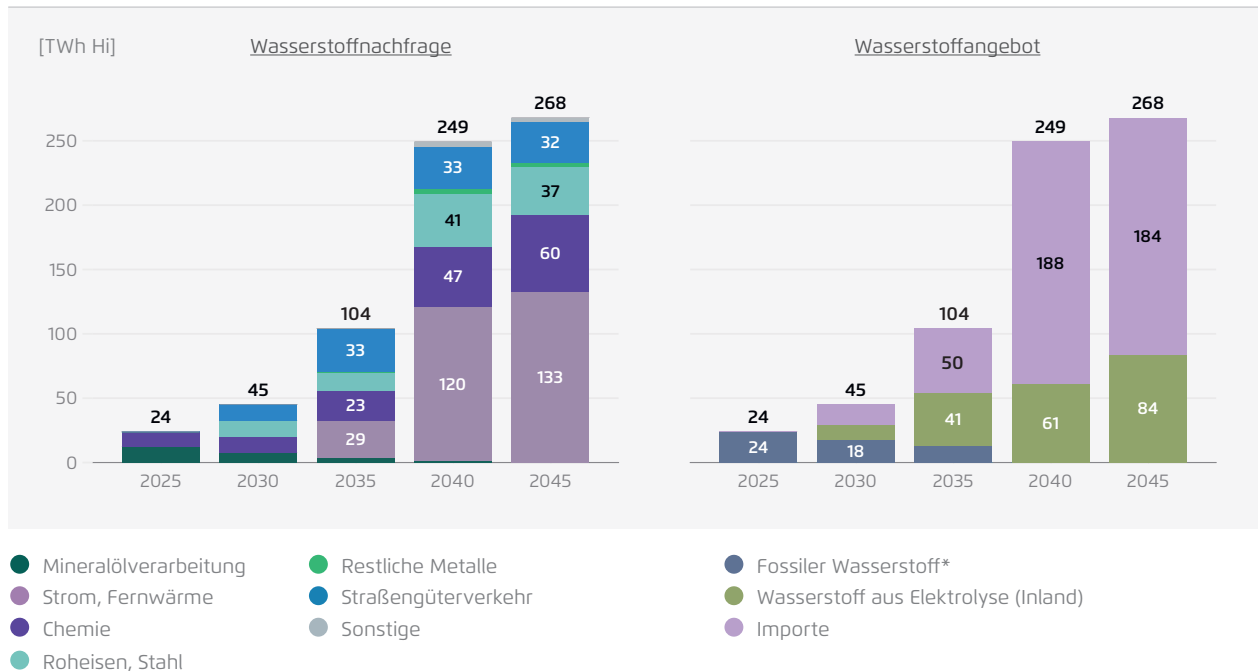
In Summe steigt die Nachfrage nach klimaneutralem Wasserstoff bis 2045 auf 268 TWh pro Jahr (Heizwert). Davon werden 38 TWh stofflich und 230 TWh energetisch genutzt.⁴²

In der **Energiewirtschaft** kommt Wasserstoff als Brennstoff für regelbare Kraftwerke und in der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in Gaskraftwerken beziehungsweise in geringem Umfang als Derivat in Synfuel-Kraftwerken zum Einsatz (siehe Abschnitt 5.1.3 „Stromsystem flexibilisieren und Versorgungssicherheit garantieren“). Im Jahr 2035 werden in Szenario bereits 29 TWh Wasserstoff in Strom, Wärmenetzen und Industriekraftwerken eingesetzt (Heizwert). In der folgenden Dekade steigt der Wasserstoffeinsatz in der Energiewirtschaft deutlich und macht im Jahr 2045 mit 133 TWh rund 50 Prozent der gesamten Wasserstoffnachfrage aus. Zusätzlich kommen in der Energiewirtschaft 20 TWh strombasierte flüssige Energieträger (*Power to Liquid*-Produkte)

⁴² Der Wasserstoffeinsatz zur Stahlherstellung fällt dabei in die energetische Nutzung.

Wasserstoffnachfrage und Wasserstoffangebot

→ Abb. 60



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). *aus Dampfreformierung

zur Spitzenlastabsicherung zum Einsatz (siehe Abschnitt „Strombasierte Energieträger“).

Der Wasserstoffbedarf der **Industrie** steigt auf 103 TWh im Jahr 2045 an (siehe Kapitel 5.2 Industrie). Während der Wasserstoffeinsatz in der inländischen Ammoniakproduktion zurückgeht, kommen neue Nachfragebereiche dazu. Etwa ein Drittel der Nachfrage entsteht durch neue DRI-Anlagen in der Stahlindustrie, in denen der Einsatz von Wasserstoff ab 2028 erstmalig im industriellen Maßstab erfolgt und dann weiter ausgeweitet wird. Andere Einsatzbereiche sind chemisches Recycling, die Aufwertung von Synthesegas aus der Biomassegasifizierung, Prozessdampferzeugung sowie der Einsatz in der sonstigen Metall- und Glasindustrie.

Im **Verkehr** steigt der Wasserstoffbedarf mit dem Hochlauf der Brennstoffzellen-Lkw (FCEV) ab dem Jahr 2027 an und erreicht im Jahr 2045 eine Nachfrage von 32 TWh. 95 Prozent der Wasserstoffnachfrage im Verkehr entfallen auf den Straßengüterverkehr, lediglich knapp fünf Prozent auf den öffentlichen Straßenverkehr

(Brennstoffzellen-Busse) und vernachlässigbare Mengen auf den Individualverkehr.

Im **Gebäudesektor** kommt Wasserstoff in der dezentralen Wärmeerzeugung aufgrund des begrenzten Potenzials, der hohen Kosten und der geringen Gesamtenergieeffizienz im Vergleich zu Wärmenetzen und elektrischen Wärmepumpen kaum zum Einsatz.

Angebot und Kosten

Der Bedarf an grünem Wasserstoff wird künftig durch Wasserelektrolyse gedeckt. Wasserstoff entsteht dabei durch den Einsatz von Strom (aus erneuerbaren Energiequellen) in Elektrolyseuren. Die Wasserstoffproduktion ist somit integraler Bestandteil des künftigen Stromsystems. Die unterschiedlichen Elektrolysetechnologien (beispielsweise alkalische Elektrolyse, Protonenaustauschmembran-Elektrolyse, Feststoffoxid-Elektrolyse) unterscheiden sich in Effizienz, Flexibilität, Anschaffungskosten und Umweltaspekten. Die Auswahl der Elektrolysetechnologie wird somit vom jeweiligen Anwendungsfall abhängen.

→ Infobox 8: Woher stammen die Importe im Szenario?

Die Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff erfordert große Mengen von Strom aus Erneuerbaren Energien. Es gibt über das Jahr hinweg Zeiten mit hoher Stromproduktion in einzelnen Stromexportregionen Deutschlands. In diesen Zeiten und an diesen Orten kann Deutschland selbst wettbewerbsfähig erneuerbaren Wasserstoff herstellen. Allerdings sind die zu günstigen Preisen verfügbaren Strommengen im Verhältnis zum stark steigenden Wasserstoffbedarf einer klimaneutralen Wirtschaft begrenzt. Deutschland wird deshalb mittel- und langfristig rund zwei Drittel seines benötigten Wasserstoffs importieren.

Pipelines sind über kürzere und mittlere Distanzen die mit Abstand günstigste Transportoption für reinen Wasserstoff, da er für den Transport nicht umgewandelt werden muss. In Europa und der näheren Nachbarschaft gibt es eine Reihe von guten Standorten für die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff, die kosteneffizient per Pipeline erreichbar sind. Diese Pipelinekorridore bilden künftig das Rückgrat der deutschen Wasserstoffversorgung.

Durch Importe über Pipelines könnten bereits bis Mitte der 2030er-Jahre jährlich rund 60 bis 100 TWh erneuerbaren Wasserstoff bereitgestellt werden (Importpotenzial; Agora Energiewende et al. 2024).⁴³ Die Wasserstoffpipelines aus den windreichen Nord- und Ostseeanrainern durchqueren keine Transitländer, erfordern somit weniger Koordinierungsaufwand und lassen sich vergleichsweise schnell umsetzen. Ein weiterer Vorteil dieser Importrouten sind die günstigen Finanzierungsbedingungen in den Exportländern. Aber auch die Korridore aus Südeuropa und Nordafrika können ab den 2030er-Jahren erneuerbaren Wasserstoff zur Verfügung stellen.

Voraussetzung dafür ist der Ausbau der Pipeline-Verbindungen. Dabei handelt es sich um sehr kapitalintensive Projekte, die sich angesichts des graduellen Hochlaufs nicht von Anfang an selbst tragen können. Daher ist es nötig, dass die beteiligten Staaten rasch gemeinsame Finanzierungs- und Absicherungsinstrumente entwickeln, um die Planung und den Ausbau der Wasserstoffkorridore zu ermöglichen.

Anders als Wasserstoff, der aus Strom aus Erneuerbaren Energien gewonnen wird, ist erdgasbasierter Wasserstoff mit CO₂-Abscheidung kein klimaneutraler Energieträger. Der Klimaschutzeffekt dieser Wasserstoffart ist wegen begrenzter CO₂-Abscheideraten und der Treibhausgasemissionen entlang der Wertschöpfungskette stark reduziert.

Importe von erdgasbasiertem Wasserstoff mit CO₂-Abscheidung, die das Angebot an erneuerbarem Wasserstoff während des Hochlaufs ergänzen, sollten zunehmend strenger Kriterien unterliegen, damit sie effektiv zur Erreichung der Klimaziele beitragen. Dazu zählen CO₂-Abscheideraten von über 90 Prozent, niedrige Vorkettenemissionen und der Verzicht auf die Nutzung des abgeschiedenen CO₂ für Enhanced Oil Recovery.

Kohlenstoffarmer elektrolytischer Wasserstoff, also Wasserstoff basierend auf einem weitgehend, aber nicht vollständig dekarbonisierten Strommix, stellt eine Alternative zu erdgasbasiertem Wasserstoff mit CO₂-Abscheidung dar. Da dieser elektrolytische Wasserstoff langfristig eine größere Klimaverträglichkeit bietet und schon kurz- bis mittelfristig zum Hochlauf der Elektrolyseure beiträgt, ist er dem erdgasbasierten Wasserstoff mit CO₂-Abscheidung gegenüber zu bevorzugen (Agora Energiewende und Agora Industrie 2024).

⁴³ Abbildung 61 zeigt das Szenario Fortgesetzte Anstrengung in dem rund 60 TWh Importe an erneuerbarem Wasserstoff bis 2035 denkbar sind. Bei einer deutlichen Ausweitung der Unterstützungsinstrumente können bis zu 100 TWh erreicht werden.

→ Infobox 8 (Fortsetzung): Woher stammen die Importe im Szenario?

Um die Wasserstoffversorgung auf Klimaneutralität auszurichten, sollte jedoch von Anfang an Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien beim Ausbau der Infrastruktur und der Absicherung der Nachfrage priorisiert werden. Eine klare Zusicherung, dass Deutschland seinen Fokus auf Wasserstoff beibehält und im Laufe der Zeit verstärkt, erhöht die Investitionssicherheit für eine vollständig klimaneutrale Wasserstoffwirtschaft und sendet zugleich ein wichtiges Signal an internationale Partnerländer. So kann der weit überwiegende Teil der Nachfrage durch erneuerbaren Wasserstoff gedeckt werden.

Auf der Infrastrukturseite kann es so zu Synergien zwischen erneuerbarem Wasserstoff und anderen Wasserstoffarten kommen, wenn bestimmte Pipeline-Verbindungen durch die zwischenzeitliche Einbeziehung von kohlenstoffarmem Wasserstoff früher in größerem Umfang ausgelastet werden. Erneuerbarer Wasserstoff könnte so von niedrigeren Netzentgelten profitieren. Instrumente auf Nachfrageseite müssen allerdings sicherstellen, dass es keine Verdrängung des erneuerbaren durch den kohlenstoffarmen Wasserstoff im Markt gibt.

Damit der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft gelingt, sind Kostenreduktionen notwendig. Zentrale Hebel zur Kostensenkung sind die Stromkosten für die Elektrolyse im In- und Ausland, die Auslastung der Elektrolyseanlagen sowie die Investitionskosten und der Wirkungsgrad der Anlagen. Es wird erwartet, dass die Elektrolysetechnologien eine starke Kostenreduktion durch technische Lernraten, Skaleneffekte und die automatisierte Fertigung sowie durch sinkende Kosten für Erneuerbare Energien erreichen können.

Infrastruktur, Saisonalität und Speicher

Der neu entstehende Wasserstoffmarkt benötigt eine Infrastruktur, bestehend aus einem nationalen Leitungsnetz, internationalen Pipeline-Korridoren und Schiffsterminals für den Import von Wasserstoffderivaten wie Ammoniak sowie großen Wasserstoffspeichern, die sowohl saisonal als auch kurzfristig den Ausgleich der Wasserstoffnetzlast ermöglichen.

Die Realisierung eines circa 9.000 km langen nationalen Leitungsnetzes („Kernnetz“) wurde im Jahr 2024 von der Bundesnetzagentur genehmigt. Stand November 2024 sollen große Teile davon bis 2032 zur Verfügung stehen. Für die Realisierung der Importinfrastrukturen bedarf es jedoch zusätzlicher

Politikinstrumente (siehe Abschnitt 6.2.3 „Zentrale Weichenstellungen“)

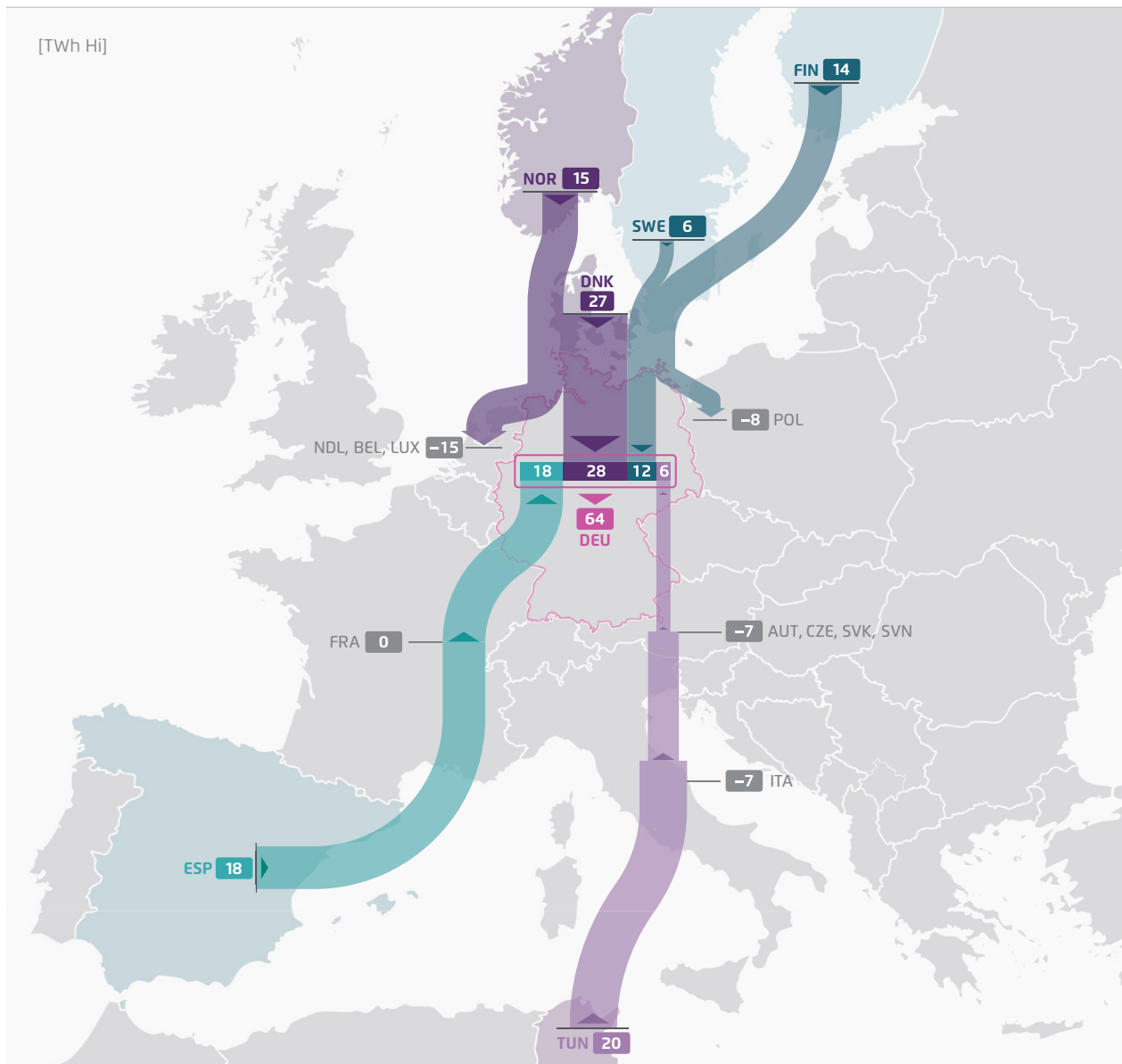
Zum Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage muss Wasserstoff zwischengespeichert werden, wofür überwiegend Kavernenspeicher in Frage kommen. Sowohl die Nachfrage und die inländische Erzeugung als auch mögliche Importe unterliegen saisonalen Schwankungen, sodass neben der kurzfristigen auch eine saisonale Speicherung nötig ist.

Die Saisonalität der Wasserstoffnachfrage wird hauptsächlich bedingt durch den Wasserstoffeinsatz in der Energiewirtschaft: Rund 85 Prozent der Wasserstoffnachfrage der Kraftwerke fallen ins Winterhalbjahr, während der Großteil der inländischen Produktion im Sommerhalbjahr stattfindet.

Zum Ausgleich werden im Jahr 2045 rund 73 TWh (Heizwert) Wasserstoffspeicher benötigt. Das entspricht einer Speicherkapazität von knapp einem Drittel der jährlichen Wasserstoffnachfrage. Zugrunde gelegt ist die Saisonalität des Verbrauchs in einem Wetterjahr mit substanziellen Dunkelflautenphasen. Unter Berücksichtigung eines Resilienzpuffers sind so circa 80 TWh Wasserstoffspeicher nötig. Wenn die Saisonalität der Wasserstoffnachfrage erhöht würde, beispielsweise

Importpotenzial Deutschlands an erneuerbarem Wasserstoff per Pipeline im Jahr 2035 (Szenario Fortgesetzte Anstrengung)

→ Abb. 61



Agora Energiewende, Agora Industrie und Guidehouse (2024). Anmerkungen: Schematische Darstellung der Korridorverläufe. Rundungsbedingte Abweichungen sind möglich. Keine Betrachtung der zu erwartenden künftigen Rolle Deutschlands als Transitland für europäische Wasserstoffflüsse. Einige Korridore können auch für kohlenstoffarmen Wasserstoff genutzt werden. Szenario Fortgesetzte Anstrengung: Umsetzung und Weiterentwicklung der bisherigen Instrumente zur Finanzierung von Pipelinekorridoren und zur Sicherung der Wasserstoffnachfrage in bisheriger Geschwindigkeit.

durch Einsatz von Wasserstoff zur direkten Beheizung im Gebäudesektor, wäre diese Speicheranforderung um ein Vielfaches höher.

Nach Abschätzung des Verbandes für Gas- und Wasserstoffspeicher INES können aus den bestehenden Gasspeichern in Deutschland circa 30 TWh Wasserstoffspeicherkapazitäten entwickelt werden. Für das

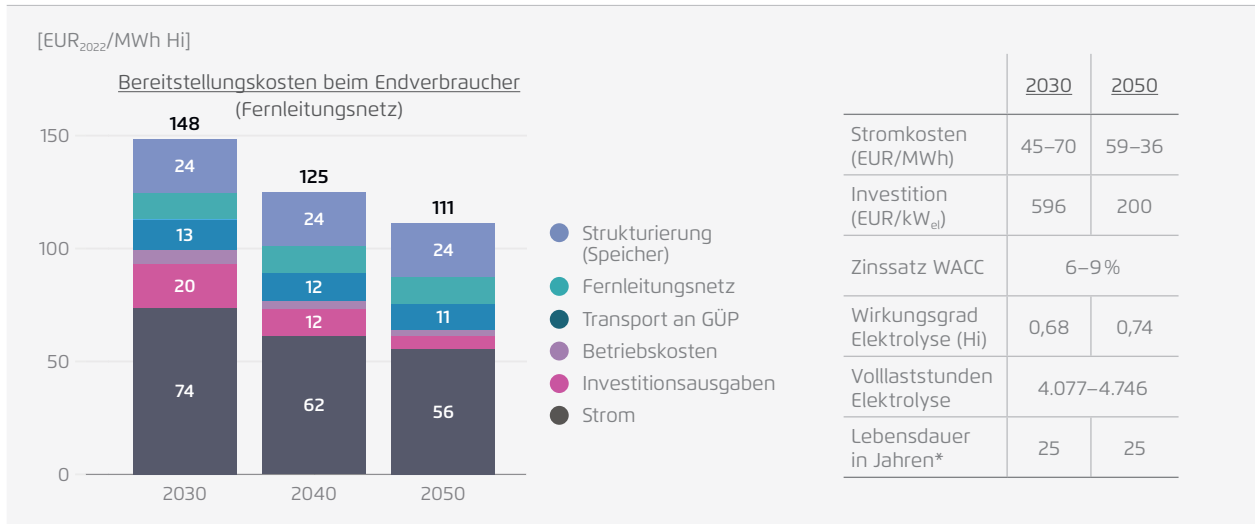
vorliegende Szenario liegt damit ein Neubaubedarf an Wasserstoffspeichern in Höhe von circa 50 TWh vor.

Strombasierte Energieträger

Zum Erreichen der Klimaneutralität werden neben elementarem Wasserstoff zudem strombasierte flüssige Energieträger, sogenannte *Power to*

Kosten von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff

→ Abb. 62



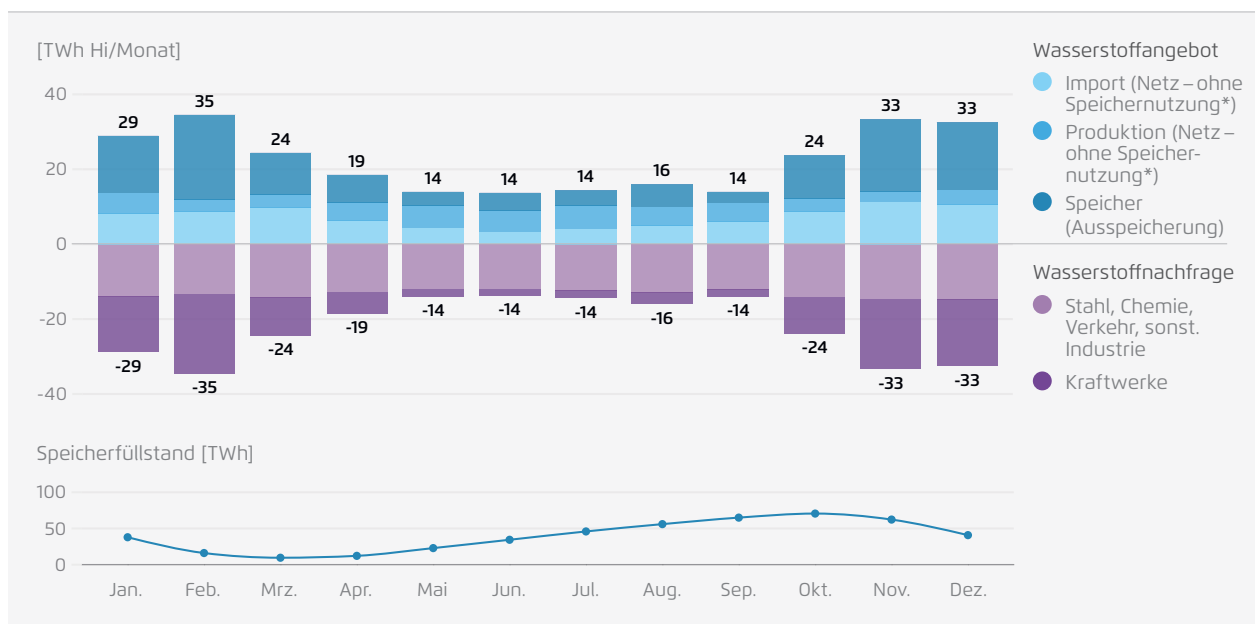
Agora Energiewende und Prognos (2024). el = elektrisch; WACC: mittlere gewichtete Kapitalkosten; GÜP = Grenzübergabepunkt; Transport GÜP: 500 bis 4.000 km Pipeline; Kosten ergeben sich als gewichtetes Mittel (0,15/0,15/0,7) der Ergebnisse aus Vollkostenrechnung für drei Erzeugungsfälle: Wind und PV (Deutschland), Offshore-Wind (Deutschland), Wind und PV (Mittelmeerregion); * Stackwechsel nach der Hälfte der Lebensdauer zu 30/25/20 % des Elektrolyse-Invest

Liquids (PtL), eingesetzt. Im Jahr 2045 beläuft sich der Einsatz von strombasierten Kraftstoffen und grünem Naphtha auf 155 TWh. Diese Produkte werden nicht in Deutschland hergestellt, sondern importiert. Zur Produktion dieser PtL-Produkte

im Ausland werden etwa 200 TWh erneuerbarer Wasserstoff und 5 Mio. Tonnen treibhausgasneutraler Kohlenstoff benötigt. Um den internationalen Handel klimaneutraler PtL-Produkte zu ermöglichen, werden im Szenario gemeinsame Standards

Saisonalität der Wasserstoffbereitstellung und -nachfrage, 2045

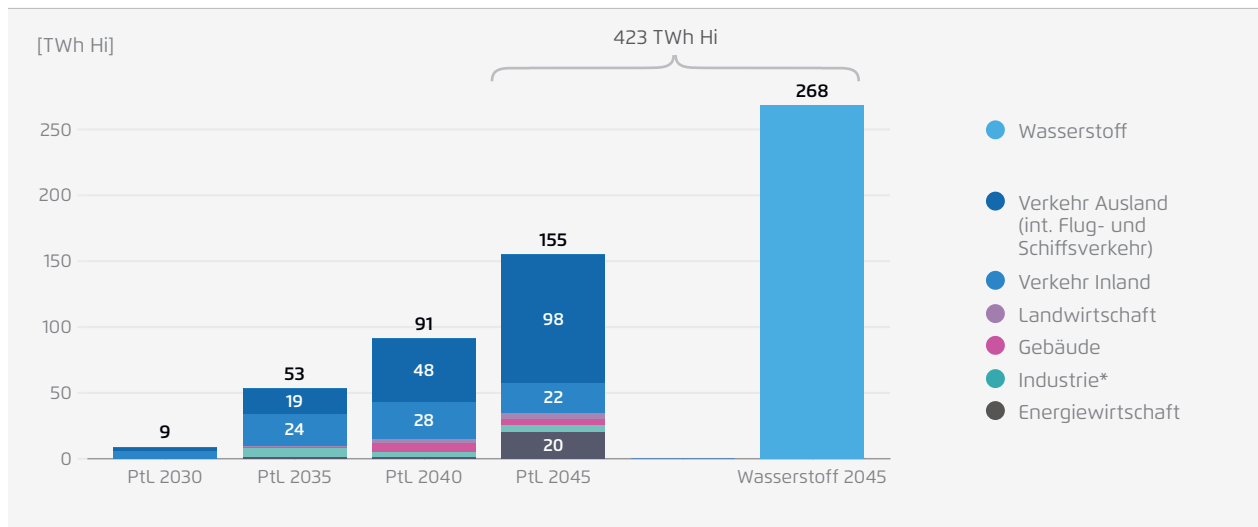
→ Abb. 63



Agora Energiewende und Prognos (2024). * Einspeicherung aus Produktion und Importen nicht abgebildet

Einsatz von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten

→ Abb. 64



Agora Energiewende und Prognos (2024). PtL = Power to Liquid; *PtL-Einsatz in der Industrie für Feedstock: grünes Naphtha und Methanol

und Zertifizierungssysteme vorangetrieben, insbesondere um die Nachhaltigkeit der eingesetzten Ressourcen zu garantieren.

Haupteinsatzbereich der CO₂-neutralen flüssigen Kraftstoffe ist der **nationale und internationale Schiffs- und Flugverkehr**.⁴⁴ Im **nationalen Verkehr** kommen strombasierte Kraftstoffe ab 2030 im Straßenverkehr aufgrund von Beimischungsquoten zu konventionellen Kraftstoffen zum Einsatz. Dieser Bedarf wächst wegen steigender Beimischungsquoten trotz des sinkenden Gesamtbedarfs an Diesel- und Ottokraftstoffen zunächst an und sinkt bis 2045 aufgrund des raschen Rückgangs der Zahl von Verbrennern auf 22 TWh. Zudem kommen in der **Industrie** für die stoffliche Nutzung, die nicht durch die verstärkte Kreislaufwirtschaft abgedeckt werden kann, geringe Mengen grünen Naphthas zum Einsatz.

Insgesamt ergibt sich für 2045 ein Bedarf an Wasserstoff und sonstigen strombasierten Brenn- und Rohstoffen in Höhe von 423 TWh, von denen 339 TWh importiert werden.

6.2.3 Zentrale Weichenstellungen

Das Szenario setzt weitere politische Anstrengung vor allem in vier zentralen Bereichen des Wasserstoffhochlaufs voraus: der Sicherung der Nachfrage durch neue und ausgeweitete Instrumente auf Abnehmerseite, der Finanzierung der internationalen Wasserstoffkorridore, der Bereitstellung von Wasserstoffspeichern und der Förderung der heimischen Wasserstoffproduktion.

1. **Eine gesicherte Nachfrage in Form langjähriger Abnahmeverträge bildet das Fundament des Wasserstoffhochlaufs:** Produzenten und Infrastrukturbetreiber können investieren, sobald sich ausreichend Kunden zu einer langjährigen Abnahme zu verpflichten. Anstrengungen in zwei Bereichen ermöglichen dies:

- Eine Kombination aus Quoten, Garantien, Förderung und grünen Leitmärkten schließt die bestehende Kostenlücke und macht den Einsatz von Wasserstoff im Stromsektor und der Industrie wettbewerbsfähig. Die entsprechenden Instrumente haben eine hohe Verbindlichkeit und eine gesicherte Finanzierung und können so die entsprechenden Anreize setzen.
- Midstream-Unternehmen können die so entstehende Nachfrage aggregieren und sich zu großvolumiger Abnahme verpflichten. Durch die

⁴⁴ Wie in Kapitel 5.4 Verkehr erläutert, ist der Einsatz dieser Brennstoffe im Flugverkehr durch Nicht-CO₂-Effekte (RFI) trotzdem mit einer Klimawirkung verbunden.

Absicherung der von diesen Akteuren geschlossenen Abnahmeverträgen wird in der Hochlaufphase weiteres Risiko aus dem Markt genommen.

2. **Importkorridore erhalten staatliche Unterstützung und Absicherung:** Importkorridore sind sehr kapitalintensive Projekte, die sich nicht von Anfang an selbst tragen können. Deutschland intensiviert den Dialog mit seinen Nachbarländern darüber, wie eine regulatorische Absicherung der Importkorridore aussehen könnte. Eine Möglichkeit ist ein Absicherungsmechanismus ähnlich dem für die nationale Wasserstoffinfrastruktur genutzten Amortisationskonto. Eine Alternative dazu sind staatliche Kapazitätsbuchungen. In allen Fällen bedarf es einer politischen Einigung der beteiligten Staaten über die Risiko- und Kostenteilung. Für Exportländer mit gegenüber OECD-Ländern stark erhöhten Finanzierungskosten – im Szenario gilt dies vor allem für die nordafrikanischen Exportländer – werden zudem Maßnahmen zur Senkung dieser Kosten geprüft. Angesichts der langen Vorlaufzeiten der komplexen Infrastrukturprojekte sind rasche Fortschritte in diesen Bereichen die Voraussetzung dafür, dass in den 2030er-Jahren Wasserstoffimporte über europäische Korridore erfolgen können.
3. **Wasserstoffspeicher sind ein Kernstück der künftigen Energieinfrastruktur:** Nach den großen Fortschritten in Richtung eines Wasserstoffkernnetzes

folgen Maßnahmen für den Bau von Wasserstoffspeichern. Der hohe Bedarf an Speichern, die größtenteils neu angelegt werden müssen, stellt eine Herausforderung dar. Voraussetzung für die Umsetzung des Szenarios ist daher, dass zeitnah ein dezidiert auf Wasserstoffspeicher ausgerichtetes Instrument entwickelt wird. Dabei wird an die bisherigen Konsultationsprozesse angeknüpft, um rasch die entscheidenden regulatorischen Fragen zu klären. Auch bei den Speichern wird so die Frage der staatlichen Absicherung und Unterstützung beantwortet.

4. **Die heimische Wasserstoffproduktion ist für den Markthochlauf erforderlich:** Der frühzeitige Aufbau der heimischen Produktion ist notwendig, auch wenn mittel- und langfristig der Großteil des benötigten Wasserstoffs importiert wird. Dafür sprechen Resilienzabwägungen und Lern- und Innovationseffekte bei der Weiterentwicklung der Technologie. Ausschreibungen für Elektrolyseure unterstützen die heimische Wasserstoffproduktion.

Tabelle 12 zeigt, welcher Schritt wann vollzogen werden müsste, damit die Entwicklungen im Szenario Wirklichkeit werden.

Zentrale Weichenstellungen für die Wasserstoffwirtschaft

→ Tabelle 12

Weichenstellung	Zeitpunkt spätestens
Ausschreibungen für Elektrolyseure unterstützen die heimische Wasserstoffproduktion	Mitte 2025
Zusätzliche Instrumente (Quoten, Garantien, Förderung, grüne Leitmärkte, Absicherung bei Midstreamern) sichern die Wasserstoffnachfrage ab und ermöglichen den Abschluss langfristiger Abnahmeverträge	Ende 2025
Ein geeignetes Absicherungsinstrument reizt die Umrüstung von Erdgas- zu Wasserstoffspeichern und den Neubau von Wasserstoffspeichern an	Ende 2025
Import-, Export- und Transitländer einigen sich über Absicherungsmechanismen für internationale Wasserstoffpipelines, damit rechtzeitig mit dem Ausbau der Korridore begonnen werden kann	Mitte 2026

6.3 Carbon Management und Carbon Capture and Storage (CCS)

Carbon Management umfasst eine Reihe von Technologien für den Umgang mit CO₂ beziehungsweise Kohlenstoff.

Im Fall von *Carbon Capture and Storage* (CCS) wird das CO₂ abgeschieden, abtransportiert und im Untergrund gespeichert. Dabei kann das CO₂ aus fossilen oder biogenen Quellen stammen, an Punktquellen (üblicherweise großen Industrieanlagen) abgeschieden oder direkt aus der Luft entnommen werden. Dies hat Auswirkungen auf die Bilanzierung von CCS: CO₂ fossilen oder prozessbedingten Ursprungs, das an Punktquellen abgeschieden wird, zählt als vermiedene Emission. Biogenes CO₂, das in Verbrennungs- oder Verarbeitungsprozessen an Punktquellen abgeschieden wird (BECCS), wird als Negativemission verbucht, weil im Laufe des Prozesses vom Biomasseanbau bis hin zur CO₂-Abscheidung der Atmosphäre insgesamt CO₂ entnommen wird. Ebenso wird die direkte Kohlenstoffabscheidung aus der Luft (DACCS; *Direct Air Carbon Capture and Storage*) als negative Emission gezählt (vgl. Infobox 11: Bilanzierung von CO₂ aus Biomasse). Die beiden letzteren Technologien zählen gemeinsam mit der natürlichen Kohlenstoffbindung durch Aufforstung beziehungsweise eine nachhaltige Bewirtschaftung von Wäldern und Agrarflächen zu den Methoden der CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (CDR; *Carbon Dioxide Removal*).

Bei *Carbon Capture and Utilization* (CCU) wird CO₂ fossilen oder biogenen Ursprungs aufgefangen und genutzt. Um dafür zu sorgen, dass das CO₂ für eine möglichst lange Zeit gebunden bleibt, sollte CCU vor allem bei der Herstellung langlebiger Produkte zum Einsatz kommen.

6.3.1 Relevanz

Um Klimaneutralität 2045 und langfristig das Ziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) für Negativemissionen zu erreichen, ist der Einsatz von CCS in zwei Kontexten notwendig: zum einen, um verbleibende prozessbedingte und fossile

Restemissionen im Industrie- und Abfallsektor abzuscheiden und dauerhaft zu speichern; zum anderen, um Restemissionen vor allem aus der Landwirtschaft auszugleichen (Abbildung 65).

Eine breitere Anwendung von CCS bei fossiler Energieerzeugung ist klimapolitisch mit Nachteilen und zudem mit einer Reihe von Kosten und Umsetzungsrisiken verbunden:

- Erstens muss jedes neue, aus fossilen Energien gebildete CO₂-Molekül langfristig gespeichert werden und konkurriert mit Anwendungen zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre um die gleichen begrenzten Einspeicherungskapazitäten. Eine fortlaufende Nutzung von fossilen Energien vergrößert also die notwendigen Anstrengungen bei der Entwicklung von Kapazitäten zur CO₂-Einspeicherung. Vor diesem Hintergrund ist auch der Beschluss der UN-Klimakonferenz COP28 zum Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energien zu verstehen.
- Zweitens entstehen entlang der Wertschöpfungskette von Kohle, Öl und Erdgas Methanemissionen, die zusätzlich kompensiert werden müssen, was sich kostensteigernd auswirkt und den notwendigen Speicherbedarf weiter erhöht.
- Drittens stellen die verfügbaren Injektionskapazitäten zumindest mittelfristig einen relevanten Engpass dar.
- Viertens können hohe Kosten drohen. Aktuelle Schätzungen für die Kosten der CO₂-Speicherung gehen aufgrund der geringen Zahl realisierter Projekte und Unsicherheiten bezüglich der geologischen Gegebenheiten in potenziellen Lagerstätten weit auseinander; begonnene Projekte sind teils mit erheblichen Kostensteigerungen konfrontiert.

Deshalb wird die Anwendung von CCS-Technologien im Szenario auf die oben genannten Bereiche beschränkt und damit ihr erfolgreicher Hochlauf abgesichert.

6.3.2 Szenariopfade

Carbon Management ermöglicht im Szenario, Emissionen zu vermeiden, unvermeidbare Restemissionen

zu kompensieren und letztlich Negativemissionen zu erzielen. Die Emission von verbleibenden CO₂-Restmengen aus Energiewirtschaft und Industrie kann im Jahr 2045 durch den Einsatz von CCS an Punktquellen (24 Mio. t CO₂) zu großen Teilen vermieden werden. Die in die Atmosphäre gelangenden CO₂-Restemissionen und Emissionen aus der Landwirtschaft in Höhe von insgesamt 40 Mio. t CO₂ werden (über-)kompensiert. Dies erfolgt überwiegend durch eine Stärkung der natürlichen Senken im LULUCF (*Land Use, Land Use Change, and Forestry*)-Bereich. Darüber hinaus spielt die stoffliche und energetische Biomassenutzung in Verbindung mit CCS sowie in weitaus geringerem Umfang die direkte Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (DACCS) eine Rolle. Im Jahr 2045 ist Deutschland so klimapositiv: Es werden 31 Mio. t CO₂ mehr gebunden als emittiert. Die einzelnen Bausteine sind im Detail in Abbildung 65 dargestellt.

Die Gesamtmenge von 65 Mio. t CO₂-Äq wird zunächst durch CCS in Verbindung mit fossilen Energieträgern an verbleibenden fossilen Punktquellen im Industrie- und Abfallsektor um 24 Mio. t reduziert. Dazu zählen:

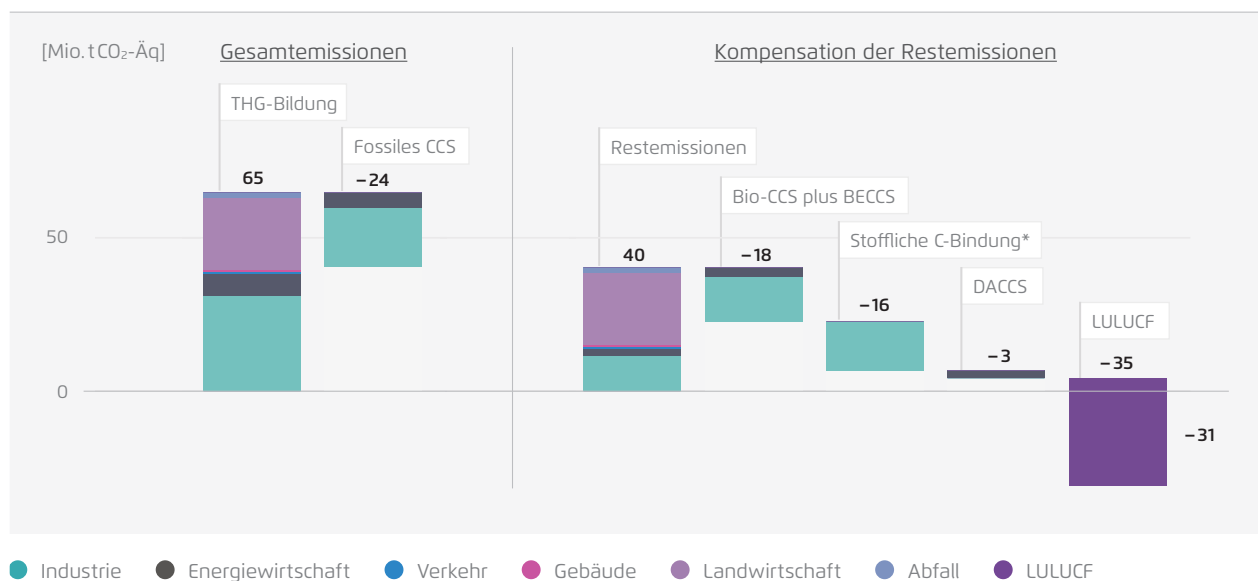
- Prozessemissionen und Emissionen aus der energetischen Nutzung von Abfällen vor allem in der Zement- und Kalkproduktion (im Jahr 2045 in Summe circa 12 Mio. t);
- CO₂-Mengen, die in Raffinerien (circa 2 Mio. t) und beim chemischen Recycling von Kunststoffabfällen sowie an Steamcrackern (circa 8 Mio. t) entstehen;
- der nicht-biogene Anteil der thermischen Abfallbehandlung (circa 3 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045).

CCS kommt zudem vorübergehend bei DRI (Direktreduktions)-Anlagen für die Stahlproduktion zum Einsatz, die zunächst mit Erdgas betrieben werden, bis ausreichend grüner Wasserstoff zur Verfügung steht (circa 5 Mio. t CO₂ im Jahr 2035).

Es verbleiben noch 40 Mio. t Restemissionen, die kompensiert werden müssen. Davon werden 18 Millionen Tonnen in Verbindung mit der Nutzung von Biomasse abgeschieden und geologisch gespeichert. Zum einen handelt es sich um Emissionen, die entlang der Verarbeitung von Biomasse in der chemischen Industrie entstehen (Bio-CCS). Dabei werden im Jahr 2045 knapp 3 Mio. t CO₂ prozessendogen und

Restemissionen und deren Kompensation, 2045

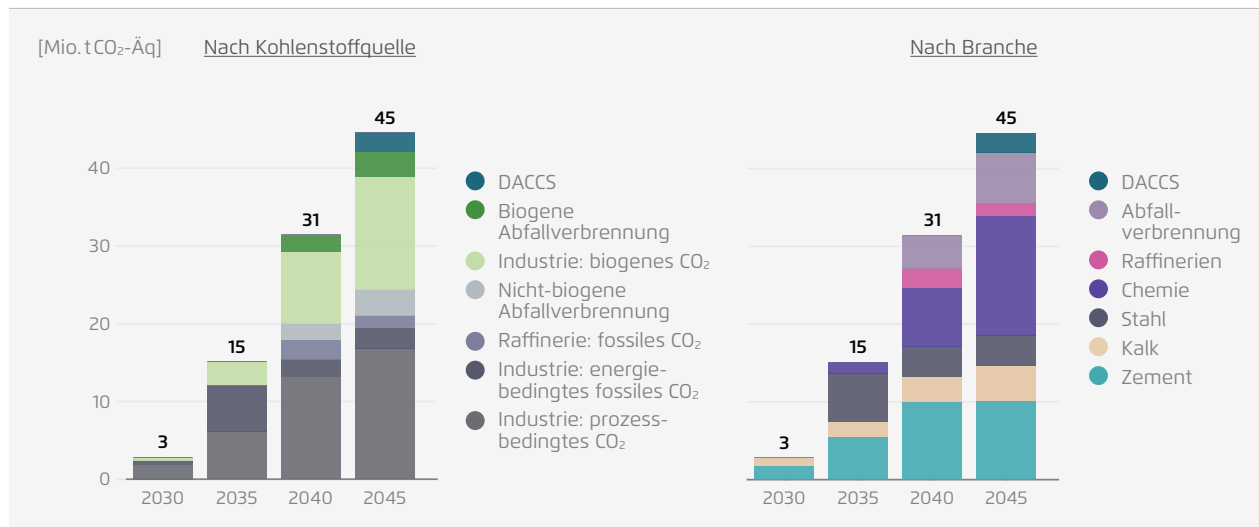
→ Abb. 65



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024). * stofflich gebundener biogener Kohlenstoff in Produkten der Chemieindustrie; eine konsequente Kreislaufführung ist erforderlich, um eine lange Speicherdauer zu ermöglichen

Abgeschiedenes und geologisch gespeichertes CO₂

→ Abb. 66



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

knapp 5 Mio. t CO₂ mittels Aminwäsche abgeschieden. Zum anderen kommt die **Nutzung von biogenen Abfällen und Biomasse zur Energieerzeugung mit anschließender CO₂-Abscheidung und Speicherung (BECCS)** zum Einsatz (insgesamt 10 Mio. t im Jahr 2045). Davon werden etwa 1 Mio. t bei der Zementherstellung abgeschieden und knapp 2 Mio. t bei der Kalkherstellung. Auch für die Eisenreduktion bei der Stahlproduktion wird teilweise biogenes Synthesegas genutzt. Das dabei entstehende CO₂ (4 Mio. t) wird prozessendogen effizient abgeschieden. Durch die Nutzung von inländischer Biomasse zur Herstellung von Synthesegas wird eine effiziente und relativ kostengünstige CO₂-Abscheidung bei der Verarbeitung von Biomasse möglich. Daneben kommt BECCS bei der thermischen Abfallbehandlung in einem Umfang von 3 Mio. t zum Einsatz.

Weitere 16 Mio. t CO₂-Äq werden vorübergehend in Produkten gebunden. Dabei wird inländische Biomasse genutzt, um über den Zwischenschritt Methanol chemische Grundstoffe herzustellen und fossiles Erdöl als Kohlenstoffquelle zu ersetzen.⁴⁵ Ein Großteil

des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs wird stofflich in Methanol und den darauf aufbauenden Chemieprodukten (temporär)⁴⁶ gebunden. Mittels Recyclingmethoden wird der gebundene Kohlenstoff insbesondere bei Kunststoffprodukten anschließend möglichst lange im Kreislauf geführt. Am Ende des Lebenszyklus sorgt der Einsatz von CCS im Rahmen der thermischen Abfallbehandlung dafür, dass der Kohlenstoff langfristigen geologischen Speichern zugeführt wird. In Summe werden so dauerhaft Negativemissionen generiert.

Die **direkte CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (DACCS)** spielt aufgrund der hohen Energieintensität der entsprechenden Prozesse im Szenario eine untergeordnete Rolle. Im Jahr 2045 werden mittels DACCS knapp 3 Mio. t CO₂ abgeschieden.

Weiteres CO₂ kann auch bei der Recarbonatisierung von Beton in Bauten sowie im Zuge der Nutzung von Kalkprodukten gebunden werden

⁴⁵ In dem Szenario wird die Pyrolyse und anschließende Gasifizierung von biogenen Reststoffen und holziger Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen angenommen. Gegenüber der konventionellen landwirtschaftlichen Flächennutzung wird durch Kurzumtriebsplantagen die CO₂-Aufnahme gesteigert und die Biodiversität gefördert.

⁴⁶ Methodischer Hinweis: Im jeweils betrachteten Stichjahr wird die biogene Kohlenstoffmenge, die im jeweiligen Jahr in Produkten gebunden wird, im Chemiesektor als negative Emission verbucht. Falls das Produkt im selben Jahr oder zu einem späteren Zeitpunkt recycelt oder thermisch genutzt wird, so wird das dabei entstehende CO₂ wie fossiles CO₂ bilanziert. Eine nur temporäre Bindung von Kohlenstoff in Produkten ist somit im Szenario bilanziell korrekt berücksichtigt.

(siehe Box „Recarbonatisierung als CO₂-Senke“). In der Berechnung der Emissionen wurde Recarbonatisierung im Einklang mit der bestehenden Systematik des Treibhausgasinventars nicht eingerechnet.

Die **Senkenfunktion des LULUCF-Bereichs** wird gestärkt und erreicht 2045 eine Leistung von insgesamt -35 Mio. CO₂-Äq pro Jahr. Ermöglicht wird dies durch die Stabilisierung und den Ausbau der Waldsenke, die Anlage von Agroforstsystemen, den Erhalt

→ Infobox 9: Was passiert, wenn ... CCS entlang der CO₂-Infrastruktur breiter zum Einsatz kommt?

In einer Szenariovariante wurde untersucht, wie sich ein verlängerter Einsatz von Erdgas in Verbindung mit CCS an Standorten der Stahlindustrie und chemischen Industrie auswirken könnte. Ein solches Szenario könnte insbesondere eintreten, falls der Wasserstoffhochlauf nicht schnell genug bewerkstelligt werden kann. Unter der Voraussetzung ausreichender Injektionskapazität kommt dies vor allem dann in Frage, wenn Industriestandorte ohnehin an der benötigten CO₂-Transportinfrastruktur liegen. Zwei Einsatzbereiche wurden für einen vorübergehend ausgeweiteten Einsatz von CCS betrachtet: Die Ausweitung von CCS für DRI-Anlagen in der Stahlproduktion und der Einsatz von CCS bei erdgasbetriebenen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) in der Chemieindustrie.

Ausweitung von CCS für DRI-Anlagen in der Stahlerzeugung: Gegenüber dem Basisszenario werden 2035 9 Mio. Tonnen und 2045 16 Mio. Tonnen mehr DRI-Stahl mit Erdgas hergestellt zulasten des Einsatzes von Wasserstoff. In den entsprechenden DRI-Anlagen kommt prozessbedingt ohnehin eine CO₂-Abscheidung zum Einsatz. Dies erhöht den Erdgaseinsatz im Jahr 2035 um 20 TWh und im Jahr 2045 um 50 TWh gegenüber dem Basisszenario. Durch die zusätzlichen Mengen an CCS in der Stahlerzeugung entsteht im Jahr 2045 ein zusätzlicher CO₂-Speicherbedarf von 6 Mio. t CO₂. Aufgrund unvollständiger Abscheideraten bei der CO₂-Abscheidung und der Vorkettenemissionen von Erdgas entweichen weiterhin Restemissionen in die Atmosphäre in einer Größenordnung von 3 Mio. t CO₂, die durch technische Senken wie DACCS oder BECCS kompensiert werden müssten, um eine klimaneutrale Produktion zu gewährleisten.

Verlängerung der Lebensdauer von industrieller Erdgas-KWK in Chemieclustern durch Nachrüstung von CCS-Anlagen: Diese werden aufgrund der stofflichen Biomasseverarbeitung ohnehin an die CO₂-Infrastruktur angeschlossen. Der zusätzliche Einsatz von CCS an KWK-Anlagen in der Chemieindustrie erhöht den Erdgasverbrauch um 5 TWh im Jahr 2035 und um 29 TWh in 2045. Im Jahr 2045 müssen zusätzlich 4 Mio. t CO₂ eingespeichert werden.

In dieser Szenariovariante liegt der Wasserstoffbedarf insgesamt für die Industriekraftwerke im Jahr 2045 um 23 TWh und für die DRI-Anlagen um 37 TWh niedriger. Diese verringerte Nachfrage ist mit Risiken für den Wasserstoffhochlauf verbunden. Aufgrund unvollständiger Abscheideraten bei der CO₂-Abscheidung und der Vorkettenemissionen von Erdgas verbleiben hier Restemissionen von ca. 5 Mio. t CO₂-Äq. Um Klimaneutralität zu erreichen, müssten diese, wie bei den DRI-CCS-Anlagen, durch technische Senken kompensiert werden.

In Summe würde ein vorübergehend ausgeweiteter Einsatz von CCS nicht nur zusätzliche CO₂-Speicherbedarfe für das abgeschiedene CO₂ erfordern, sondern auch für die Kompensation der Vorkettenemissionen und der Restemissionen, die durch unvollständige Abscheideraten entstehen. Da der erforderliche Einsatz technischer Senken wie DACCS oder BECCS stromintensiv beziehungsweise auf ausreichende Mengen nachhaltiger Biomasse angewiesen ist, wäre diese Technologieoption zudem mindestens ebenso kostenintensiv wie der Einsatz von Wasserstoff.

→ Infobox 10: Recarbonatisierung als CO₂-Senke

Bei der CO₂-Mineralisierung (oder auch CO₂-Carbonatisierung) reagiert CO₂ mit Mineralien und bildet Carbonate, die CO₂ dauerhaft speichern. Mineralisierung von Beton ist ein Vorgang, der natürlicherweise an den Oberflächen bestehender Betonbauten erfolgt. Basierend auf Andersson et al. (2019) sowie den Klinkerproduktionsmengen im Szenario wird die Senke durch Recarbonatisierung von Beton im Jahr 2045 auf ca. -1,5 Mio. t CO₂ abgeschätzt.

Auch bei der Nutzung von Kalk (CaO) wird in manchen Anwendungen das Calciumoxid zu Calciumcarbonat umgewandelt und dabei CO₂ permanent gebunden. Basierend auf einer Abschätzung von Grosso et al. (2020) zur CO₂-Bindung in verschiedenen Kalkanwendungen sowie der Entwicklung verschiedener Kalknutzungen (Stahlherstellung, Rauchgasbehandlung in Kraftwerken, Umweltschutzanwendungen u.a.) im Szenario schätzen wir die CO₂-Bindung durch Nutzung von Kalk im Jahr 2045 auf ca. -0,7 Mio. t CO₂.

der Senkenfunktion von Holzproduktspeichern und die Wiedervernässung von Moorböden (siehe Kapitel 5.6 Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft). Somit ergeben sich netto -31 Mio. t Negativemissionen.

6.3.3 Zentrale Weichenstellungen

Der Einsatz von CCS auf die oben genannten Anwendungsbereiche wird insbesondere durch die Vergabe von Fördermitteln priorisiert. Die geographische

Ausgestaltung und Dimensionierung einer leitungsgebundenen CO₂-Infrastruktur orientiert sich an den geplanten Standorten für Anlagen mit diesen Anwendungsbereichen und den dort anfallenden CO₂-Abscheidemengen.

Um für Unternehmen Planbarkeit zu gewährleisten und Investitionen in klimaneutrale Alternativen nicht zu verzögern, wird im Szenario zeitnah ein Planungs- und Finanzierungskonzept für eine CO₂-Infrastruktur unter staatlicher Mitwirkung entwickelt und umgesetzt.

→ Infobox 11: Bilanzierung von CO₂ aus Biomasse

Die Nutzung von Biomasse in Kombination mit CCS sowie die stoffliche Bindung von biogenem Kohlenstoff sind für einen großen Teil der im Szenario verbuchten Negativemissionen verantwortlich. Hierbei ist die sektorübergreifende Wirkung und Bilanzierung der Biomasseentnahme und -nutzung zu berücksichtigen.

Die Abbildung 67 veranschaulicht das Prinzip bei Holz (inklusive Agroforst und Kurzumtriebsplantagen): CO₂ wird während des Wachstums von Pflanzen gebunden und dies als Negativemissionen verbucht. Demgegenüber steht bei Ernte der Biomasse eine Buchung als Emission in Höhe des CO₂-Äquivalents des in den Pflanzen gespeicherten Kohlenstoffs. Bei der Nutzung von Biomasse wird diese daher nach derzeitiger Bilanzierungsansatz als treibhausgasneutral verbucht beziehungsweise – falls die Emission des CO₂ in die Atmosphäre vermieden wird (beispielsweise durch CCS) – erfolgt eine Buchung als Negativemission, um die bereits erfolgte Buchung von Emissionen im Zuge der Ernte auszugleichen.

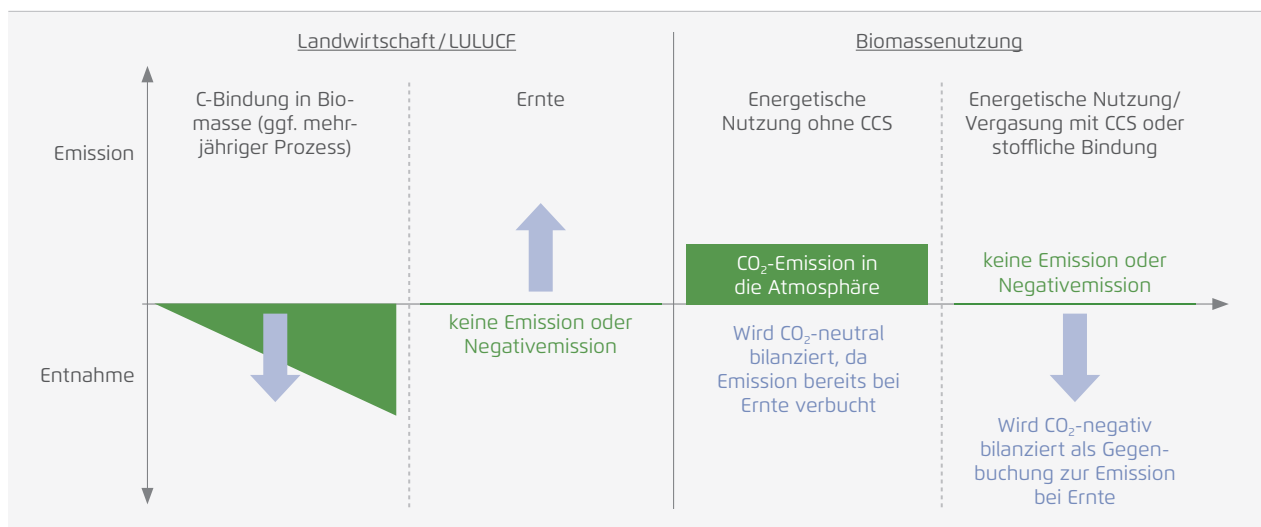
Bei Ackerkulturen wird angenommen, dass CO₂ in sehr kurzen Kreisläufen geführt wird und es erfolgt daher keine Buchung im Landwirtschaftssektor. BECCS unter Nutzung von Ackerfrüchten kann nach den Regeln des IPCC als Negativemission angerechnet werden. Jedoch sollte auch hierbei berücksichtigt werden, dass gegebenenfalls eine alternative Flächennutzung mit dauerhafter Kohlenstoffbindung möglich sein kann.

Die sektorübergreifende CO₂-Wirkung der Biomasseentnahme und -nutzung ist somit auch abhängig von einer angenommenen alternativen Entwicklung: So würde einerseits – je nach Pflanzenart und Flächennutzung – ein weiteres Wachstum der Biomasse (statt Ernte) gegebenenfalls zusätzliches CO₂ binden. Andererseits vermeidet die Nutzung von Biomasse gegebenenfalls fossile Emissionen.

Basierend auf diesen sektorübergreifenden Überlegungen wird im Szenario die Entnahme von Holz aus Laubmischwäldern mit hohem CO₂-Bindungspotenzial reduziert und die CO₂-Bindung durch Agroforst und Kurzumtriebsplantagen in Kombination mit Bio-CCS maximiert.

Bilanzierung von CO₂ aus Biomasse

→ Abb. 67



● bilanzielle Emission oder Negativemission ● realer Kohlenstofffluss

7 Literaturverzeichnis

AG Energiebilanzen e.V. (2024): *Bilanzen der Jahre 1990 bis 2022.* Online verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2021-2030>.

Agora Agriculture (2024): *Agriculture, forestry and food in a climate neutral EU. The land use sectors as part of a sustainable food system and bioeconomy.* Online verfügbar unter: https://www.agora-agriculture.org/fileadmin/Projects/2024/2024-09_EU_Agriculture_forestry_and_food_in_a_climate_neutral_EU/AGR_336_Land-use-study_WEB.pdf

Agora Energiewende (2024): *Investitionen für ein Klimaneutrales Deutschland. Finanzbedarfe und Politikoptionen.* Online verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/investitionen-fuer-ein-klimaneutrales-deutschland>

Agora Energiewende, Agora Industrie und Guidehouse (2024): *Wasserstoffimporte Deutschlands – Welchen Beitrag können Pipelineimporte in den 2030er Jahren leisten?* Online verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/wasserstoffimporte-deutschlands>

Agora Energiewende, Prognos und GEF (2024): *Wärmenetze – klimaneutral, wirtschaftlich und bezahlbar. Wie kann ein zukunftssicherer Business Case aussehen?* Online verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-18_DE_Business_Case_Waermenetze/A-EW_335_Businesscase_Waermenetze_WEB.pdf

Agora Energiewende und Agora Industrie (2024): *Low-carbon hydrogen in the EU. Towards a robust definition in view of costs, trade and climate protection.* Online verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.org/publications/low-carbon-hydrogen-in-the-eu>

Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement.* Online verfügbar unter: <https://www.agora-industrie.de/publikationen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie>

Agora Industrie und Systemiq (2023): *Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft: Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien.* Online verfügbar unter: <https://www.agora-industrie.de/publikationen/resilienter-klimaschutz-durch-eine-zirkulaere-wirtschaft>

Agora Industrie (2023): *Chemie im Wandel. Die drei Grundpfeiler für die Transformation chemischer Wertschöpfungsketten.* Online verfügbar unter: <https://www.agora-industrie.de/publikationen/chemie-im-wandel>

Agora Industrie und Wuppertal Institut (2023): *15 insights on the global steel transformation.* Online verfügbar unter: <https://www.agora-industry.org/publications/15-insights-on-the-global-steel-transformation>

Agora Think Tanks (2024): *Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung.* Online verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-studie>

Andersson, R.; Stripple, H.; Gustafsson, T. und Ljungkrantz, C. (2019): *Carbonation as a method to improve climate performance for cement based material.* *Cement and Concrete Research*, 124, 105819. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105819>

Ariadne (2024): *Fokusreport Wärme und Wohnen – Zentrale Ergebnisse aus dem Ariadne Wärme- & Wohnen-Panel.* Online verfügbar unter: <https://ariadneprojekt.de/publikation/waermepanel23/>

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2020): *Künftige Wohnungsleerstände in Deutschland. Regionale Besonderheiten und Auswirkungen.* Online verfügbar unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2020/wohnungsleerstand.html>.

BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.) (2024): *Strompreisanalyse.* Online verfügbar unter: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>

Bitkom (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.) (2022): *Rechenzentren in Deutschland 2021 – Aktuelle Marktentwicklungen.* Berlin: Borderstep Institut. Online verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-02/10.02.22-studie-rechenzentren.pdf>

BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2024): *Der Wald in Deutschland – Ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur.* Online verfügbar unter: <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/vierte-bundeswaldinventur.html>

BuVEG (Bundesverband energieeffiziente Gebäudehülle e.V.) (2023): *Sanierungsquote weiter im freien Fall.* Pressemitteilung vom 8.12.2023. <https://buveg.de/pressemeldungen/sanierungsquote-2023-weiter-im-freien-fall/>

BWE (Bundesverband WindEnergie e.V.) (2024) Status des Windenergieausbaus an Land. Online verfügbar unter: https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20240718_Status_des_Windenergieausbaus_an_Land_-_Halbjahr_2024.pdf

empirica (2024): *Wohnungsmarktprognose 2024. Regionalisierte Prognose in drei Varianten mit Ausblick bis 2045 Stand: Februar 2024 (empirica Paper 272):* Online verfügbar unter: <https://www.empirica-institut.de/nachrichten/details/nachricht/wohnungsnachfrageprognose-2024/>

ERK (Expertenrat für Klimafragen) (2024a): *Prüfbericht zur Berechnung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2023. Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 Bundes-Klimaschutzgesetz.* Online verfügbar unter: https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2024/05/ERK2024_Pruefbericht-Emissionsdaten-des-Jahres-2023.pdf

ERK (Expertenrat für Klimafragen) (2024b): *Gutachten zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024. Sondergutachten gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz.* Online verfügbar unter: https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2024/06/ERK2024_Sondergutachten-Pruefung-Projektionsdaten-2024.pdf

European Commission (2016): *Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2017 Final,* 14/06/2016.

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (2023): *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2023. Festbrennstoffe, Biokraftstoffe, Biogas.* Online verfügbar: https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2023/Mediathek/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_2023_web.pdf

Fraunhofer ISI (2022): *Erhebung des Endenergieverbrauchs im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD): Endbericht mit Sonderauswertung Digitalisierung.* Karlsruhe. Online verfügbar unter: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bits-treams/7e9565ce-e7e9-436e-8351-c1f686a3d973/content>

Fuhrhop, D. (2023): *Der unsichtbare Wohnraum: Wohnsuffizienz als Antwort auf Wohnraummangel, Klimakrise und Einsamkeit.* transcript. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.14361/9783839469002>

Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., De Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., Del Mar Zamora Dominguez, M. und Minx, J. C. (2018): *Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>

Grosso M., Biganzoli L., Campo F. P., Pantini S. und Tua C. (2020): *Literature review on the assessment of the carbonation potential of lime in different markets and beyond. Report prepared by Assessment on Waste and Resources (AWARE) Research Group at Politecnico di Milano (PoliMI), for the European Lime Association (EuLA)*: Pp. 333. Online verfügbar unter: <https://eula.eu/wp-content/uploads/2023/11/LITERATURE-REVIEW-ON-THE-ASSESSMENT-OF-THE-CARBONATION-POTENTIAL-OF-LIME-IN-DIFFERENT-MARKETS-AND-BEYOND.pdf>

IEA (International Energy Agency) (2023): *World Energy Outlook 2023*, Online verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Online verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.

IW (Institut der deutschen Wirtschaft) (2024): *Mehr Wohnungsmangel durch steigende Bedarfe und sinkende Bautätigkeit. Aktuelle Ergebnisse des IW-Wohnungsbedarfsmodells*. Online verfügbar unter: <https://www.iwkoeln.de/studien/philipp-deschermeier-ralph-henger-michael-voigtlaender-mehr-wohnungsmangel-durch-steigende-bedarfe-und-sinkende-bautaetigkeit.html>

IWU (Institut Wohnen und Umwelt) (2018): *Datenerhebung Gebäudebestand 2016*. Online verfügbar unter: <https://www.iwu.de/publikationen/iwu-wissenschaft/publ-gebaeudebestand/ff3-2018/>

Leisin, M. und Radgen, P. (2022): *Glas 2045 – Dekarbonisierung der Glasindustrie. IER, Universität Stuttgart, Studie im Auftrag des Bundesverband Glasindustrie e.V., Stuttgart*. Online verfügbar unter: <https://www.bvglas.de/dekarbonisierung/bv-glas-roadmap-zur-dekarbonisierung-der-glasindustrie>

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

Pestel Institut (2024): *Bauen und Wohnen 2024 in Deutschland. Beauftrag vom Verbändebündnis Wohnen*. Online verfügbar unter: <https://mieterbund.de/app/uploads/2024/01/Bauen-und-Wohnen-im-Jahr-2024.pdf>

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

Prognos (2023): *Prognos Economic Outlook. Daten-Auszug Herbst 2023*. Online verfügbar unter: <https://www.prognos.com/de/projekt/prognos-economic-outlook-peo>

Prognos, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI) und Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforshung mbH (GWS) (2011): *Energieszenarien 2011. Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Basel, Köln, Osnabrück, Juli 2011*. Online verfügbar unter: https://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/11_08_12_Energieszenarien_2011.pdf

Prognos, Fraunhofer ISI, Technische Universität München und Geiger, B. (2016): *Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes.* Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2017-01-09_cc_01-2017_endbericht-datenbasis-energieeffizienz.pdf

Prognos, Öko-Institut, ifeu, FIW, iTG, dena, bbb, adelphi und EY (2022): *Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.* Online verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebaeudestrategie-klimaneutralitaet-2045.html>

Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.* Online verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022a): *15. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung.* Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/begleitheft.html>

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022b): *Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff – Lange Reihen von 2000 bis 2021.* Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/baufertigstellungen-baustoff-pdf-5311202.html>

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023): *Landwirtschaftliche Bodennutzung nach ausgewählten Hauptnutzungsarten.* Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/flaechen-hauptnutzungsarten.html>

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024a): *Bedeutung der energieintensiven Industriezweige in Deutschland.* Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/produktionsindex-energieintensive-branchen.html>

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024b): *Baufertigstellungen im Hochbau: Baufertigstellungen im Hochbau: Deutschland, Jahre, Bautätigkeiten, Gebäudeart.* Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/31121/table/31121-0001>.

UBA (Umweltbundesamt) (2021): *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland, Kurzfassung, Climate Change, 26/2021.* Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung>

UBA (Umweltbundesamt) (2023): *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2021.* Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/28_2023_cc_bericht-erstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf

UBA (Umweltbundesamt) (2024): *Treibhausgasprojektionen für Deutschland: Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024)* Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_0.pdf

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change): (2020): Reporting Requirements. Online verfügbar unter: <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/reporting-requirements>

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change): (2024): National Inventory Document for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2022. Online verfügbar unter: <https://unfccc.int/documents/637995>

Wahlberg, D., Gniechwitz, T., Paare, K., und Schulze, T. (2022): *Wohnungsbau. Die Zukunft des Bestandes. Studie zum 13. Wohnungsbautag 2022 und Ergebnisse aus aktuellen Untersuchungen Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (Bauforschungsbericht Nr. 82):* ARGE Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen. Online verfügbar unter: <https://www.gdw.de/media/2022/02/studie-wohnungsbau-tag-2022-zukunft-des-bestandes.pdf>

WEO (World Energy Outlook) (2023) World Energy Outlook. Online verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

Zimmermann, P., Brischke, L.-A., Bierwirth, A., & Buschka, M. (2023): *Unterstützung von Suffizienzansätzen im Gebäudebereich. Bundesanstalt für Bauwesen, Städtebau und Raumordnung (BBSR):* Online verfügbar unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2023/bbsr-online-09-2023.html>

8 Anhang

8.1 Modelle

8.1.1 Prognos Strommarktmodell

Der Entwicklung des Stromsystems wurde mit dem Strommarktmodell von Prognos modelliert. Das Modell optimiert bis zum Jahr 2050 stundenscharf den Einsatz der einzelnen Kraftwerksblöcke in Europa.

Im Modell erfolgt der Kraftwerkseinsatz realitätsnah entsprechend der jeweiligen Lastnachfrage nach der Grenzkostenlogik (Merit-Order). Das Kraftwerk mit den niedrigsten Grenzkosten wird zuerst eingesetzt, alle weiteren Kraftwerke sortieren sich gemäß ihren Grenzkosten ein, bis die Last für jede einzelne Stunde des Betrachtungszeitraumes gedeckt ist. Dabei bestimmt das jeweils zuletzt eingesetzte Kraftwerk mit den höchsten Grenzkosten den Preis. Pumpspeicher, Speicherwasserkraftwerke und Batteriespeicher nutzen Spreads in den Strompreisen, um ihren Ertrag zu maximieren.

Der Stromaustausch zwischen den einzelnen Ländern wird auf Basis der modellierten stündlichen Großhandelspreise und den vorhandenen Übertragungskapazitäten in einem iterativen Verfahren abgebildet. Wie am realen Strommarkt glätten Im- und Exporte im Modell die Preise in den einzelnen Ländern, einseitige Preisausschläge werden im Rahmen der Strommarktkopplung reduziert.

Die Stilllegung von thermischen beziehungsweise regelbaren Kraftwerken erfolgt in der Regel am Ende ihrer technischen Lebensdauer. Anhand von technischen und wirtschaftlichen Kriterien wird bestimmt, ob lebensverlängernde Retrofitmaßnahmen oder auch vorzeitige Stilllegungen aus wirtschaftlichen Gründen vorgenommen werden. Der Zubau für Kraftwerke erfolgt entweder anhand technischer Notwendigkeiten (z.B.: Deckung der Nachfrage) oder

anhand von Wirtschaftlichkeitskriterien. Für neu in den Kraftwerkspark kommende Kapazitäten wird dabei zunächst ihre Position in der Merit-Order ermittelt. Davon ausgehend wird die Erlös- und Kostensituation berechnet.

Erneuerbare Energien können entweder nach exogenen Vorgaben unter Berücksichtigung der bestehenden Potenziale oder anhand der sich ergebenden Wirtschaftlichkeit zugebaut werden. Für alle Technologien werden Kosten, Lebensdauer, zu erwartender Ertrag und weitere Parameter geprüft. Die Stromproduktion wird anhand von meteorologischen Reanalyse-Wetterdaten stündlich simuliert und für vergangene Jahre mit empirischen Einspeisezeitreihen verifiziert. Die Simulation erfolgt für unterschiedliche Wetterjahre. Weiterhin wird die technologische Entwicklung der Anlagen wie beispielsweise die Veränderung der Leistungskennlinien und der Wirkungsgrade in die simulierten Einspeisezeitreihen mit einbezogen.

Ein besonderer Fokus liegt auf der Modellierung der Stromnachfrage. Der jährliche Strombedarf wird für die einzelnen Nachfragesektoren nach Anwendungen und Branchen modelliert. Die jährliche Stromnachfrage wird dann in stündliche Lastprofile überführt. Hierbei ist zwischen zwei Typen zu unterscheiden: Inflexible Verbraucher können nicht auf Strommarktsignale reagieren, ihr Verbrauchsprofil ist somit vorgegeben. Flexible Verbraucher können hingegen auf Strommarktsignale reagieren (unter Berücksichtigung der wesentlichen Anlagenparameter), ihren Verbrauch verschieben und somit Flexibilität für das Stromsystem zur Verfügung stellen. Die Modellierung der flexiblen Verbraucher erfolgt unter Annahmen des möglichen Lastverschiebungspotenzials, insbesondere von Wärmepumpenheizungen, Elektrofahrzeugen und Elektrolyseuren.

Als Ergebnis der stündlichen Modellierung liefert das Strommarktmodell Daten zu Stromerzeugung,

Treibhausgasemissionen, Brennstoffeinsatz und Großhandelsstrompreisen sowie zur Wirtschaftlichkeit und Rentabilität der einzelnen Kraftwerksblöcke.

8.1.2 ProgRESS – Prognos Residential Sector Simulation Modell (Private Haushalte)

Mit dem von der Prognos AG entwickelten Prognos-RESidential-Sector-Modell (ProgRESS) können der Endenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Sektors Private Haushalte auf nationaler Ebene quantifiziert und nach Anwendungen und Energieträgern dargestellt werden. Es handelt sich um ein *Bottom up*-Simulationsmodell, welches eine Vielzahl an Technologien und partiell auch ökonomische Entscheidungen abbilden kann.

Das Modell kann für die Analyse und Strukturierung des Energieverbrauchs im Ex-Post-Zeitraum genutzt werden, aber auch für Projektionen der zukünftigen Energieverbrauchsentwicklung. Es eignet sich dabei sowohl für Trendfortschreibungen und instrumentbasierte Szenarien als auch für Zielszenarien. Zentrale Modellergebnisse sind Angaben zum jährlichen Energieverbrauch, die differenziert nach **Verwendungszwecken und Energieträgern** geliefert werden. Dabei werden unter anderem folgende Verwendungszwecke (Anwendungen) unterschieden:

- Raumwärme;
- Warmwasser;
- Gebäudetechnik, darunter Hilfsenergie für den Betrieb von Heizungen, Verbrauch von Lüftungsanlagen und Klimatisierung;
- Kochen (Prozesswärme);
- Beleuchtung;
- Informations- und Kommunikationstechnologie und Unterhaltungsgeräte;
- Haushaltsgroßgeräte;
- übrige (Kleingeräte).

Die abgebildeten Energieträger umfassen die in der Energiebilanz für den Sektor Private Haushalte ausgewiesenen Energieträger. Zu diesen gehören: Heizöl extra-leicht, (Erd-)Gas, Elektrizität, Kohle, Holz, leitungsgebundene Wärme sowie die übrigen

Erneuerbaren Energien, letztere aufgeschlüsselt nach Solarthermie, Umweltwärme und Biomethan. Der Elektrizitätsverbrauch für Wärmepumpen kann separat ausgewiesen werden. Strombasierte Energieträger (Wasserstoff oder daraus abgeleitete synthetische Energieträger wie *Power to Liquid* und *Power to Gas*) können ebenfalls einzeln aufgeschlüsselt werden.

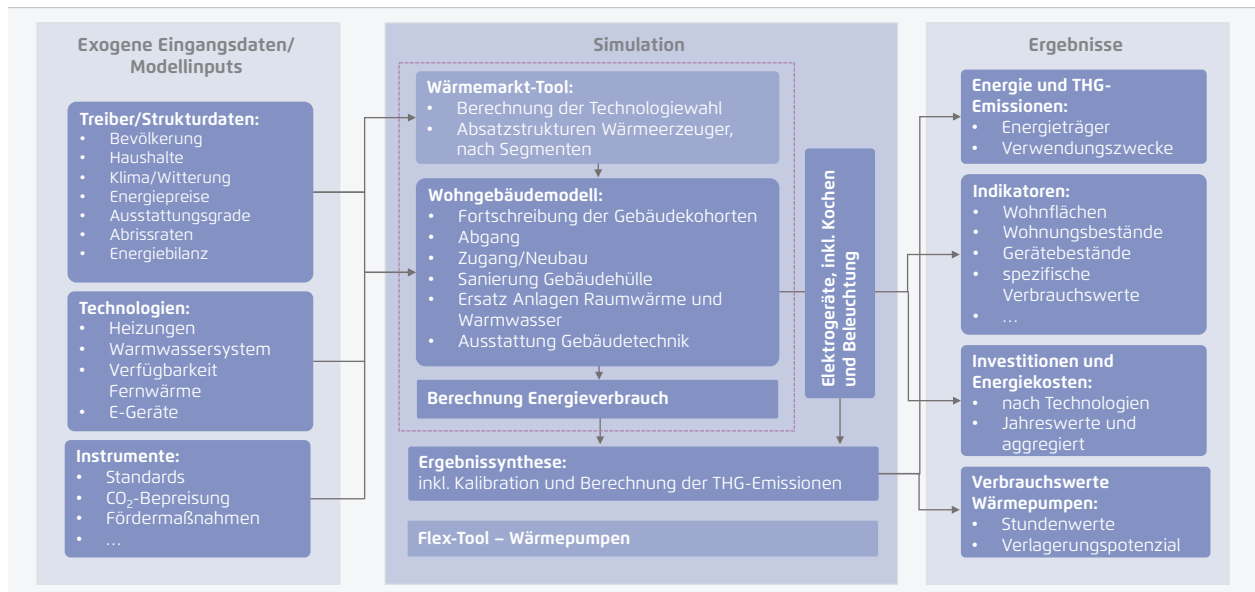
Die grundlegende Modellstruktur ist in Abbildung A1 dargestellt. Zentrale Bausteine der Simulation sind das **Wohngebäudemodell** und das **Elektrogerätemodell**. Mit dem Wohngebäudemodell wird der Bestand an Wohnungen und Wohnflächen rekursiv anhand des Bestands des Vorjahres sowie exogener Rahmen- und Szenariovorgaben fortgeschrieben. Es setzt sich zusammen aus dem vorgelagerten Wärmemarkt-Tool zur Berechnung der Absatzstruktur der Wärmeerzeuger, dem Modul zum Gebäudebestand und dem daran anschließenden Modul zur Berechnung des Energieverbrauchs der Gebäude. Im Wohngebäudemodell werden folgende Teilsegmente differenziert: Gebäudetypen, Gebäudealtersklassen (Baualter), Beheizungsstrukturen nach Energieträgern, Ergänzungsheizungen (Solarthermie, Kaminholz), Warmwassersysteme, Gebäudetechnik, Belegung (dauerhaft bewohnt, zeitweise bewohnt, leerstehend).

Im Elektrogerätemodell wird der Bestand und der Energieverbrauch der von privaten Haushalten genutzten Elektrogeräte berechnet (inklusive Beleuchtung und Kochen). Dabei werden über 25 Gerätetypen unterschieden. Das Gerätemodell nutzt die gleichen Rahmendaten (unter anderem Bevölkerungsgröße, Zahl und Größe der Haushalte) wie das Wohngebäudemodell, ist ansonsten jedoch weitgehend unabhängig vom Wohngebäudemodell. Ausnahmen bilden Klimatisierung und Beleuchtung, da hier eine Kopplung über die Flächen und das genutzte Heizsystem besteht (Kühlung mit Wärmepumpen).

Im daran anschließenden Synthesemodul werden die Ergebnisse des Wohngebäudemodells und des Elektrogerätemodells zusammengefasst und gegebenenfalls auf die Energiestatistik kalibriert und die energiebedingten Treibhausgasemissionen berechnet.

Schematischer Überblick – ProgRESS

→ Abb. A1



Prognos (2024)

Systemgrenze: Das Modell bildet den Energieverbrauch von Wohngebäuden sowie von Wohnungen in Nichtwohngebäuden und den Stromverbrauch von Haushaltsgeräten und der Haushaltsbeleuchtung ab. Das Modell bildet also den Energieverbrauch des Sektors Private Haushalte ab, in Abgrenzung zur nationalen Energiebilanz. Im Treibhausgasinventar entspricht dies der CRF⁴⁷-Kategorie 1A4b. Nicht im Haushaltsmodell abgebildet wird der Verbrauch für die Mobilität. Auch die Erzeugung von Energie in beziehungsweise auf den Gebäuden, beispielsweise durch Auf-Dach-Photovoltaikanlagen, wird nicht im Haushaltssektor ausgewiesen und entsprechend nicht berücksichtigt.⁴⁸

Geographische Abdeckung und räumliche Auflösung: Das Modell kann grundsätzlich für verschiedene geographische Abgrenzungen genutzt werden, in Abhängigkeit der genutzten Inputwerte. Standardmässig wird es für die Modellierung in Deutschland (und in der Schweiz) eingesetzt. Das Modell verfügt über keine räumliche Auflösung, es bildet

Gesamtdeutschland ab. In Abhängigkeit von den verwendeten Inputdaten könnte jedoch auch nach Regionen unterschieden werden, respektive Berechnungen für andere Regionen vorgenommen werden, beispielsweise für einzelne Länder. Alternativ lassen sich mittels nachgelagerter Berechnungsschritte die nationalen Ergebnisse anhand von regionalen Strukturdaten auch passgenau regionalisieren.

Zeitliche Auflösung und Zeithorizont: Das Modell rechnet jahresscharf, respektive in Jahresschritten. Der Startzeitpunkt der Modellierung ist das Jahr 1990. Das Jahr 1990 bildet den Ausgangsbestand der Kohorten beziehungsweise den Startpunkt der Fortschreibung. Bis an den aktuellen Rand sind die Bestände und Verbrauchswerte an Statistiken geeicht, soweit solche vorliegen. Der Vergleich von Modellwert und Statistik ermöglicht eine Einschätzung der Modellgüte und gibt Hinweise auf notwendigen Anpassungsbedarf. Das Endjahr der Modellierung ist anpassbar. Für das Szenario «KND – Umsetzung» wurde bis zum Jahr 2050 gerechnet.

Je nach Fragestellung kann der Jahresstromverbrauch nachträglich anhand der Angaben zum Verwendungszweck in stündliche Lastkurven umgelegt werden. Für den Stromverbrauch der Wärmepumpen wird dies in Abhängigkeit der Außentemperatur und

⁴⁷ Common Reporting Format

⁴⁸ In den Energiebilanzen wird die Eigenerzeugung von Strom im Umwandlungssektor ausgewiesen, zusammen mit der übrigen Stromerzeugung. Der Verbrauch für Mobilität wird dem Sektor Verkehr zugerechnet.

dem Verlagerungspotenzial (Speicher) mit dem Flex-Tool berechnet.

Einordnung des Modells: Das Modell ProgRESS ist Teil der Prognos-Modelle-Landschaft.⁴⁹ Je nach Fragestellung kann ProgRESS mit anderen Modellen von Prognos verknüpft werden, um fachübergreifende Aspekte eines Themas zu analysieren.

8.1.3 GHD-Nachfrage Modell

Mit dem von der Prognos AG entwickelten Nachfragemodell für den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) werden der Endenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen dieses Sektors auf nationaler Ebene quantifiziert und nach Anwendungen, Branchen und Energieträgern dargestellt. Es handelt sich um ein *Bottom up*-Modell, welches eine Vielzahl an Technologien abbildet, und es kann für Projektionen der zukünftigen Energieverbrauchsentwicklung genutzt werden. Es eignet sich dabei für Trendfortschreibungen und die Berechnung Instrumenten-basierter Szenarien, aber auch für Zielszenarien. Zentrale Modellergebnisse sind Angaben zum jährlichen Energieverbrauch und den Treibhausgasemissionen differenziert nach Anwendungen, Branchen und Energieträgern. Dabei werden unter anderem folgende Verwendungszwecke unterschieden:

- Raumwärme;
- Warmwasser;
- Prozesswärme;
- Beleuchtung;
- Bürogeräte;
- Klimakälte;
- Prozesswärme;
- Prozesskälte;
- Mechanische Energie.

Das GHD-Nachfragemodell ist ein Simulationsmodell. Dabei wird für den Verwendungszweck

Raumwärme im Vergleich zu den übrigen Anwendungen ein anderer Ansatz gewählt. Bei der Berechnung des Raumwärmeverbrauchs wird der Flächenbestand in Kohorten nach Baualter und Branchen auf Basis der Rahmendaten (unter anderem zu den Erwerbstätigen je Branche) und den Vorgaben des Szenarios fortgeschrieben. Durch die Verknüpfung der Flächen mit dem jeweiligen spezifischen Raumwärmeverbrauch wird der Energieverbrauch für Raumwärme je Branche berechnet. Dabei beeinflussen Zu- und Abgänge, energetische Sanierungen sowie die Klimaveränderung den spezifischen Flächenverbrauch. Die Absatzstruktur der Wärmeerzeuger wird wie bei den Wohngebäuden mit dem vorgelagerten Wärmemarkt-Tool berechnet. Dabei handelt sich um ein *Discrete Choice*-Modell, das anhand der Investitionskosten, den Energiepreisen und den Ausgaben für Energie (laufende Energiekosten) sowie den Treibhausgasemissionen (als Indikator für die Umweltverträglichkeit) die Absatzstruktur berechnet. Dabei werden Politikinstrumente wie Förderungen oder Mindestvorgaben für den Anteil der durch Erneuerbare Energien zu erzeugenden Wärme mitberücksichtigt.

Die Berechnung der übrigen Anwendungen (Prozesswärme, Klimakälte, Beleuchtung und so weiter) basiert auf der Anlageneffizienz und Anlagenstruktur je Branche sowie der Entwicklung des Mengentreibers, jeweils unterschieden nach Branchen.

Der heterogene GHD-Sektor wird bei der Modellierung in 17 Branchen aufgeteilt. Die Verteilung der Energieträgerverbräuche auf die einzelnen Branchen ist aufgrund der begrenzten Datenlage mit Unsicherheiten behaftet. Für verschiedene Stichjahre wurden die Ex-post-Verbräuche anhand von Befragungen und Stichprobenmessungen im Rahmen verschiedener Studien hochgerechnet (Fraunhofer ISI 2023; Prognos et al. 2016). Die Verteilung der Verbrauchswerte auf die Branchen wird in manchen Fällen, unter anderem bei der Landwirtschaft und den Rechenzentren, anhand anderer Quellen plausibilisiert und gegebenenfalls angepasst (UBA 2024; UNFCCC

⁴⁹ <https://www.prognos.com/de/modelle-tools/modelle>; <https://www.prognos.com/de/progress>

2024; Bitkom 2021).⁵⁰ Die Energieverbräuche der Landwirtschaft werden mit den Angaben aus den Treibhausgasemissionsinventar abgeglichen. Die Entwicklung des Energieverbrauchs von Rechenzentren wird Studien zur Marktentwicklung gegenübergestellt und validiert.

Systemgrenze: Das Modell bildet den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen ab, in Abgrenzung zur Energiebilanz. Im Treibhausgasemissionsinventar entspricht dies den Kategorien CRF 1A4a und 1A5. Die Verbrennung von Brennstoffen in Land- und Forstwirtschaft entspricht 1A4c und wird ebenso mitberücksichtigt. Der Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft sowie die Treibhausgasemissionen des Bauverkehrs können separat ausgewiesen beziehungsweise abgetrennt werden. Dadurch können zusammen mit den Ergebnissen des Sektors Private Haushalte die Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors wie vom Klimaschutzgesetz (KSG) gefordert abgebildet werden.

Geographische Abdeckung und räumliche Auflösung: Das Modell kann grundsätzlich für verschiedene geographische Regionen genutzt werden, in Abhängigkeit der genutzten Inputwerte. Standardmäßig wird es für die Modellierung in Deutschland eingesetzt. Das Modell verfügt nicht über eine räumliche Auflösung, es bildet standardmäßig Gesamtdeutschland ab.

Zeitliche Auflösung und Zeithorizont: Das GHD-Nachfragemodell rechnet jahresscharf bis zum Jahr 2050. Startzeitpunkt ist das Jahr 1990. Bis an den aktuellen Rand sind die Bestände und Verbrauchswerte an Statistiken geeicht (der Energieverbrauch auf die Angaben der AG Energiebilanzen). Der Vergleich Modellwert und Statistik ermöglicht eine Einschätzung der Modellgüte und gibt Hinweise auf notwendige Anpassungen.

Einordnung des Modells: Das GHD-Nachfragemodell ist Teil der Prognos-Modelle-Landschaft.⁵¹ Je nach Fragestellung kann das GHD-Nachfragemodell mit anderen Modellen von Prognos verknüpft werden, um fachübergreifende Aspekte eines Themas zu analysieren.

8.1.4 Verkehrsmodell TEMPS

Das am Öko-Institut entwickelte Modell TEMPS⁵² ermöglicht es, den Endenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs für unterschiedliche Szenarien zu quantifizieren und dabei Veränderungen der Verkehrsnachfrage, im Fahrzeugbestand und beim Kraftstoffeinsatz abzubilden. Das Modell besteht aus den drei Komponenten Verkehrsnachfrage, Fahrzeugbestand, Energie- und Treibhausgasbilanz.

Die Verkehrsnachfrage wird in TEMPS nach den Bereichen Güterverkehr, Personenverkehr, Luftverkehr und Seeschiffverkehr unterschieden. Die Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr wird parametergestützt auf Basis der Entwicklung zentraler Mobilitätskenngrößen ermittelt.

Die Technologiedatenbasis bildet die Grundlage für die Simulation der zukünftigen Entwicklung im Bereich der Fahrzeugtechnologien. Sie dokumentiert mögliche technische Entwicklungen des jeweiligen Verkehrsträgers bis zum Jahr 2050 differenziert nach Größenklasse und Antriebsart und ist im Straßenverkehr mit Kostenannahmen versehen. Die künftige Effizienzentwicklung im Straßenverkehr wird über das Neuzulassungsmodul und das Bestandsmodul berechnet. Im Neuzulassungsmodul wird in Abhängigkeit von Inputgrößen wie beispielsweise den ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen und den Nutzeranforderungen an die Fahrzeuge (Jahresfahrleistungen, Reichweiten) die Zusammensetzung der Neuzulassungen ermittelt. Das Bestandsmodul

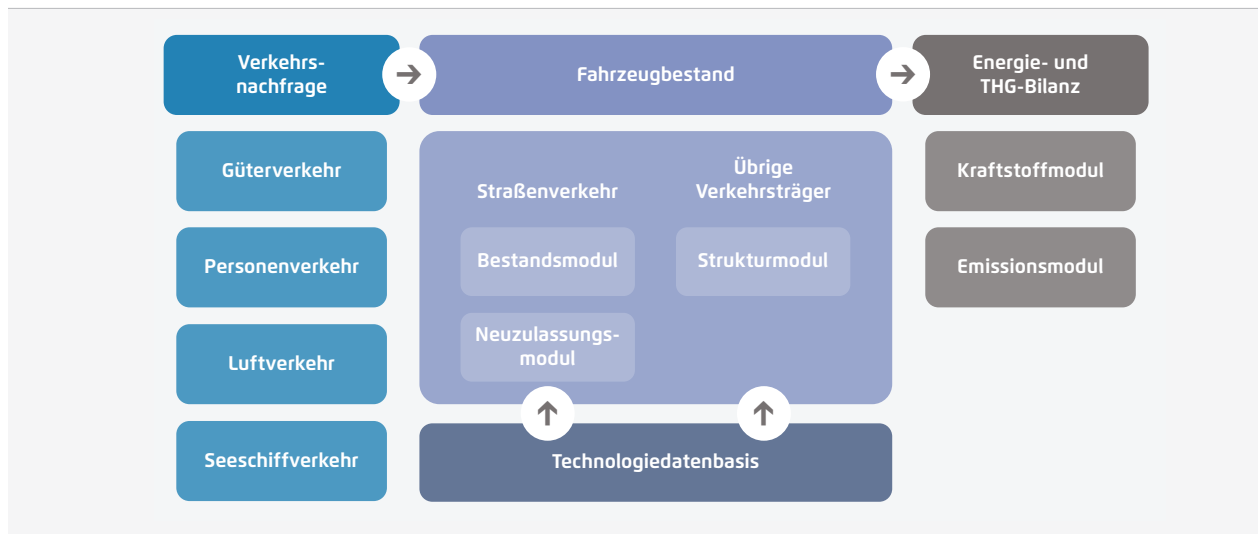
50 weitere Materialien: <https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/govreg/inventory/envzfmOva/>

51 <https://www.prognos.com/de/nachfrage-ghd>

52 Transport Emissions and Policy Scenarios.

Übersicht über das Modell TEMPS

→ Abb. A2



Öko-Institut (2024)

berechnet mittels spezifischer Überlebensraten der Fahrzeuge und durchschnittlichen Fahrleistungen den Bestand – differenziert nach Größenklasse, Antriebsart und Haltergruppe. Im Gegensatz zum Straßenverkehr setzen beispielsweise beim Schienenverkehr Effizienzmaßnahmen nicht nur beim einzelnen Fahrzeug, sondern auch auf Systemebene an. Daher wird für die übrigen Verkehrsträger kein Bestand berechnet, sondern die Entwicklung der Technologien und Verbräuche auf Systemebene ermittelt.

Die Entwicklung des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen des Verkehrs steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Modellierung von Verkehrsnachfrage und Fahrzeugbestand und wird bottom-up ermittelt. Dazu werden die Daten zu Verkehrsnachfrage und Fahrzeugbestand mit den Annahmen zum Energiemix (Anteil von Biokraftstoffen, strombasierten Kraftstoffen und fossilen Kraftstoffen) und den spezifischen Emissionsfaktoren der Kraftstoffe miteinander verknüpft.

8.1.5 Landwirtschaftsmodell LiSE⁵³

Das Agrarmodell LiSE (LiSE steht für *Livestock, Soil and Energy Emissions*) ist ein Excel-basiertes Modell, das die Treibhausgasemissionen und andere umweltrelevante Indikatoren der landwirtschaftlichen Produktion aus der Tierhaltung und der Nutzung landwirtschaftlicher Böden in Deutschland sowie die energiebedingten Emissionen aus Land- und Gartenbau kalkuliert. Das Modell setzt auf den Bestands- und Strukturdaten der Nationalen Treibhausgasinventare auf und modelliert mit einem *Bottom up-Ansatz* die Emissionen der entsprechenden Gruppen. Neben den Treibhausgasemissionen werden im Modell weitere Größen wie beispielsweise die Entwicklung der Flächenbelegung und der Stickstoffsalden berechnet. Das Modell besteht aus den drei Hauptmodulen Nutztierhaltung, landwirtschaftliche Böden und Energienutzung. Zusätzlich ist eine Differenzierung der einzelnen Nachfragegruppen nach Tierhaltung (inklusive Futtermittel),

⁵³ Anmerkung: Das Szenario im Sektor Landwirtschaft basiert weitestgehend auf Annahmen der Studie *Agriculture, forestry and food in a climate neutral EU*, die im September 2024 von Agora Agrar veröffentlicht wurde und interpretiert die Ergebnisse der Studie für Deutschland. Die Berechnungen erfolgten auf Basis des Capri-Modells. Die Berechnungen für die Jahre vor 2045 und die Berechnungen für die energiebedingten Emissionen der Landwirtschaft erfolgten durch das Öko-Institut mit dem LiSE-Modell.

pflanzliche Lebensmittel und Biomasseproduktion für die stoffliche und die energetische Nutzung möglich.

Als Eingangsdaten werden externe Annahmen zur Entwicklung der Nachfrage nach tierischen und pflanzlichen Lebensmitteln und der Produktion von Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung verwendet. Diese Größen werden in Abgleich mit der Fachliteratur wie beispielsweise agrarökonomischen Projektionen zur Marktentwicklung, politischen Vorgaben oder Annahmen zur Entwicklung des Konsumverhaltens ermittelt oder aus anderen Modellen des Öko-Instituts abgeleitet wie beispielsweise Angaben zur Nachfrage nach Biomasse in anderen Sektoren. Neben der Entwicklung der Nachfrage können weitere externe Vorgaben, die sich aus politischen Zielstellungen und der Umsetzung rechtlicher Vorgaben ableiten lassen, berücksichtigt werden. Dazu zählen beispielsweise verschiedene Landbau- und Tierhaltungsformen und deren Ertrags- und Leistungsentwicklung, aber auch die Flächenbelegungen durch zusätzliche Biodiversitätsflächen, Flächen zum Moorschutz oder der Flächenbedarf für Siedlung und Infrastruktur.

Nutztierhaltung

Das Modul zur Nutztierhaltung umfasst alle relevanten Nutztierklassen und deren Methan- sowie direkte und indirekte Lachgasemissionen. Wichtigste Größe sind zunächst die Tierbestände selbst. Hier gibt es eine Schnittstelle zu einem Konsummodul, mit dem Verhaltensänderungen und Selbstversorgungsgrade im Bereich des Milch- und Fleischverzehrs quantifiziert und in das Modul zur Nutztierhaltung zur Bestandsanpassung einfließen können. Wesentliche Aktivitätsgrößen des Moduls sind: Bestandsgrößen in der Nutztierhaltung, Milchleistung, Stickstoff (N)- und *Volatile solids* (VS)-Exkretionsrate, Methanbildungsraten bei Wirtschaftsdünger sowie Güllevergärung. Weitere wichtige Kenngrößen charakterisieren die Stallungen (stroh- beziehungsweise güllebasiert, Anbindehaltung oder Freilaufsysteme) und die Wirtschaftsdüngerlagerung. Bei letzterer wird spezifiziert, welcher Anteil anaerob vergoren wird und in welchem Umfang die Gärrestlagerung gasdicht erfolgt. Auch für die nicht vergorenen Wirtschaftsdünger

kann der Effekt einer abgedeckten Lagerung ermittelt werden. Über den gesamten Zeitraum des Szenarios können außerdem Leistungsparameter und eine stickstoffoptimierte Fütterung berücksichtigt werden. Für die enterische Verdauung und die Emissionen aus Stall und Wirtschaftsdüngerlagerung werden die spezifischen Emissionsfaktoren der einzelnen Tiergruppen fortgeschrieben. Maßnahmen des Herdenmanagements könnten über die Verhältnisse adulter zu juvenilen Tieren abgebildet werden.

Landwirtschaftliche Böden

Über die Belegung der landwirtschaftlichen Nutzfläche mit den verschiedenen Ackerfrüchten und Grünlandnutzung wird der Stickstoffdüngereinsatz ermittelt. Dazu ist der Düngebedarf der einzelnen Kulturen aus der aktuellsten Fassung der Düngeverordnung hinterlegt. Wahlweise können auch andere Bedarfswerte übernommen werden. Aus dem Modul zur Nutztierhaltung wird der anfallende Wirtschaftsdünger auf Basis der Stickstoffexkretion der einzelnen Tierarten ermittelt. Der Stickstoffstrom über Biogassubstrate aus Energiepflanzen (z.B. Mais) wird über externe Vorgaben zur Bioenergie einbezogen. Je nach Stickstoffbedarf und verwendeten Anrechnungsregeln für organische Stickstoffdünger wird der verbleibende Bedarf mit mineralischem Stickstoff gedeckt. Die Emissionsfaktoren für die Wirtschaftsdüngerausbringung können technologiebezogen über den betrachteten Zeitraum verändert werden und so sich ändernde gesetzliche Vorgaben einbeziehen. Auf Ebene der Stickstoffflüsse kann die Gesamtbilanz als zentraler Umweltindikator ausgewiesen werden. Für die Ermittlung der direkten und indirekten Lachgasemissionen aus der landwirtschaftlichen Bodennutzung werden die Düngieranwendung (mineralische sowie tierische und pflanzliche Wirtschaftsdünger), Erntereste, die Bewirtschaftung organischer Böden, Klärschlammausbringung und Exkrememente aus der Weidehaltung berücksichtigt.

Energie

Das Modul für die energiebezogenen Emissionen umfasst die mobile (Binnen- und Außenwirtschaft) und die stationäre Energienutzung. Für den

stationären Bereich wird der Wärmeverbrauch von Gewächshäusern, Stallheizungen, Trocknungsanlagen und Sonstigem (beispielsweise landwirtschaftlicher Nutz- und Wohngebäude) berücksichtigt. Für den mobilen Bereich wird der Kraftstoffverbrauch des Landwirtschaftssektors, aber auch der Forstwirtschaft abgebildet. Das Untermodul „LaWiEnMod“ bildet die Entwicklung des Energieverbrauchs der Landwirtschaft ab. Als Inputdaten werden die Aktivitätsdaten aus der Landwirtschaftsmodellierung zu Grunde gelegt. Dazu zählen vor allem die Entwicklung der Tierzahlen und die Flächenbelegung (Ackerfrüchte, Ökolandbau, Biodiversitätsflächen). Zusätzlich können Maßnahmen zur Energieeffizienz und zum Brennstoffwechsel abgebildet werden. Hier werden für die Szenarien Annahmen zur Effizienz- und Energieeinsparung und der Wechsel auf regenerative Energieträger kombiniert. Mit Hilfe der im Inventar verwendeten Emissionsfaktoren werden aus dem resultierenden neuen Energiemix die Treibhausgasemissionen ermittelt.

Biomasse

In einem zusätzlichen Modellmodul wird außerdem das Potenzial von Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung in der Landwirtschaft gemäß den Annahmen des Szenarios hochgerechnet. Dabei werden Reststoffpotenziale (Gülle, Erntereste/Stroh) ebenso wie mögliche Flächennutzungen betrachtet (Kurzumtriebsplantagen (KUP), annuelle Kulturen als Kosubstrate auf Ackerland, Paludikulturen auf wiedervernässten Moorstandorten). Zusätzlich werden in diesem Teilmodul auch die Biomassepotenziale der Forstwirtschaft und der Abfallwirtschaft (aus *Waste Mod*) zusammengefasst, so dass das gesamte Bioenergiepotenzial aus Reststoffen, Forst- und Anbaubiomasse eines Szenarios zentral für feste und flüssige Bioenergie sowie Biogas ausgewiesen werden kann.

8.1.6 LULUCF-Modell FABio-Land

Die Flächenentwicklungen im LULUCF (*Land Use, Land Use Change, and Forestry*)-Sektor sowie Emissionsquellen und -senken werden mit dem

LULUCF-Modell FABio-Land⁵⁴ des Öko-Instituts modelliert. In FABio-Land sind alle Landnutzungskategorien abgebildet, die in der deutschen Berichterstattung berücksichtigt sind: Wald, Ackerland, Grünland, Gehölze (Hecken und andere), terrestrische Feuchtgebiete, Gewässer, Torfabbau, Siedlung und sonstige Flächen. Die Flächen werden nach mineralischen und organischen Böden⁵⁵ sowie neuen Flächen (Übergangszeit 20 Jahre) und bestehenden Flächen (älter als 20 Jahre) differenziert. Je Flächentyp werden Veränderungen der Kohlenstoffpools wie lebende Biomasse, Streu und Totholz sowie Bodenkohlenstoff ausgewiesen. Nimmt ein Kohlenstoffpool beispielsweise durch Holzernte im Wald ab, gilt dies als CO₂-Freisetzung und wird als Quelle bezeichnet. Nimmt ein Kohlenstoffpool beispielsweise durch das Wachstum von Bäumen im Wald zu, wird CO₂ eingebunden und es liegt eine Senke vor. Zudem können Methan- und Lachgasemissionen auftreten. Außerdem ist in FABio-Land die Flächenkategorie „Wiedervernässte Moorstandorte“ aufgenommen. Hier können für Acker- und Grünland auf organischen Böden und für Torfabbauflächen unterschiedliche Vernässungsintensitäten über Wasserstufen (mäßig feuchtes Moorgrünland (WS 2) bis nasses Moorgrünland (WS 5)) sowie die Nutzungsform (beispielsweise Paludikultur) eingestellt werden. Als weitere Kategorie werden langlebige Holzprodukte ausgewiesen.

Als Ausgangspunkt wird die historische Entwicklung der Flächennutzung (Flächenänderungskoeffizienten) und der zugehörigen Emissionen je Flächenkategorie (Emissionsfaktoren) in Deutschland fortgeschrieben (Mittelwert der letzten fünf Jahre). Berechnungen in FABio-Land erfolgen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr und reichen bis zum Jahr 2050. Um die Auswirkung von Maßnahmen in Szenarien zu modellieren, können auf dieser Basis durch ein Steuerungsmodul die Flächenänderungen einzelner Flächenkategorien angesteuert werden (beispielsweise Umbruchverbot für Grünland, anteilige Wiedervernässung von Ackerland

⁵⁴ FABio = Forestry and Agriculture Biomass Model.

⁵⁵ Im LULUCF-Sektor wird unterschieden zwischen organischen Böden (Moore, Moorfolgeböden, Anmoore) und mineralischen Böden.

auf organischen Böden). Zudem besteht die Möglichkeit, Emissionsfaktoren über die Zeitachse zu verändern. Emissionsfaktoren für die Waldfläche und für langlebige Produkte werden nicht direkt in FABio-Land modelliert, sondern können über eine Schnittstelle als Ergebnisse aus externen Modellen eingelesen werden. Aktuell werden so Ergebnisse aus den WEHAM-Szenarien des Thünen-Instituts und aus FABio-Forest in die LULUCF-Modellierung integriert und können für Szenarien ausgewählt werden. Eine zweite Schnittstelle übergibt Daten zur Flächenentwicklung von Ackerland, Grünland und vernässten Flächen an das Agrarmodell LiSE, um so eine Konsistenz zwischen den beiden Modellen zu gewährleisten.

Als wichtigste Ausgabeparameter von FABio-Land sind zu nennen: Flächenkulisse und Flächenänderungen (Hektar je Flächenkategorie), Treibhausgasemissionen (Mio. t CO₂-Äq je Flächenkategorie) und die Abschätzung der Kosten für Maßnahmen zur Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten Mooren, Extensivierung der Waldbewirtschaftung und der Reduktion des Torfabbaus.

8.1.7 Abfallmodell Waste Mod

Waste Mod ist ein modulares Abfallmodell, welches auf Basis von drei Modulen die Emissionen aus nicht-energiebedingten Emissionen des Abfallsektors (CRF-Kategorie 5) abbildet. Die drei Module des Modells bilden die relevanten Quellkategorien der Abfall- und der Abwasserbehandlung ab.

Das erste Modul berechnet die Emissionen aus der Deponierung basierend auf dem vom IPCC entwickelten und vom Öko-Institut erweiterten Multi-Phasen-Abfallmodell (Emissionen der Deponierung, Quellgruppe 5.A). In ihm werden die statistischen Daten der aktuellsten Emissionsberichterstattung als Rahmendaten eingesetzt und die Treibhausgasemissionen aus den Deponien berechnet. Die aktuelle Situation der Altdeponien wird auf der Basis der in der Vergangenheit erfolgten Ablagerungen von Abfällen sowie von deren Zusammensetzung und Potenzial zur Bildung von

Treibhausgasemissionen ebenso berücksichtigt wie der Stand der Umsetzung der Abfälle und die bisher schon erfolgten Emissionen. Neben den Altdeponien werden auch die Emissionen aus der Deponierung von Rückständen aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) einbezogen. Zusätzlich können die Minderungswirkungen der Maßnahmen zur Deponiebelüftung berücksichtigt werden.

Im zweiten Modul werden die Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung berechnet. Die Daten zu Emissionen aus Bioabfallbehandlungsanlagen und mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen werden in Bezug zum Anlagendurchsatz berechnet. Hierzu werden die aktuellen Daten zur Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes und aktuelle Studien zur Anlagentechnik ausgewertet. Die Entwicklung des Anlagendurchsatzes erfolgt in Abhängigkeit von umgesetzten oder geplanten Maßnahmen zur getrennten Erfassung und Verwertung von Abfällen im Rahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, wird aber auch beeinflusst von Maßnahmen des Klimaschutzplans zur Reduktion von Lebensmittelabfällen.

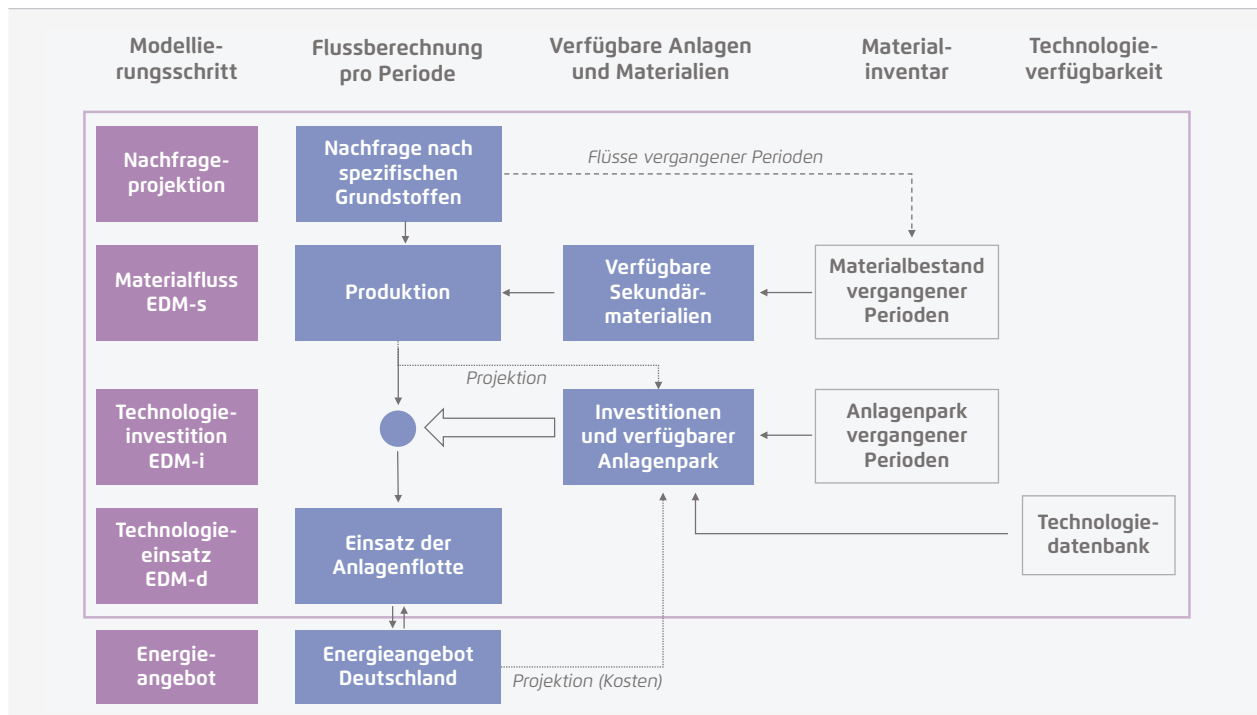
Im dritten Modul werden für die Unterquellgruppen kommunale und industrielle Abwasserbehandlung (5.D) und andere (5.E) einwohnerspezifische Rahmendaten eingesetzt und die Emissionsfaktoren aus dem aktuellen Inventarbericht entsprechend der Annahmen zur Entwicklung der Stickstoffgehalte im Abwasser und dem Anschlussgrad an die öffentliche Kanalisation fortgeschrieben.

8.1.8 Modellierung der Industrie

Die Modellierung der Industrie erfolgte durch das Wuppertal Institut und die Universität Kassel für die einzelnen Branchen in unterschiedlicher Weise und wie im Folgenden dargestellt. Der Strombedarf für Beleuchtung, Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und mechanische Energie in den nicht-energieintensiven Branchen sowie die Fertigung neuer Fahrzeugbatterien in Deutschland wurde durch Prognos modelliert.

Übersicht über den EDM-Modellverbund für Stahl- und Petrochemie

→ Abb. A3



Schneider (2023), adaptiert

Beschreibung der Modellierung für die Stahl- und petrochemische Industrie im Verbund des WISEE EDM⁵⁶-Modell-Frameworks

Die Modellierung der Stahl- und petrochemischen Industrie erfolgte besonders detailliert, da beide Sektoren hinsichtlich ihrer klima- und energiepolitischen Bedeutung, ihrer Einbindung in internationale Produktionssysteme und ihrer Rolle für zentrale Wertschöpfungsketten (beispielsweise im Bauwesen, der Automobilindustrie und dem Maschinenbau) von großer Relevanz sind. Im Modell wurden die Investitionen in deutsche Produktionsanlagen, die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen sowie der energie- und emissionsbezogene Einsatz dieser Anlagen mehrstufig abgeleitet.

Abbildung A3: Übersicht über den EDM-Modellverbund für Stahl und Petrochemie [Quelle: Schneider 2023⁵⁷, adaptiert].

Die Ausgangsbasis für die Projektion ist die inländische und europäische Nachfrage nach spezifischen Polymeren und Stählen verschiedener Gütegrade, die in nachgelagerten Sektoren weiterverarbeitet werden. Diese Nachfrage wurde aus bestehenden Szenarien abgeleitet. Die Nachfrage in Deutschland wurde für die kurze Frist an die von Prognos ermittelten Bruttowertschöpfungsdaten angepasst. Die kurzfristige Nachfrageentwicklung ist somit stark von konjunkturellen Effekten bestimmt, während die längerfristige Nachfrageentwicklung von strukturellen Änderungen und Materialeffizienzgesichtspunkten

⁵⁶ WISEE EDM steht für Wuppertal Institute System Model Architecture for Energy and Emission Scenarios – Energy Demand Model

⁵⁷ Schneider, C. (2023): Interaction between defossilisation of basic industries and relocation: Scenario-based explorative and normative transition pathways to electrification for European basic industries and specific clusters. [Doctoral Thesis (compilation), Environmental and Energy Systems Studies]. Department of Technology and Society, Lund University. Available at: lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/160444444/Thesis_Clemens_Schneider_without_papers.pdf

dominiert wird. Die so bestimmten jahresscharfen Nachfragemengen wurden in ein Materialflussmodell (**EDM-s**) eingebunden, das die Lebensdauer und Nutzung der Produkte simuliert, Importe und Exporte berücksichtigt und so die inländischen Produktionsmengen sowie die verfügbaren Sekundärmaterialien wie Kunststoffabfälle und Stahlschrott berechnet. Die Eignung dieser Abfälle für Recyclingverfahren hängt stark von ihrem Herkunftsbereich und ihrem Verschmutzungsgrad ab.

Im standortscharfen Modell **EDM-i** (Technologieinvestitionsmodell) werden mittels einer Kostenoptimierung Investitionen in den Anlagenpark, die erforderlich sind, um die Nachfrage nach Endprodukten zu decken, sowie der Einsatz unterschiedlicher Energieträger an spezifischen Standorten ermittelt. Hierfür werden Sekundärmaterialien gemäß ihrer Verfügbarkeit (vergleiche EDM-s) genutzt, um den Bedarf an Primärrohstoffen zu reduzieren, wobei Qualitätsanforderungen an bestimmte Stahlgüten oder die Geeignetheit unterschiedlicher chemischer Recyclingverfahren für Kunststoffabfallströme berücksichtigt werden. Das Modell berücksichtigt zudem die vorhandene Anlagenausstattung (Assets) eines Standorts und mögliche Verbundvorteile durch die Nutzung von Kuppelprodukten wie Hüttengasen oder Beiprodukten von Steamcrackern. Da das EDM-i die europäische Stahl- bzw. petrochemische Industrie abbildet und im Sinne eines Produktionsnetzwerks erlaubt, Zwischenprodukte zwischen Standorten zu transportieren, werden auch die Handelsströme innerhalb Europas simultan unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert. Das EDM-i-Modell liefert somit zentrale Projektergebnisse zu den notwendigen Reinvestitionen sowie Investitionen in neue Anlagen und Technologien an deutschen Standorten der Stahl- und petrochemischen Industrie einschließlich der Auslastung dieser Anlagen und des damit verbundenen Energie- und Rohstoffbedarfs.

Da die Petrochemie in größere Industriekomplexe integriert und nur ein Teil der chemischen Industrie ist, wurden die Ergebnisse des EDM-i für die petrochemische Industrie im Modell EDM-d (Technologieeinsatzmodell, siehe unten) weiterverarbeitet. Dieses Modell umfasst zusätzliche Produkte und

Produktionsmengen, die im EDM-i nicht berücksichtigt sind, und bildet so ein vollständigeres Bild des petrochemischen Sektors ab.

Beschreibung der Modellierung weiterer energieintensiver Branchen im EDM-d

Im Modell **EDM-d** werden Energiebedarf und CO₂-Emissionen der industriellen Produktion auf der Grundlage der (angenommenen) physischen Produktion von Gütern sowie der eingesetzten Produktionstechnologie und Energieträger berechnet. Aggregierte Werte – wie beispielsweise die CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie – werden im Modell dabei aus den Eigenschaften und dem Betrieb der einzelnen, im Modell erfassten industriellen Anlagen errechnet. Die den Berechnungen zugrunde liegende Datenbank umfasst circa 800 Produktionsstandorte in Europa und circa 200 Technologien (beispielsweise Hochofen, Steamcracker, Drehrohrofen) mit ihrem jeweiligen spezifischen Energiebedarf, prozessbedingten Emissionen, ausgewählten Stoffeinträgen und typischen technischen Laufzeiten sowie mehr als 2.600 industrielle Produktionsanlagen. Bei besonders energieintensiven Anlagen ist auch das Baujahr hinterlegt, wodurch sich die Reinvestitionszyklen abschätzen lassen. Der zukünftige Einsatz von Technologien und Energieträgern erfolgt Szenariogetrieben und regelbasiert.

Folgende Branchen wurden im Rahmen der Erstellung des Szenarios (ausschließlich) mit dem EDM-d modelliert:

- Zementklinker- und Zementherstellung;
- Herstellung von Branntkalk;
- Herstellung unterschiedlicher Glasarten;
- Herstellung von Nicht-Eisen-Metallen;
- Gießereien;
- Herstellung von Zellstoff, Papier und Pappe.

Die Produktionsvolumina wurden auch in diesem Fall aus den wirtschaftlichen Rahmendaten und den zwischen den Partnern abgestimmten Daten zu zentralen Treibern wie der Bautätigkeit abgeleitet. Aber auch die Konsistenz der Produktionsdaten untereinander ist durch ein intensives Monitoring

der Abhängigkeiten gewährleistet, so etwa beim Hüttensandaufkommen oder beim Kalkeinsatz in der Stahlindustrie oder in Kohlekraftwerken. Für die Zement- und Zementklinkerbedarfe wurde zudem eine umfangreiche quantifizierte Betrachtung von Minderungshebeln im Betonbau sowie bei der Zementherstellung (Herleitung eines Zementportfolios pro Stichjahr) durchgeführt.

Die Verfügbarkeit von Wasserstoff über den Anschluss an das sogenannte Kernnetz sowie der Zugang zu einer CO₂-Infrastruktur gehen dabei als zentrale Rahmenbedingungen in die Modellierung ein und sorgen für eine regelbasierte Substitution

fossiler Energieträger. Somit können Energiebedarfe und CO₂-Einspeisungen in das Netz auf Basis lokaler Gegebenheiten ermittelt werden.

Nicht-energieintensive Industrie

Der Wärme- und Kältebedarf der weniger energieintensiven Branchen wurde auf Basis historischer Zeitreihen ökonometrisch unter Berücksichtigung des jeweiligen Temperaturprofils fortgeschrieben. Für die Temperaturbereiche wurden für die heute eingesetzten Energieträger jeweils idealtypische Technologien angenommen und deren Ersatz über die Zeit modelliert.

8.2 Kennzahlen

Übergreifende Kennzahlen

→ Tabelle A1

Kategorie	Indikator	Statistik	KND-Umsetzung		KND 2021	
		2023 ¹	2030	2045	2030	2045
Rahmendaten	Bevölkerung [Mio] (2022)	84	85	85	83	80
	BIP [Mrd Euro ₂₀₁₅]	3.262	3.534	4.155	4.030 ²	4.861 ²
	ETS-I-Preise [Euro ₂₀₂₂ /tCO ₂]	81	132	194	52 ²	80 ²
	ETS-II-Preise/BEHG [Euro ₂₀₂₂ /tCO ₂]	30	124	188	n/a	n/a
	Rohöl [Euro ₂₀₂₂ /Barrel]	96	69	66	62 ²	57 ²
	Erdgas [Euro ₂₀₂₂ /MWh(Hs)]	76	28	20	20 ²	22 ²
	Steinkohle [Euro ₂₀₂₂ /MWh(Hs)]	37	12	9	8 ²	8 ²
	Wasserstoffpreis – grün [Euro ₂₀₂₂ /MWh(Hs)]	n/a	125	100	138	n/a
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq] ³	Gesamt ⁴	674	433	-31 (40)	438	-2
	Energiewirtschaft	205	98	-3,3 (2,4)	98	-18
	Industrie	155	115 (117)	-19 (11)	123	-30
	Gebäude	102	72	0,8	65	3
	Verkehr	146	89	0,6	89	0
	Landwirtschaft	60	57	23,3	58	41
	Abfall	5,5	3,0	1,9	5	2
	LULUCF	3,6	-11	-35	2	-11
Wasserstoff	Wasserstoffnachfrage [TWh Hi]	0	45	268	63	265
	Inländische Wasserstoffproduktion [TWh Hi]	0	29 ⁵	84	19	96
	Import Wasserstoff [TWh Hi]	0	16	184	44	169
Biomasse	Biomasseangebot [TWh Hi]	286 ⁶	281	294	317 ⁷	346 ⁷
	Biomassenachfrage [TWh Hi]	330 ⁶	329	327	335 ⁷	345 ⁷
Fossiles CCS	Fossiles CO ₂ , Abfall [Mt]	0	0	3,4	1	16
	Prozessbedingtes, fossiles CO ₂ , Industrie [Mt]	0	1,9	16,8		
	Fossiles CO ₂ , Raffinerien	0	0	1,7	n/a	n/a
	Energiebedingtes fossiles CO ₂ , Industrie [Mt]	0	0,6	2,6	n/a	n/a
CCS für Negativemissionen	Biogenes CO ₂ , Abfall [Mt]	0	0	-3,2	n/a	n/a
	Biogenes CO ₂ , Industrie, BECCS [Mt]	0	-0,4	-14,4	0	-37
	Atmosphärisches CO ₂ , DACCS [Mt]	0	0	-2,5	0	-20
Stoffliche Bindung	von Kohlenstoff aus biogenem Feedstock für Polymere [Mt CO ₂ -Äq]	0	0	-16,1	0	-7

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel. ¹ Abweichende Startjahre wurden gewählt, wenn die 2023-Statistik noch nicht verfügbar war und sind in Klammern angegeben. ² In EUR₂₀₁₉. ³ Werte in Klammern ohne CCS und Negativemissionen. ⁴ 2023, 2030: ohne LULUCF gemäß § 3 (1) KSG, 2045: mit LULUCF gemäß §3(2) KSG. ⁵ Davon 11 TWh grüner Wasserstoff. ⁶ Datenstand 2020. ⁷ Nur energetisch genutzte Biomasse.

Kennzahlen Energiewirtschaft

→ Tabelle A2

Indikator		Statistik	KND-Umsetzung		KND 2021	
		2023	2030	2045	2030	2045
Bruttostromverbrauch [TWh]						
Gesamt		525	727	1.267	643	1.017
Verkehr		15,3	95	221	74	175
Davon ePKW ¹		7	43	98	n/a	n/a
Industrie		187	270	448	214	317
Gebäude ²		255	270	302	267	245
davon Wärmepumpen ¹		12	41	85	n/a	n/a
Elektrolyseure (H ₂) ¹		0	16	119	30	150
Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch [%]		52	76	100	69	100
Installierte Leistung [GW]	Wind Onshore	61	98	180	80	145
	Wind Offshore	8	26	73	25	70
	Photovoltaik	82	215	469	150	385
	Großspeicher ³	7	30	102	9	59
	Regelbare Erzeugung	83	65	72	66	80
Nettostromerzeugung [TWh]						
Gesamt		489	709	1.241	1.246	2.006
Windkraft und Photovoltaik ⁴		199	486	1.066	380	916
Regelbare Erzeugung ^{4,5}		284	211	115	n/a	n/a
davon Kohlen		116	7	0	14	0
davon Erdgas		75	124	0	135	0
davon Wasserstoff und Synfuels		0	0	71	9 ⁶	60 ⁶
Stromhandel mit Ausland [TWh]						
Importsaldo		12	9	21	17	22
Exporte		59	90	91	n/a	n/a
Importe		70	98	112	n/a	n/a
Nah- und Fernwärmeerzeugung						
Gesamt [TWh]		119	141	169	149	164
davon erneuerbare Energien und Abwärme [%]		18	38	97	45	98
Emissionen						
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq] ⁷		205	98	-3,3 (2,4)	98	-18
KSG-Ziel ⁸		n/a	108	n/a	n/a	n/a

Prognos. ¹Weitgehend flexibel. ²Einschließlich landwirtschaftlicher Energieverbrauch. ³Inklusive Pumpspeicher und Vehicle to Grid, exklusive Heimspeicher. ⁴Differenz zu Gesamterzeugung: Ausspeicherung aus Großspeichern. ⁵Brennstoffbasierte Kraftwerke (Kohle, Erdgas, H₂, Synfuels, Abfall, Bioenergie, Sonstige) und Laufwasserkraftwerke. Differenz zu Gesamterzeugung: Ausspeicherung aus Großspeichern. ⁶Nur Wasserstoff. ⁷Werte in Klammern ohne CCS und Negativemissionen. ⁸Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6)

Kennzahlen Industrie

→ Tabelle A3

Indikator	Statistik	KND-Umsetzung		KND 2021	
	2022	2030	2045	2030	2045
Industrie gesamt					
Endenergieverbrauch [TWh] ¹	665	671	617	630	599
Stromanteil Endenergieverbrauch [%]	30	40	73	34	52
H ₂ ² [TWh]	14	25	103	40	74
Biomasse ² [TWh]	19	24	113	45	171
CCS [Mio. tCO ₂]	0	3	34	n/a	n/a
Stahl					
Sekundärstahl-Anteil [%]	40	50	54	39	46
DRI-Einsatz [% Stahl]	3	22	46	26	54
H ₂ -Anteil DRI [%]	0	76	75	n/a	n/a
Chemie					
Methanol-Route [% HVC ³]	0	0	53	n/a	n/a
Abfall als Rohstoff für Kunststoffe [% Feedstock energetisch]	6	19	36	n/a	n/a
Biomasse stofflich [% Feedstock energetisch]	0	1	44	n/a	n/a
(Bio-)CCS [Mio. t CO ₂]	0	0	15	n/a	n/a
Zement					
Bautätigkeit [2022=100]	100	82	94	n/a	n/a
Klinkerprod. [Mio t.]	23	16	13	n/a	n/a
CCS [Mio. t CO ₂]	0	2	10	n/a	n/a
Nicht energieintensive Industrie					
Stromanteil EEV [%]	44	57	95	n/a	n/a
Wärmepumpen [GW _{th}]	1	9	28	n/a	n/a
(BE)CCS Kalk [Mt CO ₂] ⁴	0	1	5	n/a	n/a
Emissionen					
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq] ⁵	168	115 (118)	-19 (31)	123	-30
KSG-Ziel ⁶	n/a	122	n/a	n/a	n/a

Prognos, Wuppertal Institut und Universität Kassel ¹ Gemäß AGE-Abgrenzung. ² Inklusive stofflicher Nutzung in der Chemieindustrie. ³ High Value Chemicals. ⁴ Prozess- und energiebedingte Emissionen. ⁵ Werte in Klammern ohne CCS und Negativemissionen. ⁶ Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6).

Kennzahlen Gebäudesektor

→ Tabelle A4

Indikator	Statistik	KND-Umsetzung		KND 2021	
	2023	2030	2045	2030	2045
Bevölkerung und Wohnungen					
Bevölkerung [Mio.]	84,4	85,1	84,5	83	80
Erwerbstätige, Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen [Mio.]	39,3	38,6	37,7	34,8	32,9
Wohnungen [Mio.]	43,4	44,1	45,1	44,3	45,0
Heizungsinfrastruktur					
Wärmepumpen [Mio.]	1,7	6	15,7	6	14
Nah- und Fernwärme – versorgte Gebäudefläche [Mio. m ² Gebäudenutzfläche]	723	950	1847	n/a	n/a
Gebäudesanierung					
Sanierungsrate (Vollsanierungsäquivalente) [%] ¹	1,1	1,6	1,5	1,6/1,8/1,6 ²	1,6/1,8/1,9 ²
Spezifischer Verbrauch Raumwärme und Warmwasser für ...	Gebäudebestand (kWh/m ²)	120	103	79	n/a
	Wohngebäude	133	111	85	85 ³
	Nichtwohngebäude	86	81	62	n/a
Energieverbrauch					
Endenergieverbrauch [TWh]	943	863	700	823	639
Stromverbrauch [TWh]	252	263	283	259	235
Stromverbrauch Wärmepumpen [TWh]	12	41	85	n/a	n/a
Emissionen					
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq]	102	72	0,8	65	3
KSG-Ziel ⁴	n/a	66	n/a	n/a	n/a

Prognos ¹Die Sanierungsrate 2023 ergibt sich als modellbasierte Fortschreibung einer umfassenden Erhebung von IWU (2018). Jüngere Erhebungen kommen teils zu anderen Ergebnissen, so BuVEG (2023) mit 0,8 Prozent. Einen ähnlichen Wert weist jedoch Ariadne (2024) mit gut 1,0 Prozent für selbstnutzende Eigentümer aus. ²Ein- und Zweifamilienhäuser / Mehrfamilienhäuser / Nichtwohngebäude. ³Gesamter Nutzenergiebedarf. ⁴Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6)

Kennzahlen Verkehr

→ Tabelle A5

Indikator	Statistik	KND2024		Vergleich mit KND2021 (netto)	
	2023	2030	2045	2030	2045
Personenverkehr					
Bestand vollelektrischer Pkw [Mio.]	1,2 ¹	12,6	37,8	9	33,9
Neuzulassungsanteil batterieelektrische Pkw [%]	18	83	100	53	100
Bestand Plug-in-Hybride [Mio.]	0,9 ¹	2,5	1	4,9	2
Gesamtbestand Pkw [Mio.]	49	47,9	40,2	49,3	37,2
Verkehrsleistung MIV [Mrd. Pkm]	917 ²	845	749	833	694
Verkehrsleistung Schienenpersonenverkehr [Mrd. Pkm]	102 ²	158	235	191	264
Modal Split MIV [% an Pkm]	77 ²	68	59	68	58
Verkehrsleistung öffentlicher Straßenverkehr [Mrd. Pkm]	79 ²	122	149	92	122
Verkehrsleistung Fuß/Fahrrad [Mrd. Pkm]	76 ²	107	144	91	110
Güterverkehr					
Bestand schwerer Lkw mit vollelektrischem Antrieb [Tsd.]	0 ¹	121	541	77	483
Modal Split Schienengüterverkehr [% an Tkm]	19 ²	23	23	25	26
Verkehrsleistung Schienengüterverkehr [Mrd. Tkm]	130 ²	177	182	190	220
Neuzulassungsanteil schwerer Lkw mit vollelektrischem Antrieb [%]	1	71	100	63	100
Anteil elektrische Fahrleistung am Straßengüterverkehr [%]	0	33	100	25	100
Energieverbrauch					
Endenergienachfrage insgesamt [TWh]	596 ³	469	276	445	231
Fossile Endenergienachfrage [TWh]	547 ³	326	0,2	330	0
Endenergienachfrage Biokraftstoffe [TWh]	33 ³	30	0,3	36	0
Stromnachfrage [TWh]	16 ³	95	221	74	175
Endenergienachfrage H ₂ [TWh]	0 ³	13	32	4	39
Endenergienachfrage PtL [TWh]	0 ³	6	22	1	17
Emissionen					
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq]	147 ³	89	0	89	0
KSG-Ziel ⁴	n/a	82	n/a	n/a	n/a

Agora Verkehrswende und Öko-Institut. ¹ Alle Zahlen zum Bestand mit Stichtag 1.7. ² Datenstand 2019, um keine temporären Pandemie-Effekte auf die Verkehrsleistung abzubilden. ³ Datenstand 2022. ⁴ Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6)

Kennzahlen Landwirtschaft

→ Tabelle A6

Indikator	Statistik	KND-Umsetzung		KND 2021	
	2021	2030	2045	2030	2045
Tierbestände					
Milchkühe und sonstige Rinder [Mio. Großvieheinheiten]	7,91	7,42	4,51	5.5 ¹	5.2 ¹
Schweine und Geflügel [Mio. Großvieheinheiten]	3,08	2,62	1,62	3,2	3,1
Weitere Indikatoren					
Stickstoffüberschüsse/ha. gegenüber 2020 [%]		-15	-51	n/a	n/a
Bioenergie und Feedstocks für stoffliche Nutzung aus der Landwirtschaft [TWh]	76	88	120	n/a	n/a
Energieverbrauch in der Landwirtschaft [TWh]	36	34	26	n/a	n/a
Neue Gehölze auf der landwirtschaftlichen Fläche [Mio. ha]	0	0,20	1,68	n/a	n/a
Emissionen					
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq]	62,5	57	23	58	41
KSG-Ziel ²	n/a	58	n/a	n/a	n/a

Öko-Institut ¹ Mio. Stück. ² basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6).

Kennzahlen LULUCF

→ Tabelle A7

Indikator	Statistik	KND-Umsetzung		KND 2021	
	2021	2030	2045	2030	2045
Moorbodenschutz					
Anteil wiedervernässter Moorböden (heute Grünlandnutzung; voll- und teilvernässt) [%]	0	27,7	93,6	n/a	n/a
Anteil wiedervernässter Moorböden (heute Ackernutzung; voll- und teilvernässt) [%]	0	3,6	94,1	n/a	n/a
Reduktion der Torfabbaufäche [%]	0	50	100	n/a	n/a
Optimierung der Wasserstände in bestehenden Feuchtgebieten [%]	0	80	100	n/a	n/a
Wald und Holz					
Neue Gehölze auf der landwirtschaftlichen Fläche [1000 ha]	0	195	1680	n/a	n/a
Waldmehrung (Anlage/Trend) [1000 ha]	0	A: 41 T: 94	A: 128 T: 172	n/a	n/a
Verringerung der Laubholzentnahme [Mio. m ³]	0	3	7	n/a	n/a
Erneuerbare Energien					
Neu geschaffene Solar-Freiflächenanlagen (inklusive Agri-PV) [1000 ha]	0	51	144	n/a	n/a
Emissionen					
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq] ¹	3,6	-11	-35	2	-11
KSG-Ziel ²	n/a	-25	-40	n/a	n/a

Öko-Institut ¹ Basisjahr 2023. ² Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6).

Kennzahlen Abfallwirtschaft

→ Tabelle A8

Indikator	Statistik	KND -Umsetzung		KND 2021	
	2021	2030	2045	2030	2045
Bioabfälle					
Vergärung [Mio. t]	5,5	6,1	3,2	n/a	n/a
Kompostierung [Mio. t]	9,1	7,9	7,5	n/a	n/a
Reduktion der Lebensmittelabfälle ggü. 2021 [%]		-0,19	-0,5	n/a	n/a
Bioenergie					
Biogas aus dem Abfallsektor [PJ]	57,9	58,4	63,7	n/a	n/a
Deponierung					
Einsparung aus Deponiebelüftung ggü. ohne Belüftung		-0,19	-0,57	n/a	n/a
Gaserfassung [% CH ₄ -Emissionen]	0,5	0,59	0,62	n/a	n/a
Emissionen					
THG-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq]	4,5	3	1,9	4,8	2,1
KSG-Ziel*	n/a	5	n/a	n/a	n/a

Öko-Institut, basierend auf Umweltbundesamt (2023). *Basierend auf den gemäß § 5 Abs. 5 i.V.m. Anlage 2a KSG angepassten Jahresemissionsmengen (Stand: 29.09.2024) (ERK 2024a, Tabelle 6)

Publikationen von Agora Energiewende

Auf Deutsch

Investitionen für ein Klimaneutrales Deutschland

Finanzbedarfe und Politikoptionen

Klimaneutrales Deutschland

Von der Zielsetzung zur Umsetzung

Wärmenetze: klimaneutral, wirtschaftlich und bezahlbar

Wie kann ein zukunftssicherer Business Case aussehen?

Meer-Wind für Klimaneutralität

Herausforderungen und notwendige Maßnahmen beim Ausbau der Windenergie auf See in Deutschland und Europa

Serielle Sanierung

Effektiver Klimaschutz in Gebäuden und neue Potenziale für die Bauwirtschaft

Wasserstoffimporte Deutschlands

Welchen Beitrag können Pipelineimporte in den 2030er Jahren leisten?

Der Sanierungssprint

Potenzial und Politikinstrumente für einen innovativen Ansatz zur Gebäudesanierung

Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2023

Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2024

Haushaltsnahe Flexibilitäten nutzen

Wie Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen und Co. die Stromkosten für alle senken können

Der CO₂-Preis für Gebäude und Verkehr

Ein Konzept für den Übergang vom nationalen zum EU-Emissionshandel

Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland

Analyse mit einer Vertiefung zu Synthetischem Erdgas (SNG) bei nahezu geschlossenem Kohlenstoffkreislauf

Windstrom nutzen statt abregeln

Ein Vorschlag zur zeitlichen und regionalen Differenzierung der Netzentgelte

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-energiewende.de

Publikationen von Agora Energiewende

Auf Englisch

Climate-neutral Germany (Executive Summary)

From target-setting to implementation

Enabling a just coal transition in Kazakhstan

Opportunities, challenges and strategic pathways

Investing in the Green Deal

How to increase the impact and ensure continuity of EU climate funding

EU climate policy between economic opportunities and fiscal risks

Assessing the macroeconomic impacts of Europe's transition to climate neutrality

Low-carbon hydrogen in the EU

Towards a robust EU definition in view of costs, trade and climate protection

9 Insights on Hydrogen – Southeast Asia Edition

12 Insights on Hydrogen – Brazil Edition

The benefits of energy flexibility at home

Leveraging the use of electric vehicles, heat pumps and other forms of demand-side response at the household level

EU policies for climate neutrality in the decisive decade

20 Initiatives to advance solidarity, competitiveness and sovereignty

Modernising Kazakhstan's coal-dependent power sector through renewables

Challenges, solutions and scenarios up to 2030 and beyond

The roll-out of large-scale heat pumps in Germany

Strategies for the market ramp-up in district heating and industry

Transitioning away from coal in Indonesia, Vietnam and the Philippines

Overview of the coal sector with a focus on its economic relevance and policy framework

Hydrogen import options for Germany (Summary)

Analysis with an in-depth look at synthetic natural gas (SNG) with a nearly closed carbon cycle

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-energiewende.org

Publikationsdetails

Über Agora Think Tanks

Agora Energiewende, Agora Industrie, Agora Agrar und Agora Verkehrswende erarbeiten gemeinsam unter dem Dach der Agora Think Tanks wissenschaftlich fundierte und politisch umsetzbare Konzepte für einen erfolgreichen Weg zur Klimaneutralität – in Deutschland, Europa und international. Die Denkfabriken agieren unabhängig von wirtschaftlichen und parteipolitischen Interessen.

Agora Think Tanks

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2
10178 Berlin | Deutschland
T +49 (0) 30 7001435-000

www.agora-thinktanks.org
info@agora-thinktanks.org

Lektorat: Berit Sörensen

Satz: Theo Becker | Elser Druck GmbH

Titelfoto: Chris Gray | Unsplash

349/12-S-2024/DE

Version 1.4, August 2025



Unter diesem QR-Code steht
diese Publikation als PDF zum
Download zur Verfügung.



Dieses Werk ist lizenziert
unter CC-BY-NC-SA 4.0.