

Studie

Klimaneutrales Deutschland 2045

Wie Deutschland seine Klimaziele schon
vor 2050 erreichen kann



Im Auftrag von

Das Unternehmen im Überblick

Prognos – wir geben Orientierung.

Wer heute die richtigen Entscheidungen für morgen treffen will, benötigt gesicherte Grundlagen. Prognos liefert sie – unabhängig, wissenschaftlich fundiert und praxisnah. Seit 1959 erarbeiten wir Analysen für Unternehmen, Verbände, Stiftungen und öffentliche Auftraggeber. Nah an ihrer Seite verschaffen wir unseren Kunden den nötigen Gestaltungsspielraum für die Zukunft – durch Forschung, Beratung und Begleitung. Die bewährten Modelle der Prognos AG liefern die Basis für belastbare Prognosen und Szenarien. Mit rund 180 Experteninnen und Experten ist das Unternehmen an neun Standorten vertreten: Basel, Berlin, Bremen, Brüssel, Düsseldorf, Freiburg, Hamburg, München und Stuttgart. Die Projektteams arbeiten interdisziplinär, verbinden Theorie und Praxis, Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Unser Ziel ist stets das eine: Ihnen einen Vorsprung zu verschaffen, im Wissen, im Wettbewerb, in der Zeit.

Geschäftsführer

Christian Böllhoff

Rechtsform

Aktiengesellschaft nach schweizerischem Recht; Sitz der Gesellschaft: Basel
Handelsregisternummer
CH-270.3.003.262-6

Präsident des Verwaltungsrates

Dr. Jan Giller

Handelsregisternummer

Berlin HRB 87447 B

Gründungsjahr

1959

Umsatzsteuer-Identifikationsnummer

DE 122787052

Arbeitssprachen

Deutsch, Englisch, Französisch

Hauptsitz

Prognos AG

St. Alban-Vorstadt 24
4052 Basel | Schweiz
Tel.: +41 61 3273-310
Fax: +41 61 3273-300

Prognos AG

Résidence Palace, Block C
Rue de la Loi 155
1040 Brüssel | Belgien
Tel: +32 280 89-947

Prognos AG

Hermannstraße 13
(c/o WeWork)
20095 Hamburg | Deutschland
Tel.: +49 40 554 37 00-28

Weitere Standorte

Prognos AG

Goethestr. 85
10623 Berlin | Deutschland
Tel.: +49 30 5200 59-210
Fax: +49 30 5200 59-201

Prognos AG

Werdener Straße 4
40227 Düsseldorf | Deutschland
Tel.: +49 211 913 16-110
Fax: +49 211 913 16-141

Prognos AG

Nymphenburger Str. 14
80335 München | Deutschland
Tel.: +49 89 954 1586-710
Fax: +49 89 954 1586-719

Prognos AG

Domshof 21
28195 Bremen | Deutschland
Tel.: +49 421 845 16-410
Fax: +49 421 845 16-428

Prognos AG

Heinrich-von-Stephan-Str. 17
79100 Freiburg | Deutschland
Tel.: +49 761 766 1164-810
Fax: +49 761 766 1164-820

Prognos AG

Eberhardstr. 12
70173 Stuttgart | Deutschland
Tel.: +49 711 3209-610
Fax: +49 711 3209-609

info@prognos.com | www.prognos.com | www.twitter.com/prognos_ag

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
1 Zusammenfassung	1
2 Methodik und Rahmenannahmen	21
2.1 Zielsetzung der Studie	21
2.2 Treibhausgas-Emissionsminderungsziele	21
2.3 Methodik	21
2.4 Rahmendaten	25
3 Ergebnisse Szenario Klimaneutral 2045 (KN2045)	27
3.1 Energiewirtschaft	27
3.1.1 Zielbild und Ausgangslage	27
3.1.2 Stromnachfrage	29
3.1.3 Stromerzeugung	31
3.1.4 Installierte Leistung und Flexibilität des Stromsystems	33
3.1.5 Fernwärmeerzeugung	37
3.1.6 Mineralölraffinerien	38
3.2 Industrie	39
3.2.1 Zielbild und Ausgangslage	39
3.2.2 Entwicklung der Produktionsmengen	40
3.2.3 Energieeinsatz und Treibhausgasemissionen	42
3.2.4 Einblicke in die Transformation der Industriebranchen	45
3.3 Gebäude	55
3.3.1 Zielbild und Ausgangslage	55
3.3.2 Entwicklung der Gebäudeflächen	57
3.3.3 Effizienzentwicklung Gebäudehülle: energetische Sanierungen	58
3.3.4 Endenergieverbrauch und THG-Emissionen	64

3.4	Verkehr	67
3.4.1	Zielbild und Ausgangslage	67
3.4.2	Verkehrsnachfrage	69
3.4.3	Neuzulassungen und Bestand	73
3.4.4	Endenergiebedarf und THG-Emissionen	78
3.5	Landwirtschaft, Abfall und LULUCF	82
3.5.1	Landwirtschaft	83
3.5.2	Abfallsektor	91
3.5.3	LULUCF	93
3.6	Bioenergie	95
3.7	Negative CO ₂ -Emissionen und CCS	98
3.7.1	CO ₂ -Abscheidung	99
3.7.2	CO ₂ -Infrastruktur	100
3.7.3	Dauerhafte Speicherung von abgeschiedenem CO ₂	100
3.7.4	Negative Emissionen	102
3.8	Wasserstoff	103
3.9	Synthetische Energieträger	107
4	Literatur	110
	Impressum	116

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Abgrenzung der Sektoren erfolgt nach dem Klimaschutzplan	24
Tabelle 2:	Rahmendaten	25
Tabelle 3:	Beschreibung der Annahmen für die Landwirtschaft	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Maßnahmen im Szenario Klimaneutral 2045 (KN2045)	3
Abbildung 2:	Drei Schritte zur Klimaneutralität Schritt 1 – 65% Minderung bis 2030	4
Abbildung 3:	Überblick Entwicklung THG-Emissionen nach Sektoren	6
Abbildung 4:	Welche Maßnahmen führen zur schnelleren Klimaneutralität 2045?	7
Abbildung 5:	Umsetzungsgeschwindigkeit in den Szenarien KN2050 und KN2045	8
Abbildung 6:	Schritt 2 -95% Minderung ohne Negativemissionen	12
Abbildung 7:	Schritt 3 im Detail – residuale THG-Emissionen und deren Kompensation im Jahr 2045	13
Abbildung 8:	Primärenergieverbrauch	14
Abbildung 9:	Bruttostromverbrauch	16
Abbildung 10:	Nettostromerzeugung und Importsaldo	17
Abbildung 11:	Erneuerbare Energien	18
Abbildung 12:	CO ₂ -freie Wasserstoffherzeugung und -nutzung in Deutschland	19
Abbildung 13:	Wasserstoff- und Power-to-Liquid-Einsatz (PtL)	20
Abbildung 14:	Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft	28
Abbildung 15:	Umsetzungsgeschwindigkeit in der Energiewirtschaft in den Szenarien KN2050 und KN2045	29
Abbildung 16:	Bruttostromverbrauch	30
Abbildung 17:	Erneuerbare Energien	32
Abbildung 18:	Nettostromerzeugung und Importsaldo	33
Abbildung 19:	Flexibilitäten zur Leistungsabsicherung	35

Abbildung 20:	Flexibilität des Stromsystems 2045	36
Abbildung 21:	Fernwärmeerzeugung	37
Abbildung 22:	Umsetzungsgeschwindigkeit in der Industrie in den Szenarien KN2050 und KN2045	39
Abbildung 23:	Produktionsmengenentwicklung für energie- und kohlenstoffintensive Produkte	40
Abbildung 24:	Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Industrie	43
Abbildung 25:	Treibhausgasemissionen und Endenergieverbrauch in der Industrie	44
Abbildung 26:	Rohstahlproduktion nach Routen und Energieträgereinsatz* in der Eisen- und Stahlindustrie	46
Abbildung 27:	HVC-Produktion nach Routen und Feedstock-Einsatz	48
Abbildung 28:	Grundstoffchemie: Endenergieverbrauch und Primärenergieverbrauch im Jahr 2045	51
Abbildung 29:	Reduktion der Treibhausgase in der Zementindustrie	52
Abbildung 30:	Reduktion der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude	56
Abbildung 31:	Umsetzungsgeschwindigkeit im Gebäudesektor in den Szenarien KN2050 und KN2045	57
Abbildung 32:	Entwicklung der Gebäudefläche nach Gebäudetyp	58
Abbildung 33:	Entwicklung der Gebäudefläche nach Baustandard (energetische Qualität)	60
Abbildung 34:	Absatzstruktur Wärmeerzeuger (Raumwärme)	61
Abbildung 35:	Durchschnittliche jährliche Neuanschlüsse (Wohnungen in Tausend)	62
Abbildung 36:	Beheizungsstruktur Wohnfläche	63
Abbildung 37:	Beheizungsstruktur Gebäudefläche im GHD-Sektor	64
Abbildung 38:	Gebäudesektor: Endenergieverbrauch nach Energieträgern	65
Abbildung 39:	Gebäudesektor: Endenergieverbrauch für Wärme nach Energieträgern	66
Abbildung 40:	Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor nach Verwendungszwecken	67

Abbildung 41:	Umsetzungsgeschwindigkeit im Verkehrssektor in den Szenarien KN2050 und KN2045	69
Abbildung 42:	Entwicklung Personenverkehrsnachfrage	71
Abbildung 43:	Entwicklung Güterverkehrsnachfrage	72
Abbildung 44:	Entwicklung Neuzulassungen und Bestand Pkw	74
Abbildung 45:	Entwicklung Neuzulassungen und Bestand Last- und Sattelzüge im Szenario KN2045	76
Abbildung 46:	Entwicklung Neuzulassungen und Bestand Lkw im Szenario KN2045	77
Abbildung 47:	Entwicklung Neuzulassungen und Bestand der leichten Nutzfahrzeuge im Szenario KN2045	78
Abbildung 48:	Entwicklung Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen national nach Verkehrsträgern im Szenario KN2045	79
Abbildung 49:	Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehr im Szenario KN2045	80
Abbildung 50:	Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen inklusive der Nicht-CO ₂ -Effekte, internationaler Verkehr im Szenario KN2045	82
Abbildung 51:	Umsetzungsgeschwindigkeit in der Landwirtschaft und bei LULUCF in den Szenarien KN2050 und KN2045	82
Abbildung 52:	Entwicklung der gesamten Flächen und Entwicklung der Futterflächen*	88
Abbildung 53:	Stickstoffeinträge in die Böden	89
Abbildung 54:	Entwicklung der Tierbestände	90
Abbildung 55:	Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft	91
Abbildung 56:	Reduktion der Treibhausgasemissionen im Abfallsektor	93
Abbildung 57:	Emissionen im LULUCF-Sektor	94
Abbildung 58:	Inländisches Biomasse-Angebot für die energetische Nutzung	96
Abbildung 59:	Energetischer Biomasseeinsatz in den einzelnen Sektoren	98

Abbildung 60:	Residuale Treibhausgas-Emissionen und deren Kompensation im Jahr 2045	99
Abbildung 61:	Übersicht über den Endausbau der industriellen Wasserstoff-Versorgung in Deutschland*	104
Abbildung 62:	Treibhausgasfreie Wasserstoffnachfrage und Wasserstofferzeugung	105
Abbildung 63:	Treibhausgasfreie und -arme Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff	106
Abbildung 64:	Kosten von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff	107
Abbildung 65:	Einsatz von Wasserstoff und Power-to-Liquid (PtL)	108
Abbildung 66:	Exkurs Power-to-X	109

1 Zusammenfassung

Vorbemerkung zur Einordnung der Studie

Die im Jahr 2020 veröffentlichte Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ geht von dem durch den Bundestag beschlossenen Ziel aus und fragt, wie sich der Weg zur Klimaneutralität bis 2050 in einer ökonomisch tragfähigen Strategie beschreiben lässt. Klimaneutral bedeutet, dass die Treibhausgasemissionen in allen Bereichen vollständig oder fast vollständig vermieden und die Restemissionen durch negative Emissionen, also die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre und anschließende Ablagerung, ausgeglichen werden.

Mit dem neuen Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ beantworten wir die Frage, ob Treibhausgasneutralität schon 2045 möglich ist – und zwar mit „Ja“. Auch die vorliegende Studie beschreibt eine Strategie unter Wahrung von Investitionszyklen und ohne politisch verordnete Verhaltensänderungen. Die aktuelle Studie zeigt, dass auf Basis der bereits sehr anspruchsvollen Zielstellung einer 65-prozentigen Treibhausgasreduktion bis zum Jahr 2030 anschließend in allen Sektoren eine beschleunigte Transformation möglich und notwendig ist.

Das Erreichen der Klimaneutralität schon 2045 hatte zwei entscheidende Vorteile: Zum einen verringert das die insgesamt bis 2050 noch von Deutschland verursachten Emissionen und damit die Inanspruchnahme des globalen Emissionsbudgets um 900 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Zum anderen kann Deutschland als größter THG-Emittent und größte Volkswirtschaft Europas mit dem ambitionierten Hochfahren von Klimaschutztechnologien zum Leitmarkt und Exporteur dieser Technologien werden.

Um das Ziel der Klimaneutralität 2045 zu erreichen, werden insbesondere noch vorhandene Beschleunigungspotenziale genutzt. Maßnahmen werden schneller umgesetzt, zum Beispiel im Bereich der Wasserstoffwirtschaft, dem Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Verkehrs- und Agrarwende sowie dem Einsatz der CO₂-Abscheidung und der Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre. Insgesamt werden Klimaschutztechnologien, die sich bereits im Markt befinden oder bis 2030 im Markt angelaufen sind, anschließend schneller hochgefahren. Das beschriebene Szenario mit Klimaneutralität im Jahr 2045 ist damit ein Technologieszenario – auch weil eine weitere Beschleunigung von Effizienzfortschritten aus heutiger Sicht an Grenzen stößt.

Die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ zeigt, dass Deutschland mit einer beschleunigten, umfassenden Nutzung klimafreundlicher Technik und einer starken Klimapolitik die Klimaneutralität bereits im Jahr 2045 erreichen und im Zeitraum ab 2045 mit Netto-Negativ-Emissionen einen zusätzlichen Beitrag für den internationalen Klimaschutz leisten kann. Hierzu ist es nicht notwendig, gegenüber dem Zieljahr 2050 neue Technologiepfade zu beschreiten. Die Transformation des Energiesystems erfolgt allerdings schneller. Dies führt dazu, dass bestimmte Maschinen und Anlagen zum Teil etwas früher ausgetauscht werden.

Es werden in der Studie keine weitergehenden Verhaltensänderungen in Form von Konsumeinschränkungen unterstellt. Allerdings werden heute erkennbare Trends zu Konsumänderungen stärker berücksichtigt, zum Beispiel beim Markthochlauf von Fleisch- und Milch-Alternativen und synthetischem Fleisch. Klimaneutralität 2045 kann unter Beibehaltung der zugrunde gelegten

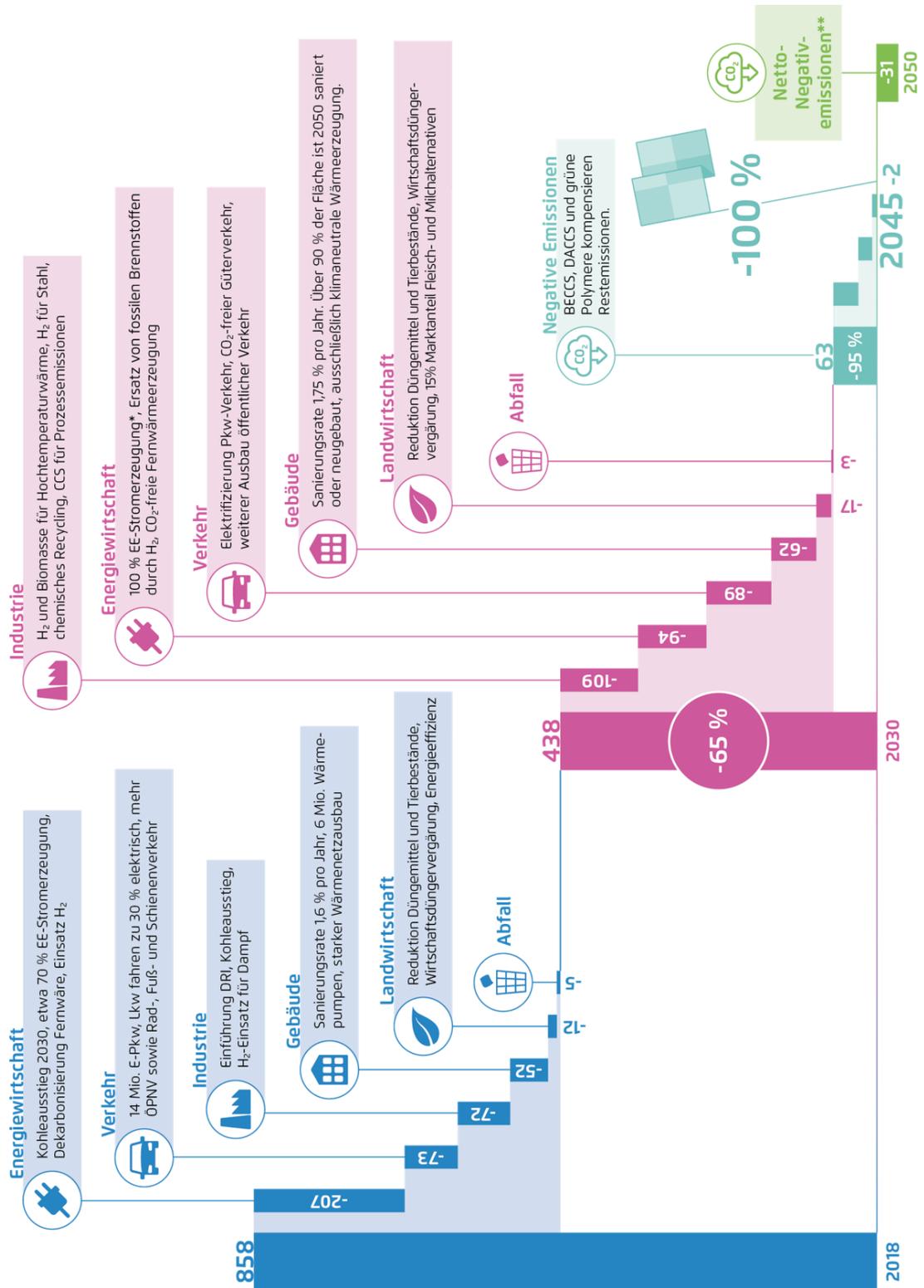
Rahmenbedingungen zur demografischen und wirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland erreicht werden.

Gerade bei einer beschleunigten Transformation sind die Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen von hoher Bedeutung. Deshalb wurden die im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ herausgearbeiteten Maßnahmen und deren Effekte im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ nochmals im Hinblick auf die für den Zeitraum nach 2030 vorgesehene schnellere Umsetzung überprüft und bewertet. Für die Auswahl der notwendigen Maßnahmen zur Zielerreichung im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ ist das Hauptkriterium nach wie vor die Wirtschaftlichkeit. Maßnahmen mit geringeren CO₂-Vermeidungskosten wurden in der Regel vorgezogen. Aufgrund der schnelleren Transformation fand die Frage der technischen Umsetzbarkeit und des möglichen Markthochlaufs eine noch stärkere Beachtung. Berücksichtigt wurden vor allem Technologien mit geringen technischen und wirtschaftlichen Risiken. Der zusätzliche Einsatz von CCS für die schnellere Zielerreichung wurde minimiert; wo immer möglich, wurden alternative Technologien bevorzugt.

Auch das Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ berücksichtigt die Treibhausgasemissionen sämtlicher Sektoren. Die Einteilung in die Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr, Industrie, Gebäude, Landwirtschaft, Abfall und Landnutzung wird ebenso wie der Detaillierungsgrad der Analysen beibehalten und ermöglicht so den direkten Vergleich der Studienergebnisse.

Abbildung 1: Maßnahmen im Szenario Klimaneutral 2045 (KN2045)

Angaben in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente



H₂ = Wasserstoff

* inkl. Stromerzeugung aus erneuerbar erzeugtem Wasserstoff, zwischengespeichertem und importiertem erneuerbaren Strom.

** Lediglich Trendfortschreibung nach 2045, weitere Reduktion der Emissionen ist möglich.

Prognos: Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021)

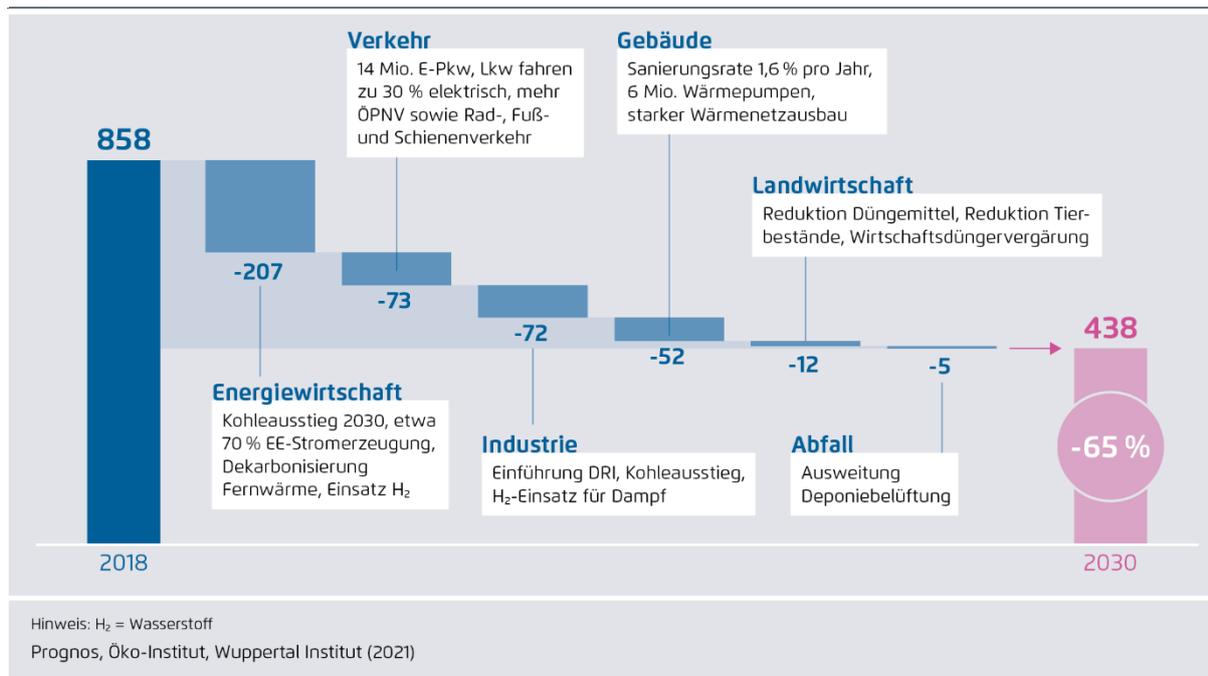
Ambitionierte Klimapolitik bis 2030 ist Voraussetzung für Klimaneutralität bis 2045

In der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ wurde bereits gezeigt, dass die Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 65 Prozent gegenüber 2018 ein ambitioniertes, aber erreichbares Zwischenziel für Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität ist. Auf die hierzu notwendigen Entwicklungen und wesentlichen Stellgrößen setzt auch die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ für den Zeitraum bis 2030 unverändert auf.

Im Mai 2021 wurden das deutsche Klimaschutzgesetz im Kontext des Beschlusses des Bundesverfassungsgerichts und des neuen EU-Klimaschutzziels für 2030 angepasst. So wurde das Minderungsziel für das Jahr 2030 um 10 Prozentpunkte auf 65 Prozent angehoben und entspricht damit dem Wert in dieser Studie. Die sektorale Aufteilung der Emissionsminderungen ist ähnlich, aber nicht identisch.

Abbildung 2: Drei Schritte zur Klimaneutralität Schritt 1 – 65% Minderung bis 2030

Angaben in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente



Bis zum Jahr 2030 können die Emissionen in der **Energiewirtschaft** um 207 Millionen Tonnen CO₂-Äq gesenkt werden. Erreichbar wird dies in erster Linie durch einen Kohleausstieg bis zum Jahr 2030 und einen stärkeren Ausbau der Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung. Hinzu kommt ab Ende der 2020er-Jahre die beginnende Wasserstoffnutzung in Kraftwerken und KWK-Anlagen. Es wird angenommen, dass der frühere Kohleausstieg im Kontext mit einer Verschärfung des EU-Minderungsziels auf 55 Prozent und einer Anpassung des EU ETS erfolgen wird. Die dann höheren Kosten für CO₂-Zertifikate beschleunigen die Beendigung der Kohleverstromung.

Mit der zunehmenden Elektrifizierung in allen Sektoren steigt der Stromverbrauch bis 2030 gegenüber 2018 um 51 Terawattstunden beziehungsweise 9 Prozent. Die Erneuerbaren Energien erreichen 2030 einen Anteil von etwa 70 Prozent am Bruttostromverbrauch. Ausgebaut werden

hierfür die Offshore-Windkraft auf 25 Gigawatt, die Onshore-Windkraft auf 80 Gigawatt und die Photovoltaik auf 150 Gigawatt.

In der **Industrie** werden in den zentralen Grundstoffindustrien zur Erreichung der Klimaziele neue Prozesse etabliert. Unterstützend wirkt dabei, dass ohnehin etwa 50 Prozent der zentralen Industrieanlagen der deutschen Grundstoffindustrie in den nächsten zehn Jahren zur Reinvestition anstehen. Vorreiter könnte die Stahlindustrie sein. Hier können ans Ende ihrer Lebenszeit kommende Hochöfen durch Direktreduktionsanlagen ersetzt werden, die vorwiegend mit Wasserstoff und kleineren Anteilen Erdgas (später Biomasse) betrieben werden.

Auch andere Branchen müssen in noch zu entwickelnde Technologien auf der Basis von Strom oder (vor allem erneuerbarem) Wasserstoff investieren. Parallel dazu ist notwendig, die benötigten Infrastrukturen auszubauen, vor allem für eine Versorgung der Industrie mit **Wasserstoff**, aber auch CCS-Infrastrukturen für die Zement- und Kalkindustrie sowie – im Hinblick auf den Einsatz von Biomasse in Kombination mit CCS (BECCS) – die Stahlindustrie und die chemische Industrie. Ebenso wichtig sind frühzeitige Investitionen in eine stärkere Kreislaufführung und höhere Anteile sekundärer Rohstoffe, damit diese Lösungen nach 2030 ihr volles Potenzial ausspielen können. Erste CCS-Anlagen in der Zementindustrie können schon 2030 in Betrieb sein.

Zusätzliche Minderungen im **Gebäudebereich** werden bis 2030 erreicht durch die Veränderung der Heizungsstruktur, den Ausbau der Wärmenetze sowie eine gegenüber 2015 um etwa 50 Prozent erhöhte energetische Sanierungsrate. Wärmepumpen gewinnen beim Einbau neuer Heizungen bis Mitte der 2020er-Jahre große Marktanteile, insbesondere im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser. Im Jahr 2030 werden sechs Millionen Wärmepumpen eingesetzt. Grüne Fernwärme gewinnt in urbanen Räumen eine stärkere Bedeutung. Nach 2025 werden nur noch in wenigen Ausnahmefällen neue Heizungen auf Basis von Heizöl oder Erdgas in Betrieb genommen.

Im **Verkehr** findet bis 2030 eine Trendwende statt. Dabei bleibt die persönliche Mobilität vollständig erhalten, aber sie verändert sich. Die Menschen fahren deutlich mehr mit öffentlichen Verkehrsmitteln oder mit dem Rad, und sie gehen mehr zu Fuß. Im Jahr 2030 werden bereits 14 Millionen Elektro-Pkw (inkl. Plug-in-Hybride) im Bestand sein. Güter werden verstärkt auf der Schiene transportiert und es wird fast ein Drittel der Fahrleistung im Straßengüterverkehr über elektrische Lkw mit Batterien, Oberleitungen und Brennstoffzellen erbracht.

In der **Landwirtschaft** liegt der Schwerpunkt bis zum Jahr 2030 auf der Umsetzung verfügbarer technischer Minderungsmaßnahmen. Zu nennen sind beispielsweise die Vergärung und verbesserte Lagerung von Wirtschaftsdüngern und der Einsatz von emissionsarmen Ausbringungstechnologien für Mist und Gülle. Gleichzeitig werden weitere Minderungen durch Änderungen der landwirtschaftlichen Produktion erreicht. Dazu gehören die Ausweitung des Ökolandbaus, eine Umstellung auf Kulturarten mit geringerem Stickstoffbedarf und die Reduktion der Tierbestände. Diese Änderungen der Produktion folgen Veränderungen auf der Nachfrageseite: Es werden – entsprechend aktuellen Trends – weniger tierische Produkte konsumiert, und bei der Nachfrage nach Bioenergie kommt es zu einer Verschiebung von gasförmigen zu festen Biobrennstoffen.

Im **Abfallbereich** sinken zwischen 2018 und 2030 die Methanemissionen aus der Deponierung. Mit der Ausweitung der Maßnahmen zur Deponiebelüftung wird die Reduktion der Methanemissionen weiter beschleunigt. In den anderen Bereichen des Abfallsektors besteht bis 2030 nur ein geringes Reduktionspotenzial.

Bereits 2045 klimaneutral – wie wir schneller 95 Prozent Minderung der Emissionen erreichen

Mit den dargestellten Maßnahmen können von 1990 bis 2030 zwei Drittel der notwendigen THG-Einsparung bis zur Klimaneutralität erreicht werden. Für das letzte Drittel müssen die eingeschlagenen Pfade nach 2030 konsequent und zügig weiterverfolgt werden, damit das Ziel bereits 2045 erreicht werden kann. Gegenüber der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“, die für diesen letzten Schritt einen Zeitraum von 20 Jahren ansetzte, reduziert sich die zur Verfügung stehende Zeit um ein Viertel. Maßnahmen müssen also schneller umgesetzt, neue Techniken, Antriebe und Verfahren schneller eingesetzt und die notwendige neue Infrastruktur schneller zur Verfügung gestellt werden.

Abbildung 3: Überblick Entwicklung THG-Emissionen nach Sektoren

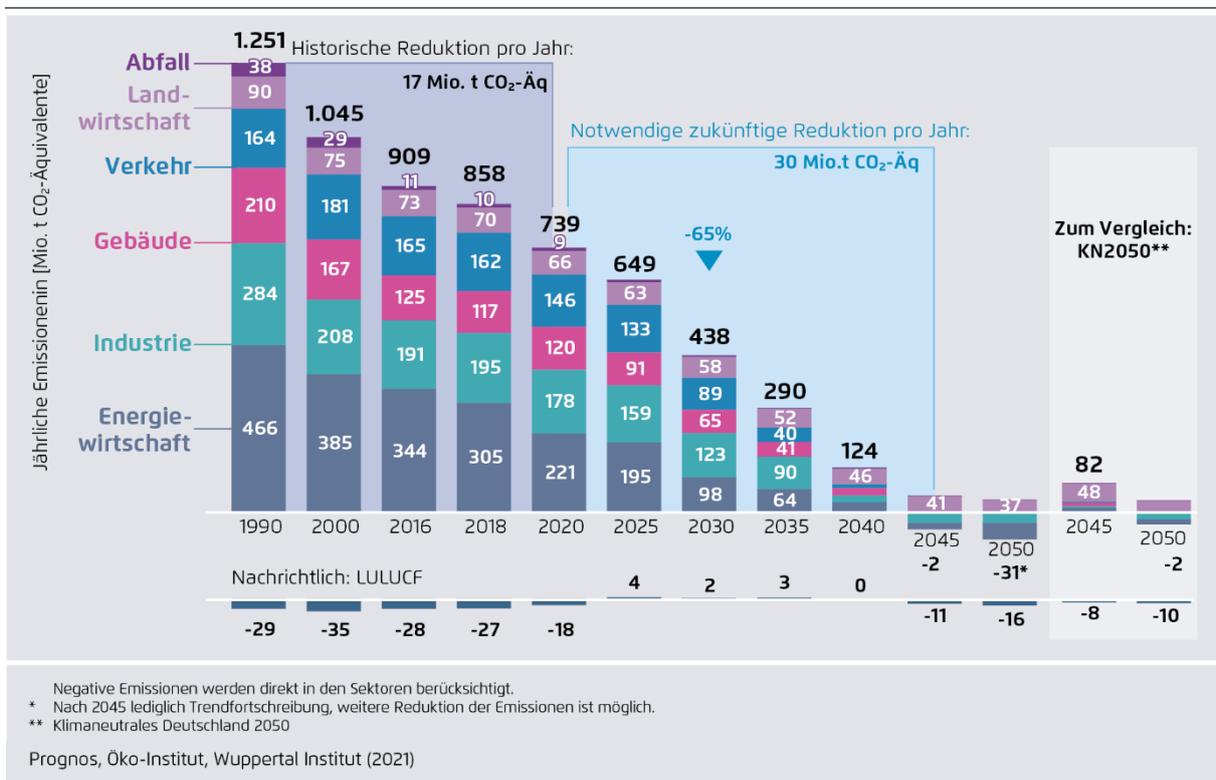
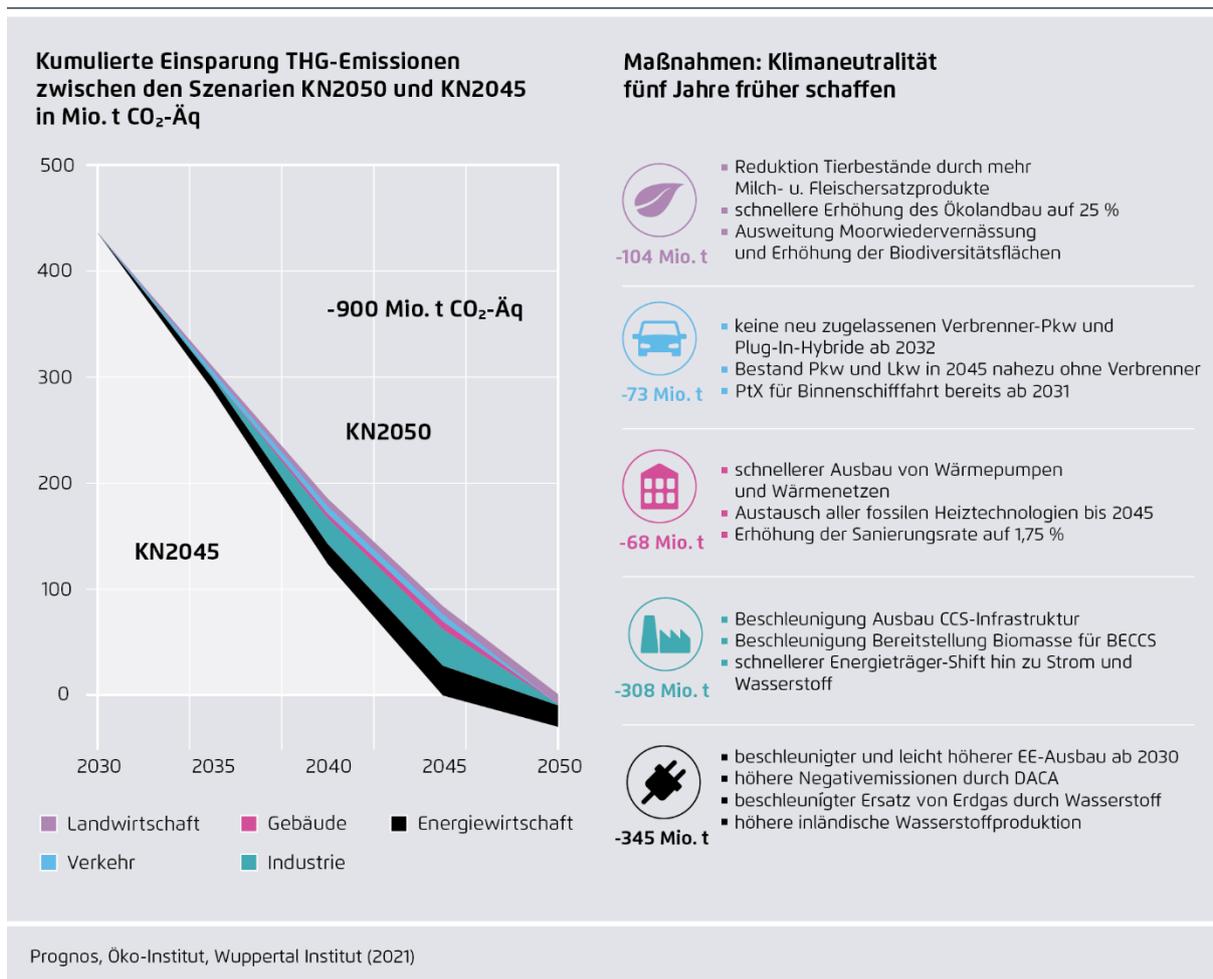


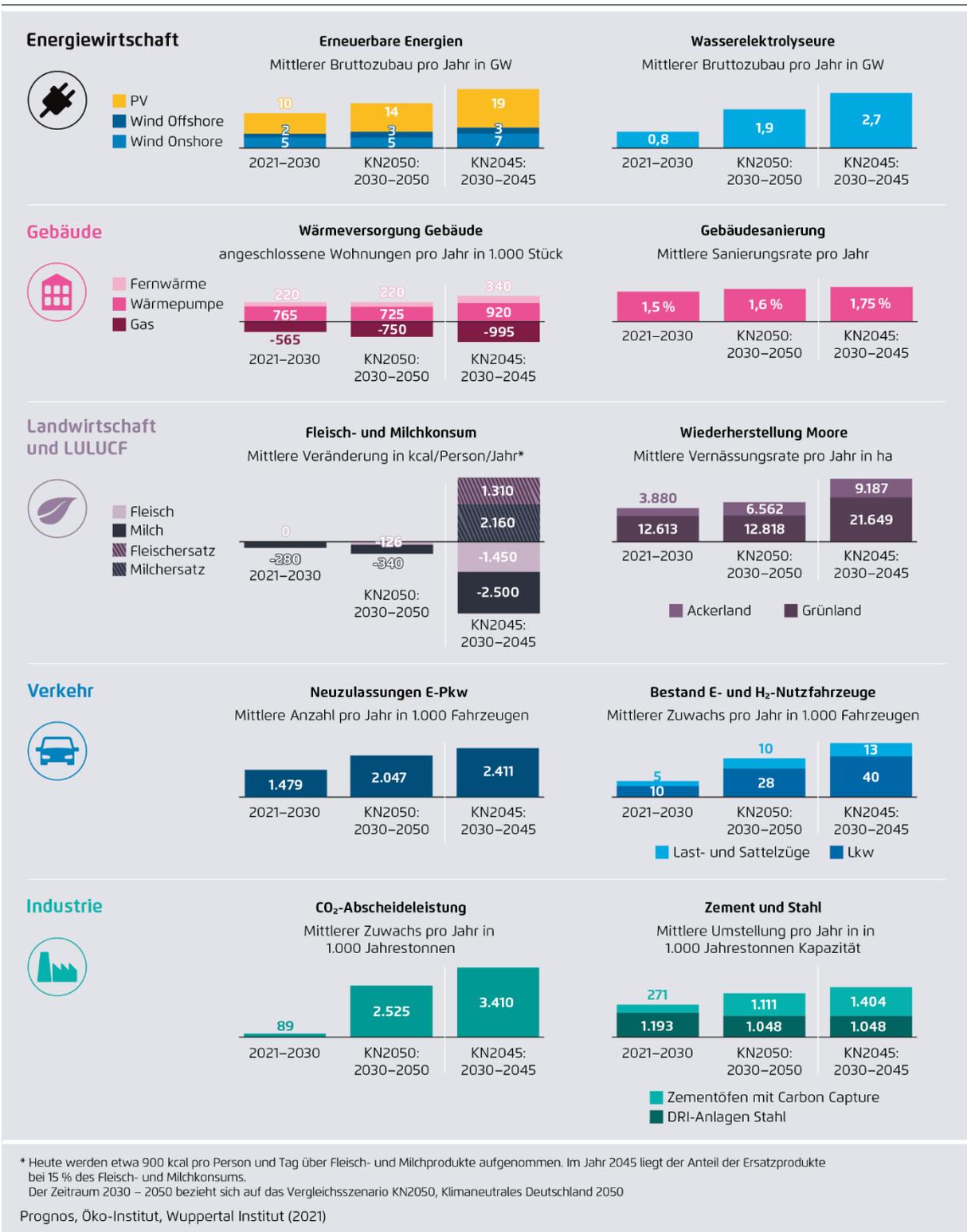
Abbildung 4: Welche Maßnahmen führen zur schnelleren Klimaneutralität 2045?



Mit diesen erhöhten Anstrengungen sind das Erreichen der CO₂-Neutralität bereits im Jahr 2043 und die Klimaneutralität durch Vermeidung oder Ausgleich sämtlicher Treibhausgasemissionen im Jahr 2045 möglich. Werden die Maßnahmentrends über 2045 hinaus fortgeschrieben, unterstützen die dann entstehenden Netto-Negativemissionen den weltweiten Klimaschutz.

Sektorübergreifend beschleunigt sich gegenüber der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ bis 2045 der Trend der Elektrifizierung, und auch Wasserstoff gewinnt als Sekundärenergieträger und Rohstoff früher an Bedeutung. Der kürzere Zeitrahmen erzeugt auf der anderen Seite zusätzlichen Druck auf die für die Emissionsminderung in allen Bereichen notwendigen Effizienzverbesserungen. Allerdings können Effizienzmaßnahmen nur mit größerem Aufwand beschleunigt werden als angebotsseitige Maßnahmen. Dies führt dazu, dass die Stromnachfrage schneller und stärker steigt und auch CCS, also die Abscheidung und Ablagerung von CO₂, eine stärkere Rolle einnehmen muss. Unverändert wichtig bleibt die Rolle der festen Biomasse in Bereichen mit prozessbedingten Kohlenstoffflüssen und sehr konzentrierter Energienachfrage an Standorten, die für CCS geeignet sind (vor allem Chemie- und Stahlindustrie).

Abbildung 5: Umsetzungsgeschwindigkeit in den Szenarien KN2050 und KN2045



Im Detail sind die folgenden Entwicklungen bis hin zur **Klimaneutralität 2045** in den einzelnen Sektoren notwendig:

→ Im Bereich der **Energiewirtschaft** werden Erneuerbare Energien stärker und schneller ausgebaut. Der Stromverbrauch steigt von 2030 bis 2045 vor allem durch die weitere Elektrifizierung sowie die steigende Herstellung von Wasserstoff um 50 Prozent auf etwa 1.000 Terawattstunden. Der Fokus des EE-Zubaus nach 2030 liegt weiter auf der Windenergie und der Photovoltaik. Wasserstoff gewinnt zunehmend an Bedeutung und löst nach 2040 Erdgas als wichtigsten Energieträger für die Residualstromerzeugung ab. 2045 erfolgen die Strom- und auch die Fernwärmeerzeugung vollständig CO₂-frei. Gegenüber den Ergebnissen der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ erhöht sich der Bruttostromverbrauch im Jahr 2045 damit um etwa 130 Terawattstunden, im Jahr 2050 beträgt die Steigerung noch 40 Terawattstunden. Der höhere Stromverbrauch im Jahr 2045 resultiert einerseits aus der schnelleren Elektrifizierung der anderen Sektoren und andererseits aus dem höheren Wasserstoffbedarf, der zur Begrenzung der Importe inländisch erzeugt wird. Hinzu kommt, dass in dem kürzeren Zeitraum auch geringere Energieeffizienzfortschritte in den verschiedenen Einsatzbereichen zu erwarten sind. Hier setzt das Szenario explizit auf den beschleunigten Hochlauf von Klimaschutztechnologien auf der Angebotsseite, da eine weitere Beschleunigung von Effizienzfortschritten an Grenzen stößt und Verbrauchseinschränkungen (Suffizienz) nicht unterstellt wurden.

Um den Strombedarf der Klimaneutralität bereits im Jahr 2045 zu decken, ist deshalb ein schnellerer und stärkerer Ausbau der Windenergie und Photovoltaik in den Jahren nach 2030 erforderlich. Die im Jahr 2045 benötigte installierte Leistung von Photovoltaikanlagen beträgt 385 Gigawatt, gegenüber dem Vergleichsjahr in der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ bedeutet dies eine Steigerung um 70 Gigawatt. Auch für die Windkraft sind nochmals höhere Ausbaukorridore notwendig. Für Wind an Land ist im Jahr 2045 eine Erzeugungskapazität von 145 Gigawatt erforderlich, und der Ausbau von Wind auf See auf 70 Gigawatt muss auf das Jahr 2045 vorgezogen werden. Gegenüber der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ bedeutet dies für das Jahr 2045 Erhöhungen der installierten Leistung von 17 Gigawatt an Land und 9 Gigawatt auf See. Insbesondere für Wind auf See mit ihren langen Planungszeiträumen stellt diese Beschleunigung eine große Herausforderung dar. Bei Wind an Land und Photovoltaik führt der verstärkte Ausbau zu einem steigenden Flächenbedarf.

→ In der **Industrie** setzt sich der Trend hin zu Strom und Wasserstoff sowie teilweise Biomasse als Energieträger fort, sodass die Industrie bis zum Jahr 2040 weitestgehend klimaneutral ist. Auch die chemischen Rohstoffe (Feedstocks) werden schon ab 2030 sukzessive durch chemisches Recycling und synthetische, auf nicht fossile Kohlenstoff basierende, Einsatzstoffe ersetzt.

Beschleunigt gegenüber der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ erfolgt die Versorgung der großen Wärmebedarfe im Industriebereich mit Biomasse. Parallel dazu nimmt auch der Ausbau des CO₂-Netzes in Deutschland ab dem Jahr 2035 schneller an Fahrt auf und kann so bis zum Jahr 2045 abgeschlossen werden. Zwischen 2030 und 2040 werden industrielle CO₂-Quellen mit einer Abscheidemenge von jährlich 30 Millionen Tonnen CO₂ mit dem CO₂-Netz erschlossen, bis 2045 steigt die jährlich eingespeicherte Menge noch einmal auf 52 Millionen Tonnen.

Im aktuellen Szenario unberücksichtigt blieben weitere Möglichkeiten, die zu einer noch früheren Emissionsreduzierung führen könnten. So könnten im Industriebereich Emissionen vor 2040 rascher sinken durch ein Sinken der Nachfrage nach (und Produktion von) energieintensiven Gütern. Auch würde sich eine geringere Bautätigkeit vor allem im Neubau dämpfend auf den Zement- und Stahlbedarf auswirken und langlebigere Produkte wiederum mindernd auf den Kunststoffbedarf.

→ Im **Gebäudebereich** werden nach 2030 Sanierungen und der Verbrauchsrückgang im Neubau beschleunigt. Die auf den Gesamtwohnungsbestand bezogene mittlere jährliche Sanierungsrate steigt im Zeitraum 2030 bis 2045 auf annähernd 1,75 Prozent. Diese liegt etwas höher als die 1,6 Prozent, die im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ für den Zeitraum 2030 bis 2050 unterstellt wurden. Durch die höhere Sanierungsrate gelingt es bis zum Jahr 2050, über 90 Prozent der Gebäudefläche im Zeitverlauf seit dem Jahr 2000 zu sanieren oder effizient neu zu errichten. Gleichzeitig werden die Verbesserungen bei der Sanierungseffizienz im Bestand und die Erhöhung der Effizienzstandards im Neubau gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ für den Zeitraum nach 2030 leicht vorgezogen.

Nach 2025 werden wie im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ nur noch in Ausnahmefällen neue fossile Wärmeerzeuger eingebaut. Im aktuellen Szenario wird zudem die Betriebsdauer fossiler Wärmeerzeuger auf 20 Jahre begrenzt. Gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“, in dem in den Anlagenkohorten auch längere Betriebsdauern betrachtet wurden, bedeutet dies eine Einschränkung, die sich jedoch nur geringfügig auf die faktische Nutzungsdauer der Gasheizungen auswirkt, da der Ausstieg aus den Gasheizungen ohnehin durch Markteffekte unterstützt wird. Durch den starken Rückbau der Gasheizungen im Gebäudebereich verteilen sich die Kosten für den Betrieb- und Unterhalt der Gasnetze auf immer weniger Endkunden. Dadurch wird die Nutzung von Gas für die verbleibenden Kunden zunehmend unwirtschaftlich. Es ist zu erwarten, dass der Betrieb der Verteilnetze für Erdgas nicht aufrechterhalten wird, wenn nur noch wenige Kunden bedient werden, sondern dass Netzteile beim Unterschreiten einer Auslastungsschwelle sukzessive stillgelegt werden. Dies führt dazu, dass sich in den einzelnen Netzen diskontinuierliche Rückgänge der Zahl der Anschlüsse zeigen: Beschleunigung durch die Verteuerung der Netznutzung, dann abrupter Rückgang bei einer Stilllegung von Teilnetzen. Wenngleich diese Entwicklung nicht bei allen Verteilnetzen synchron verläuft, zeigt sich bei der Betrachtung aller Gasanschlüsse eine gleichmäßigere Entwicklung. Einzelne Cluster können, auch aufgrund der Verwendung von Biomethan, (länger) bestehen bleiben.

Durch diese Maßnahmen und Entwicklungen sind im Jahr 2045 die meisten fossilen Wärmeerzeuger ersetzt. Gleichzeitig werden durch den fortschreitenden Einbau von CO₂-frei betriebenen Heizungen und den Anschluss von Gebäuden an Wärmenetze die CO₂-Emissionen des Gebäudesektors bis auf eine Restmenge von 3 Millionen Tonnen CO₂-Äq fast vollständig vermieden. Im Jahr 2050 verbleiben dann nur noch geringe Methan- und Lachgas-Emissionen durch die Nutzung von Biomasse. Zwischen 2030 und 2045 werden im jährlichen Mittel deutlich mehr, nämlich 920.000, Wohnungen an eine Heizung mit Wärmepumpe angeschlossen. Dies erhöht den Gesamtbestand bereits im Jahr 2045 auf 14 Millionen Wärmepumpen – im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ wird dieser Bestand erst im Jahr 2050 erreicht.

Keine Berücksichtigung fanden in der aktuellen Studie verhaltensbedingte Reduktionsmöglichkeiten, die von aktuellen Trends abweichen. So ist die Pro-Kopf-Wohnfläche in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen, auch im aktuellen Szenario wird eine solche Zunahme unterstellt.

→ Im **Verkehr** verbleibt die Personenverkehrsleistung insgesamt in etwa auf dem heutigen Niveau, die Güterverkehrsleistung steigt aufgrund des Wirtschaftswachstums weiter an. Veränderungen betreffen vor allem die genutzten Verkehrsträger und die Auslastung der Fahrzeuge.

Bereits ab dem Jahr 2032 werden keine Pkw mit Verbrennungsmotor mehr zugelassen. Bis zum Jahr 2045 werden dann nahezu alle Bestandsfahrzeuge mit Verbrennungsmotor durch E-Pkw ersetzt. Es verbleibt ein Restbestand an Oldtimern auf den Straßen, die älter als 30 Jahre sind. Auch der Straßengüterverkehr wird bereits ab 2045 fast ausschließlich mit batterieelektrischen, Oberleitungs- und Brennstoffzellenfahrzeugen betrieben, ebenso wie Bus und Bahn. Im Vergleich

zum Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ wird der Hochlauf von strombasierten Kraftstoffen beschleunigt. So werden im Jahr 2035 bereits 20 Prozent des Endenergiebedarfs bei Binnenschiffen ersetzt, im Jahr 2040 sind es 100 Prozent. Die Anteile an strombasierten Kraftstoffen im Luft- und Seeverkehr steigen bereits nach 2035 deutlich, sodass im Jahr 2045 die Treibhausgasneutralität erreicht wird. Die höheren Kosten der Kraftstoffe kombiniert mit weiteren Maßnahmen sorgen dafür, dass der Anstieg der Verkehrsnachfrage im internationalen Luftverkehr früher gedämpft wird.

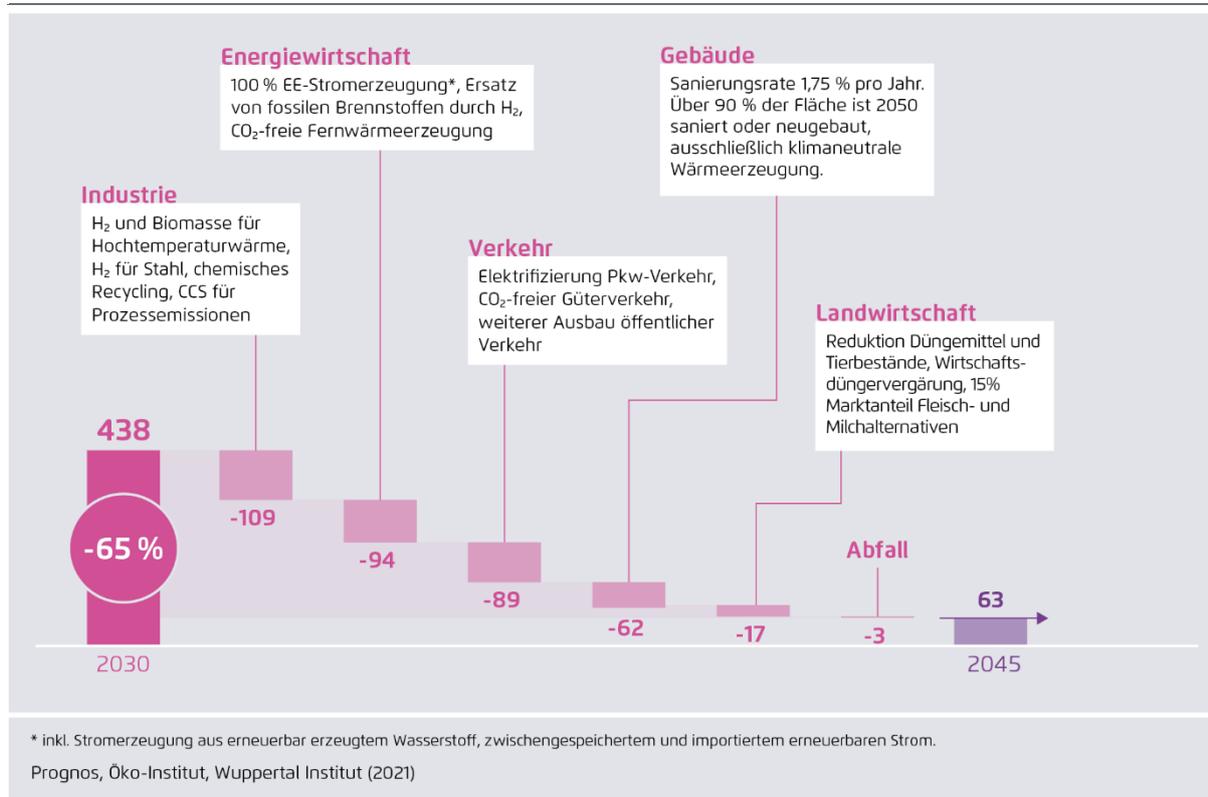
→ In der **Landwirtschaft** werden bis 2045 wesentliche Minderungen über den Umbau der Tierbestände und die Vergärung hoher Wirtschaftsdüngeranteile in Biogasanlagen erreicht. Die wichtigste Änderung gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ liegt in der Annahme einer steigenden Nachfrage nach pflanzlichen und synthetischen Ersatzprodukten für Fleisch und Milch. Diese steigt ab dem Jahr 2031 bis zum Jahr 2045 auf einen Anteil von 15 Prozent am gesamten Verbrauch. Für dieses Marktsegment lässt sich bereits heute eine dynamische Entwicklung beobachten (wenn auch auf niedrigem Niveau), so dass eine solche Steigerungsrate eher in der Mitte des Spektrums der zu erwartenden Entwicklungen liegt. Es wird davon ausgegangen, dass die Hersteller die geschmackliche Qualität weiter verbessern können und durch technische Entwicklungen, Skaleneffekte in der Herstellung und Konkurrenz im Markt die spezifischen Preise sinken werden. Über längere Sicht können weltweit die Ersatzprodukte zu geringeren Marktpreisen als die natürlichen Produkte angeboten werden. Daher wird in diesem Szenario auch unterstellt, dass die Entwicklung einen Einfluss auf den Außenhandel für Fleisch und Milch aus Deutschland haben wird. Durch den Ersatz von 15 Prozent der natürlichen Fleisch- und Milchprodukte gehen die Tierbestände aller Nutztiere und die Emissionen aus der Tierhaltung noch einmal deutlich zurück.

Im Bereich der landwirtschaftlichen Böden ist wesentliches Reduktionspotenzial aus einer effizienteren Stickstoffnutzung bereits bis 2030 erschlossen. Allerdings ergeben sich nach 2030 gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ noch weitere Minderungseffekte. Für die Treibhausgasneutralität bereits im Jahr 2045 müssen die Minderungsmaßnahmen früher bzw. ab 2030 schneller umgesetzt werden. Das betrifft insbesondere die Moorwiedervernässung, die Zunahme des Ökolandbaus und die Erhöhung der nicht-produktiven Flächen. Auch die Etablierung der Kurzumtriebsplantagen und nutzbaren Gehölzstreifen erfolgt gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ früher und in größerem Ausmaß. Neben dem Vorziehen des Zieljahres wirkt hier auch die höhere Nachfrage der Industrie nach Energieholz. Insgesamt ergibt sich in diesem Szenario bereits im Jahr 2045 ein höherer Flächenbedarf für Extensivierungen und Biomassebereitstellung als im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“. Diese Flächen können rechtzeitig bereitgestellt werden, da die rückläufigen Tierbestände eine geringere Nachfrage nach Futterflächen zur Folge haben.

→ Im **Abfallbereich** verbleiben im Jahr 2045 noch Restemissionen aus der Deponierung, der biologischen Behandlung und der Abwasserbehandlung. Aufgrund der biologischen Prozesse lassen sich die Emissionen aus dem Abfallbereich nicht komplett vermeiden. Minderungen werden bis 2045 in allen Bereichen erzielt. Gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ werden im Abfallsektor die Projekte zur Deponiebelüftung in den Jahren 2030 bis 2040 vorgezogen und ausgeweitet.

Abbildung 6: Schritt 2 -95% Minderung ohne Negativemissionen

Angaben in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente



Nicht vermeidbare Restemissionen ausgleichen - Kompensation mit CCS und Negativemissionen

Als residuale THG-Emissionen werden die Restemissionen bezeichnet, die sich durch Vermeidungsmaßnahmen nicht weiter reduzieren lassen. Sie entstehen vor allem im Landwirtschaftssektor durch biologische Prozesse in Böden (Düngemittel) und bei der Tierhaltung. Auch bei industriellen Prozessen und in der Abfallwirtschaft verbleiben Restemissionen. Energiebedingte Treibhausgasemissionen können hingegen durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger bis auf sehr geringe Methan- und Lachgasemissionen aus der Lagerung, dem Transport und der Verbrennung von Biomasse und synthetischen Brennstoffen vermieden werden. In der Summe über alle Sektoren verbleiben im Jahr 2045 Restemissionen in Höhe von 63 Millionen Tonnen CO₂-Äq – das entspricht fünf Prozent der Emissionen des Jahres 1990.

Diese Restemissionen werden wie im Szenario "Klimaneutrales Deutschland 2050" mit folgenden Technologien kompensiert, bei denen CO₂ aus der Atmosphäre direkt oder indirekt entnommen und langfristig eingelagert wird:

→ Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) ist die Abscheidung und geologische Lagerung von CO₂, das bei der Verbrennung von Biomasse entsteht. Da Biomasse bei nachhaltigem Anbau und Nutzung als Reststoff weitgehend CO₂-neutral ist, wird durch BECCS langfristig CO₂ aus der Atmosphäre entnommen. Der Einsatz von BECCS, der sich auf die Industrie konzentriert, ist durch die Menge der nachhaltig verfügbaren Biomasse begrenzt.

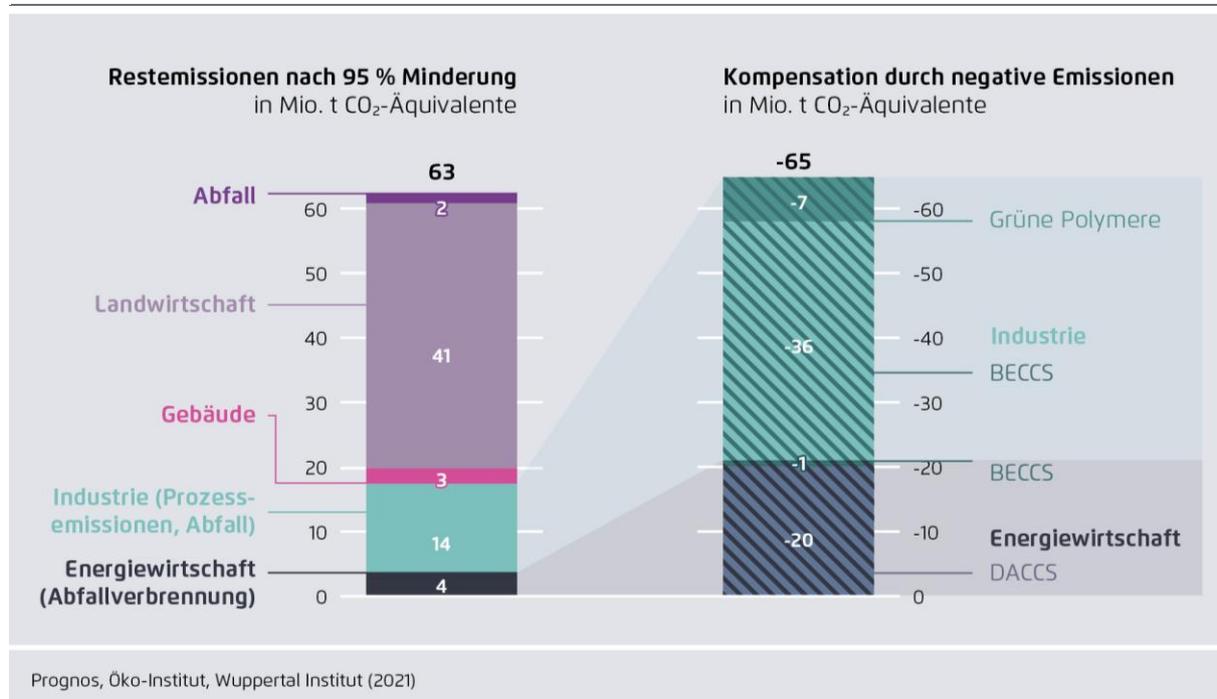
→ Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) bezeichnet die direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft mit anschließender Einlagerung in geeigneten geologischen Formationen. Der Energieaufwand und die Kosten für DACCS sind deutlich höher als für BECCS.

→ Grüne Feedstocks/stoffliche Bindung von CO₂ in grünen Polymeren: Der Grundstoff „grünes“ Naphtha oder andere Kohlenwasserstoffe werden mit aus der Luft abgeschiedenem CO₂ oder aus Biomasse hergestellt. Dies erfolgt beispielsweise in der Fischer-Tropsch-Synthese mit aus Erneuerbaren Energien erzeugtem Wasserstoff. Diese Grundstoffe werden zu Kunststoffen verarbeitet, die durch ein verbessertes Recyclingsystem dauerhaft im Stoffkreislauf gehalten werden. In Verbindung mit CCS bei der Müllverbrennung kann so die Emission des vorher aus der Atmosphäre gebundenen Kohlenstoffs vermieden werden.

Durch den gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ früheren und erhöhten Einsatz dieser Technologien und Maßnahmen wird bereits im Jahr 2045 mehr CO₂ aus der Atmosphäre entnommen als eingetragen wird, es treten also Netto-Negativemissionen auf. Nach 2045 gehen die Residualemissionen weiter zurück und Direct-Air-Capture-Anlagen werden weiter ausgebaut. Dies führt dazu, dass Deutschland im Jahr 2050 ein Netto-Emissionsniveau von -30 Millionen Tonnen CO₂-Äq erreicht.

Neben diesen technischen Maßnahmen werden im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) die Maßnahmen zur Wiedervernässung von Mooren gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ verstärkt.

Abbildung 7: Schritt 3 im Detail – residuale THG-Emissionen und deren Kompensation im Jahr 2045



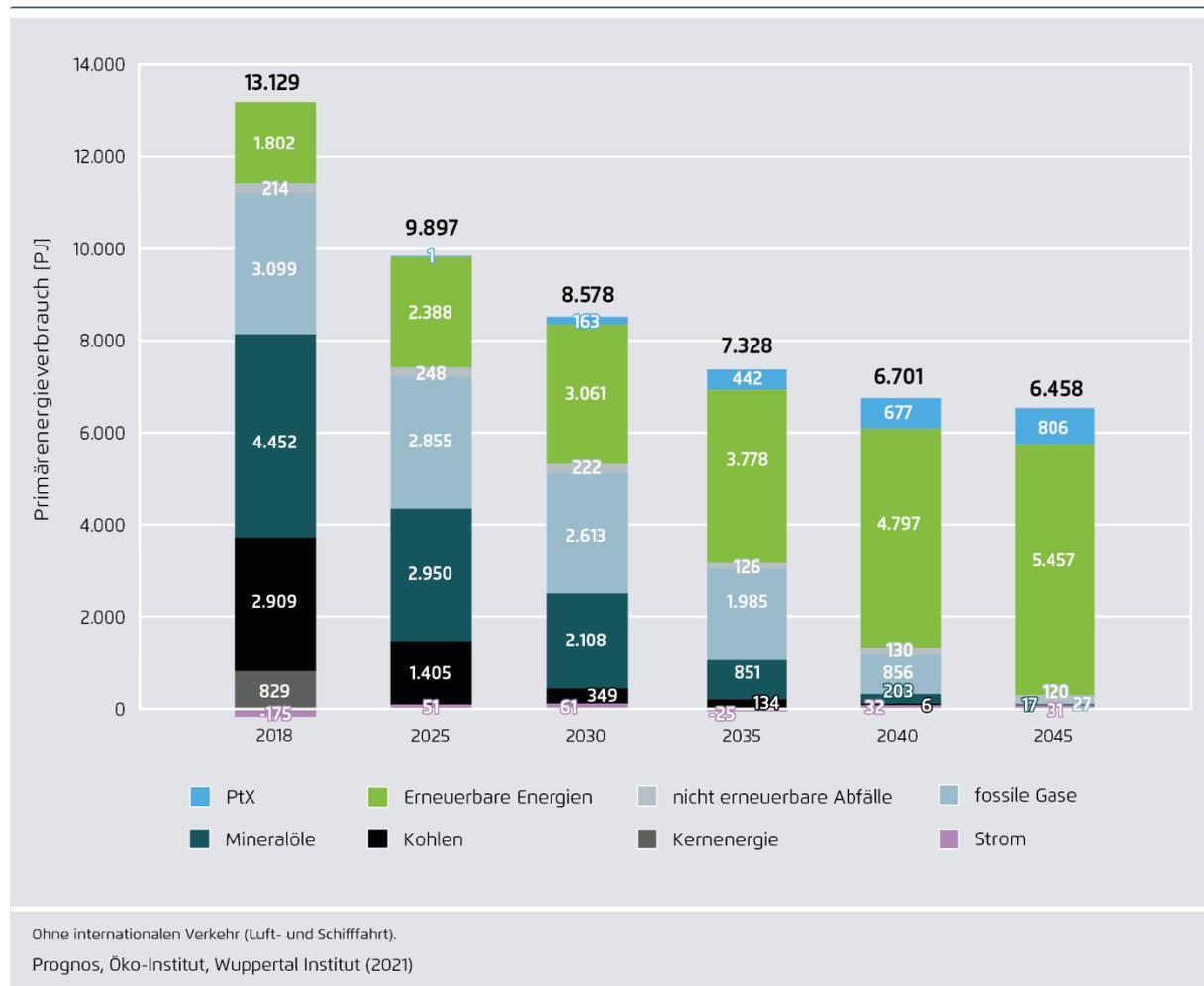
So wird erreicht, dass dieser Sektor auch langfristig eine CO₂-Senke bleibt. Mit einer Ausweitung der Maßnahmen im LULUCF-Sektor wird im Jahr 2045 eine Senke von -11 Millionen Tonnen CO₂-Äq erreicht, die sich bis 2050 auf einen Wert von -16 Millionen Tonnen CO₂-Äq vergrößert.

Allerdings kann das aktuelle Niveau der Senke von -27 Millionen Tonnen CO₂-Äq nicht gehalten werden. Natürliche Senken, also die Kohlenstoffaufnahme durch Wälder und Böden, werden auch in dieser Studie nur nachrichtlich ausgewiesen und nicht zur Erreichung der Klimaziele angerechnet.

Drei Hebel der Beschleunigung: Hebel 1 – Energieeffizienz und Senkung des Energiebedarfs

Im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ halbiert sich im Zeitraum von 2018 bis 2050 der Primärenergieverbrauch, also der Energiegehalt aller in Deutschland direkt oder zur Umwandlung in Sekundärenergieträger genutzten Energieträger. Der Primärenergieverbrauch geht von heute ungefähr 13.000 Petajoule (PJ) auf etwa 6.500 PJ zurück. Mit dem aktuellen Szenario wird diese Halbierung des Primärenergieverbrauchs bereits im Jahr 2045 erreicht. Die Gründe hierfür sind in beiden Szenarien sinkende Verluste bei der Energieumwandlung und der deutliche Rückgang des Endenergieverbrauchs. Da für den Zeitraum bis zum Jahr 2030 eine unveränderte Transformationsdynamik zu Grunde gelegt wurde, zeigen sich die entscheidenden Unterschiede erst nach 2030.

Abbildung 8: Primärenergieverbrauch



Zwischen 2030 und 2045 geht der Endenergieverbrauch in den aktuellen Berechnungen von 7.500 PJ um ein weiteres Viertel auf 5.750 PJ zurück, eine Größenordnung, die im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ erst fünf Jahre später erreicht wird. Wesentliche Treiber für diesen schnelleren Rückgang sind die in den Sektoren dargestellten beschleunigten und geänderten Maßnahmen, insbesondere die verstärkte Nutzung von Strom. Power-to-X ersetzen die im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ im Jahr 2045 noch verwendeten fossilen Mineralöle und Gase.

Auch im Umwandlungssektor geht der Umbau nach 2030 schneller voran als im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“. Im Zeitraum bis 2045 ergeben sich weitere Primärenergieeinsparungen, insbesondere durch den schnelleren Umstieg auf die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien. Der größte Teil der Stromerzeugung erfolgt 2045 ohne Umwandlungsverluste aus Windenergie und Photovoltaik.

Die Zusammensetzung des Primärenergieverbrauchs wandelt sich schneller als im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“. Bereits bis zum Jahr 2045 steigt der Anteil der Erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch von 36 Prozent im Jahr 2030 auf 85 Prozent bis 2045. Importe von synthetisch erzeugten Energieträgern stellen 2045 in etwa 12 Prozent, die restlichen 3 Prozent der Primärenergie entfallen 2045 auf sonstige Energieträger wie Abfall und geringe Mengen an importiertem Strom. Diese Zusammensetzung des Primärenergieverbrauchs wird im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ erst im Jahr 2050 erreicht.

Drei Hebel der Beschleunigung: Hebel 2 – erneuerbare Stromerzeugung und Elektrifizierung

Strom ist der zentrale Energieträger auf dem Weg hin zu einer klimaneutralen Gesellschaft, da er erneuerbar erzeugt und bei vielen Endanwendungen sehr effizient eingesetzt werden kann. Insbesondere im Verkehr und im Wärmemarkt ergeben sich deutliche Vorteile im Vergleich zu Verbrennungsmotoren und Heizkesseln.

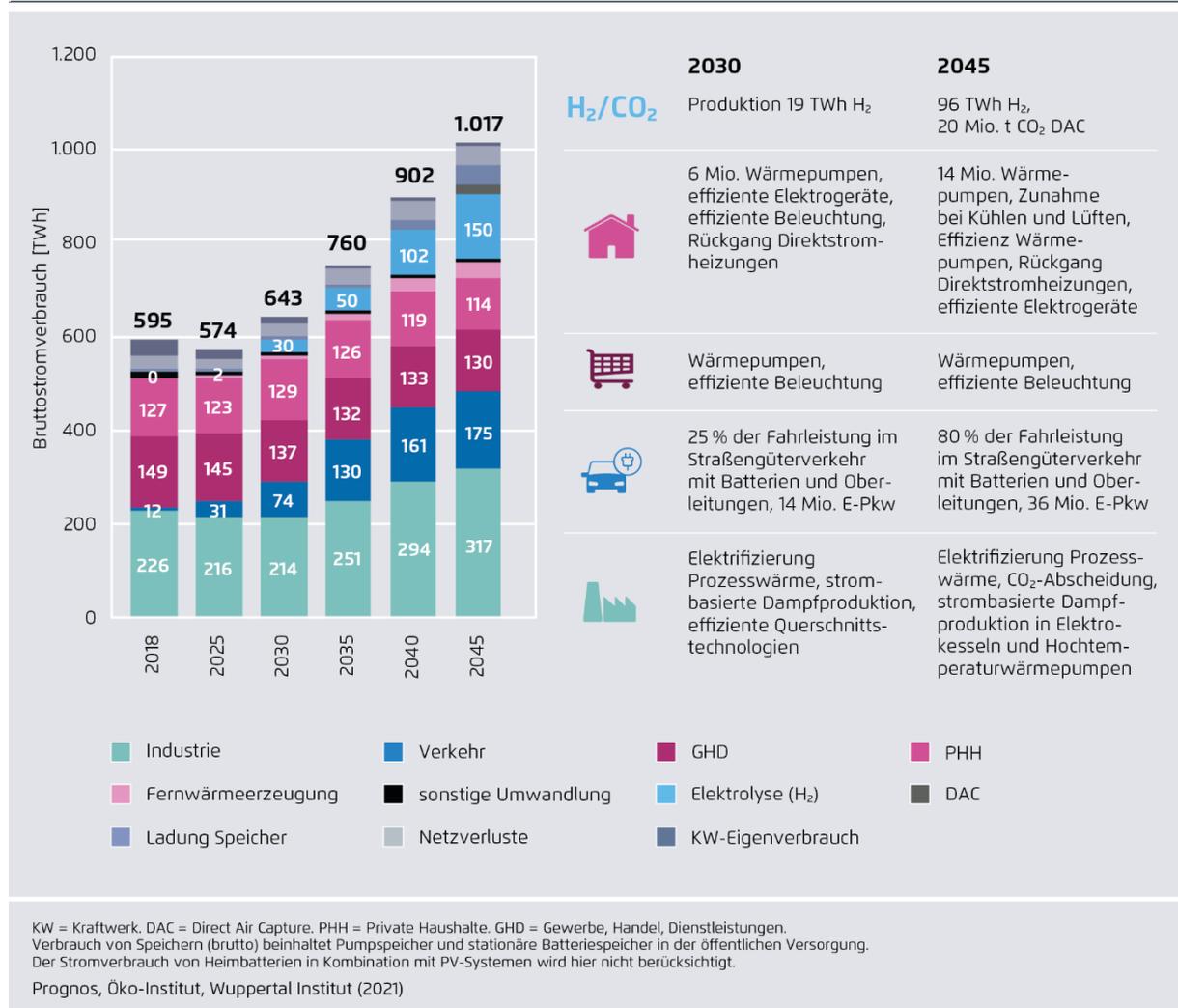
Im Vergleich zum Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ steigen die Elektrifizierung und die Produktion von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff schneller, fossile Brennstoffe werden früher ersetzt. Elektrifizierung und Wasserstoffproduktion sind auch die Haupttreiber für den deutlicheren Anstieg des Stromverbrauchs bis 2045 auf etwa 1.000 Terawattstunden. Der Stromverbrauch im Jahr 2045 liegt dann etwa 400 Terawattstunden höher als heute, gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ bedeutet dies für 2045 eine weitere Steigerung um rund 130 Terawattstunden.

Von dem Anstieg des Stromverbrauchs bis 2045 entfallen etwa 160 Terawattstunden auf den Verkehr, 150 Terawattstunden auf die Wasserstoffherstellung und etwa 90 Terawattstunden auf die Industrie. Leicht rückläufig entwickelt sich der Stromverbrauch im Gebäudesektor. Effizienzverbesserungen bei Elektrogeräten, Beleuchtung und der Ersatz von Nachtspeicherheizungen und Elektroboilern sparen mehr ein, als die Wärmepumpen verbrauchen.

Die Erzeugung in Deutschland erfolgt im Jahr 2045 – und somit um fünf Jahre früher als im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ – vollständig klimaneutral, das Stromsystem basiert dann zu 100 Prozent auf Erneuerbaren Energien. Erneuerbare Energien inklusive Wasserkraft und Biomasse decken dann 89 Prozent des Stromverbrauchs direkt, 6 Prozent entfallen auf Gaskraftwerke, die aus Erneuerbaren Energien erzeugten Wasserstoff als Brennstoff nutzen. Die restlichen 5 Prozent werden durch zwischengespeicherten oder importierten Strom gedeckt. Das Stromsystem wird bis zum Jahr 2045 sehr flexibel und kann auch bei hohen fluktuierenden Anteilen effizient genutzt werden. Dies wird einerseits erreicht durch einen noch schnelleren Ausbau

der Batteriespeicher sowie einen intensiveren Stromhandel mit dem Ausland. Andererseits wird auch der Stromverbrauch flexibilisiert: für die Elektromobilität, für den Einsatz von Wärmepumpen und für Elektrolyseure.

Abbildung 9: Bruttostromverbrauch



Wie im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ dienen Batteriespeicher, Lastmanagement und Stromhandel dem kurzfristigen Ausgleich von Stromnachfrage und -angebot. Der saisonale Ausgleich erfolgt im Wesentlichen durch die Erzeugung und Rückverstromung von Wasserstoff sowie durch die Nutzung der großen Speicherkraftwerke in Skandinavien und in den Alpen. Im Vergleich zu heute können durch Stromexporte in diese Länder die Speicherstände – insbesondere im Sommer und Herbst – geschont werden und somit im Winter mehr Strom zur Verfügung stellen.

Abbildung 10: Nettostromerzeugung und Importsaldo

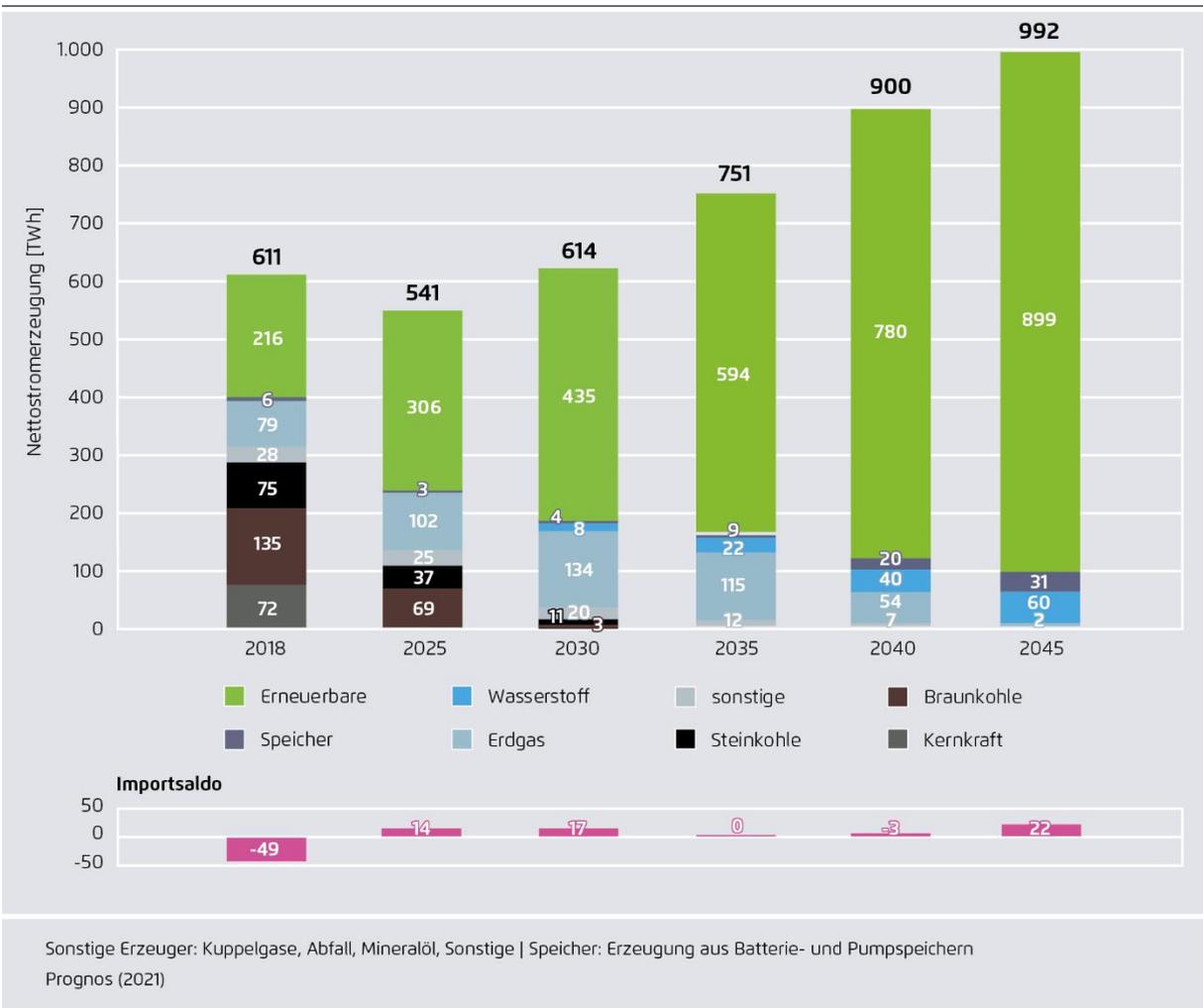
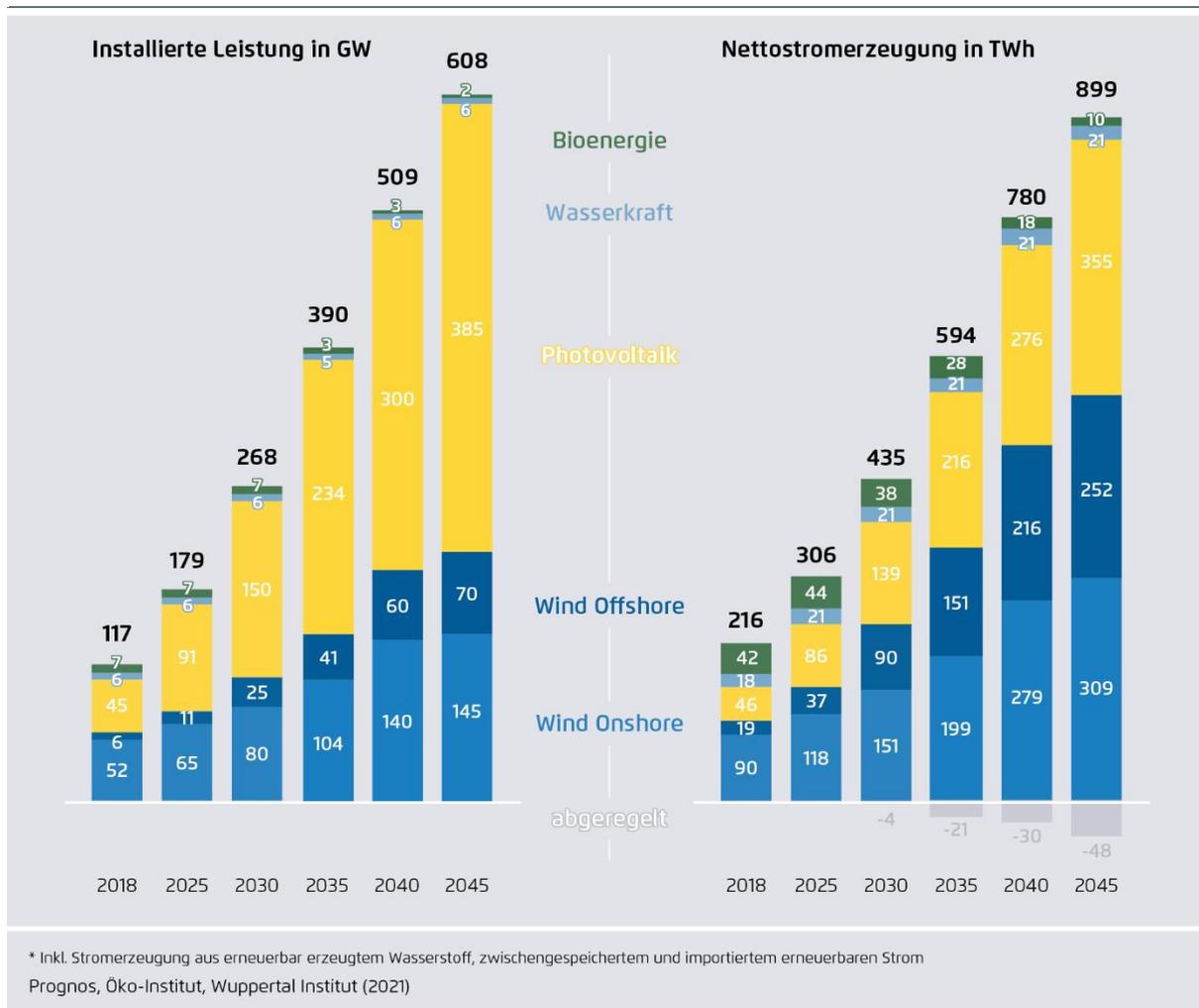


Abbildung 11: Erneuerbare Energien



Drei Hebel der Beschleunigung: Hebel 3 – Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff

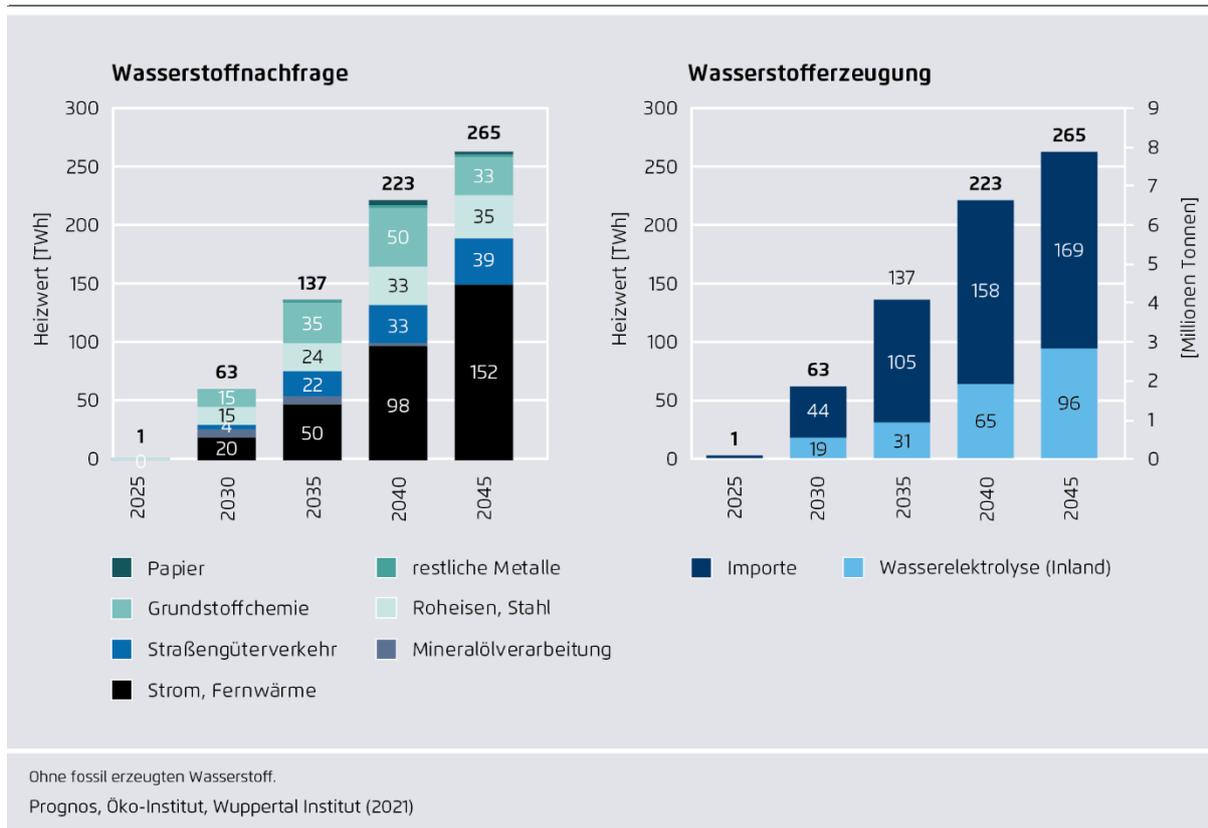
Der im Vergleich zum Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ frühere und stärkere Einsatz von Wasserstoff ermöglicht neben der Elektrifizierung das schnellere Erreichen der Klimaneutralität. Die Wasserstoffnachfrage liegt deshalb im Jahr 2045 um 40 Terawattstunden höher und beträgt dann in etwa 265 Terawattstunden. Davon werden 36 Prozent in Deutschland hergestellt. Der restliche Wasserstoff wird importiert.

Die Einsatzbereiche für Wasserstoff ändern sich gegenüber dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ nicht. Der größte Teil entfällt auf die Stromerzeugung, die zum Teil auch in Kraft-Wärme-Kopplung erfolgt. Deshalb basiert auch ein Teil der Fernwärme auf Wasserstoff. Im Bereich der Objektbeheizung wird Wasserstoff aus Kostengründen weiterhin nicht eingesetzt.

In der Industrie dient Wasserstoff vorwiegend zur Direktreduktion von Eisenerz für eine CO₂-freie Stahlherstellung, als Rohstoff in der Grundstoffchemie und zur Erzeugung von Prozessdampf.

Im Verkehr werden knapp 40 Terawattstunden Wasserstoff überwiegend im schweren Güterkehr eingesetzt. Genutzt wird der Wasserstoff in den Brennstoffzellen von Last- und Sattelzügen, nur in geringen Anteilen auch in leichteren Nutzfahrzeugen.

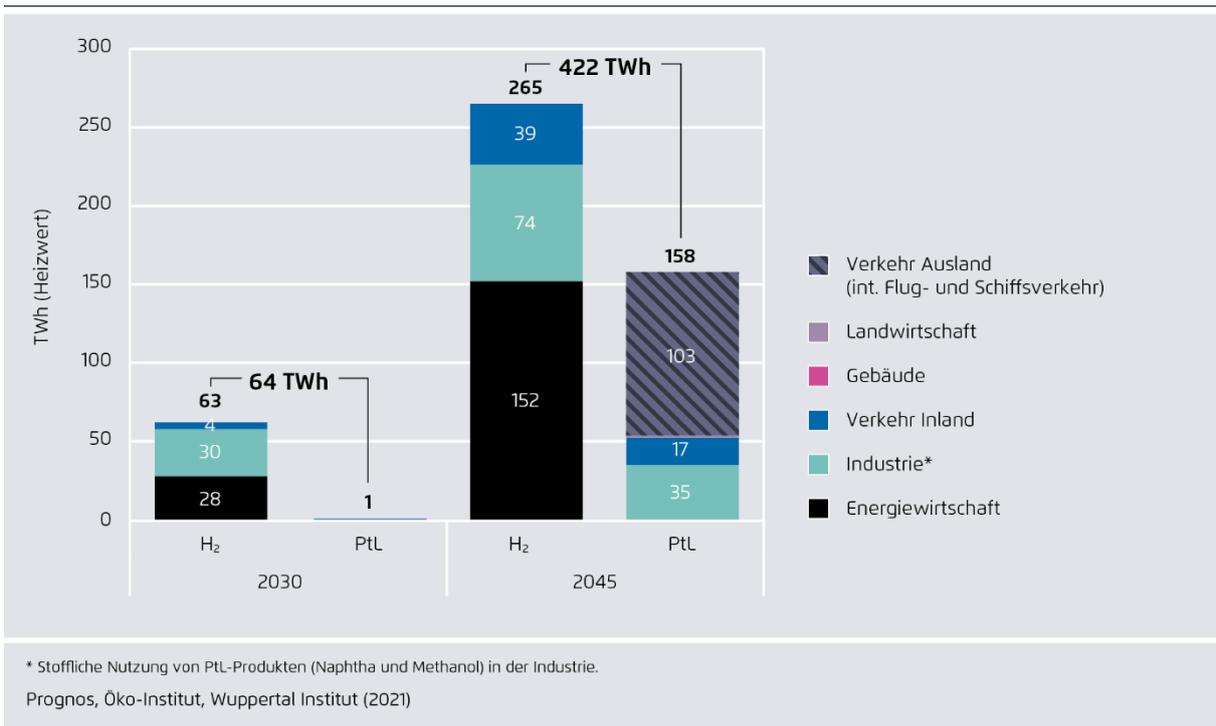
Abbildung 12: CO₂-freie Wasserstofferzeugung und -nutzung in Deutschland



Neben Wasserstoff werden auch weitere synthetische Energieträger eingesetzt. CO₂-neutrale Power-to-Liquid-Kraftstoffe werden vorwiegend im nationalen und internationalen Schiffs- und Flugverkehr verwendet, in geringem Umfang auch noch im Straßenverkehr für die im Bestand verbleibenden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Grünes Naphtha wird in der Industrie dann stofflich genutzt, wenn die organischen Grundstoffe nicht ausreichend durch die verstärkte Kreislaufwirtschaft bereitgestellt werden können. Strombasierte Brennstoffe und grünes Naphtha werden nicht in Deutschland hergestellt, sondern importiert, in Summe etwa 160 Terawattstunden.

Insgesamt ergibt sich für 2045 ein Bedarf an Wasserstoff und sonstigen synthetischen Brennstoffen und Feedstocks in Höhe von 422 Terawattstunden, von denen 326 Terawattstunden importiert werden.

Abbildung 13: Wasserstoff- und Power-to-Liquid-Einsatz (PtL)



2 Methodik und Rahmenannahmen

2.1 Zielsetzung der Studie

Die im Jahr 2020 veröffentlichte Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“¹ geht von dem durch den Bundestag beschlossenen Ziel aus und fragt, wie sich der Weg zur Klimaneutralität bis 2050 in einer ökonomisch tragfähigen Strategie beschreiben lässt. Klimaneutral bedeutet, dass die Treibhausgasemissionen in allen Bereichen vollständig oder fast vollständig vermieden und die Restemissionen durch negative Emissionen, also die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre und anschließende Ablagerung, ausgeglichen werden. In der Studie Klimaneutrales Deutschland 2050 wurde bereits gezeigt, dass die Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 65 Prozent gegenüber 1990 ein ambitioniertes, aber erreichbares Zwischenziel für Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität ist.

In dieser Studie soll in einem weiteren Szenario (KN2045) untersucht werden, ob Deutschland bereits bis zum Jahr 2045 Treibhausgasneutralität erreichen kann. Auf die hierzu notwendigen Entwicklungen und wesentlichen Stellgrößen setzt auch die Studie Klimaneutrales Deutschland 2045 für den Zeitraum bis 2030 unverändert auf. Die aktuelle Studie zeigt, dass auf Basis der bereits sehr anspruchsvollen Zielstellung einer 65-prozentigen Treibhausgasreduktion bis zum Jahr 2030 anschließend in allen Sektoren eine beschleunigte Transformation möglich und notwendig ist.

2.2 Treibhausgas-Emissionsminderungsziele

In der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ wurde die bisherige Entwicklung der deutschen und europäischen Klimapolitik und -gesetzgebung ausführlich dargestellt und für das Jahr 2030 Zwischenziele zur Erreichung der Klimaneutralität diskutiert. Für Deutschland ergab sich unter Berücksichtigung unterschiedlicher Emissionsminderungsvorgaben für die von der *Effort Sharing Regulation* (ESR) und dem *Emissions Trading System* (ETS) regulierten Bereiche im Szenario Klimaneutral 2050 (KN2050) ein mögliches nationales Emissionsminderungsziel in Höhe von 65 Prozent Einsparung gegenüber 1990.

Auch in dieser Studie wird im Szenario Klimaneutral 2045 (KN2045) der Pfad einer 65-prozentigen Emissionsreduzierung zwischen den Jahren 1990 und 2030 als Grundlage verwendet.

2.3 Methodik

Die Sektoren Verkehr, Landwirtschaft, Abfall und LULUCF wurden vom Öko-Institut federführend bearbeitet, der Industriesektor vom Wuppertal Institut, der Gebäudesektor und die Energiewirtschaft von Prognos. Die Gesamtprojektleitung wurde ebenfalls von Prognos übernommen.

¹ Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland - In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals, Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität

Die methodische Herangehensweise ist gegenüber der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ unverändert. Die Szenarien berücksichtigen die Treibhausgasemissionen sämtlicher Sektoren. Nicht nur die energiebedingten Emissionen, sondern auch die oft vernachlässigten Sektoren Landwirtschaft, Abfall und Landnutzung werden detailliert betrachtet, ebenso wie Methan- und Lachgasemissionen bei der Nutzung von Biomasse sowie andere kleine Emissionsquellen. Weiterhin werden Senken, also die Kohlenstoffaufnahme durch Wälder und Böden, zwar nachrichtlich ausgewiesen, aber nicht als Beitrag zum Klimaschutz angerechnet. Hierzu sind Datenlage und Prognosen in diesem Bereich zu ungenau und es besteht aktuell eher die Gefahr, dass Wälder und Böden aufgrund des Klimawandels in den nächsten Jahrzehnten zu CO₂-Quellen statt -Senken werden. Die Bilanzierung der Treibhausgase erfolgt auf Basis der Bestimmungen der Nationalen Inventarberichte gemäß der Klimarahmenkonvention (UNFCCC). Dementsprechend wird für alle Treibhausgase das Treibhausgaspotenzial über einen Zeithorizont von 100 Jahren (GWP100) aus dem vierten Sachstandsbericht (AR4) des IPCC zugrunde gelegt.

Die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ untersucht, ob mit einer beschleunigten, umfassenden Nutzung klimafreundlicher Technik und einer starken Klimapolitik die Klimaneutralität bereits im Jahr 2045 erreicht werden kann. Es wird untersucht, ob die Transformation des Energiesystems schneller erfolgen kann als im Szenario KN2050.

Deshalb wurden die im Szenario KN2050 herausgearbeiteten Maßnahmen und deren Effekte im Szenario KN2045 nochmals im Hinblick auf die für den Zeitraum nach 2030 vorgesehene schnellere Umsetzung überprüft und bewertet. Für die Auswahl der notwendigen Maßnahmen zur Zielerreichung im Szenario KN2045 ist das Hauptkriterium nach wie vor die Wirtschaftlichkeit. Maßnahmen mit geringeren CO₂-Vermeidungskosten werden in der Regel bevorzugt. Berücksichtigt werden vor allem Technologien mit geringen technischen und wirtschaftlichen Risiken. Der zusätzliche Einsatz von CCS für die schnellere Zielerreichung wird minimiert, wo immer möglich, werden alternative Technologien verwendet.

Dabei werden in der Studie keine weitergehenden Verhaltensänderungen in Form von Konsum einschränkungen unterstellt. Allerdings werden heute erkennbare Trends zu Konsumänderungen stärker berücksichtigt, beispielsweise beim Markthochlauf von Fleisch- und Milch-Alternativen und synthetischem Fleisch.

Die sektorale Abgrenzung erfolgt analog zur Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“:

i

Sektorale Abgrenzung

Die Abgrenzung der Sektoren in dieser Studie basiert auf der Einteilung nach dem Klimaschutzgesetz. Es werden sieben Sektoren unterschieden:

Energiewirtschaft

In der Energiewirtschaft bildet die öffentliche Stromversorgung inklusive der Einspeisung von Wärme ins das öffentliche Wärmenetz den größten Bereich. 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 Leckagen ist ebenfalls enthalten. Nicht zur

Energiewirtschaft zählen hingegen 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. Des Weiteren werden hier auch die Emissionen abgebildet, die sich aus der Nutzung von Produkten ergeben. 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 gewerblicher Prozesse.

Verkehr

Im Verkehrssektor werden entsprechend der Inventarlogik nur die Treibhausgasemissionen bilanziert, die direkt durch die Fahrzeugnutzung erzeugt werden (Tank-to-Wheel). Andere indirekt dem Verkehr zuzuordnende Emissionen, wie der Energieaufwand für die Fahrzeugproduktion oder Batterieherstellung, die Stromerzeugung für die Elektromobilität und den Schienenverkehr sowie die Emissionen bei der Herstellung von Kraftstoffen, auch 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 z.B. die Verdauung der Wiederkäuer und Stickstoffprozesse in den Böden entstehen. Die CO₂-Emissionen, die aus der landwirtschaftlichen Nutzung von Mooren stammen, werden im LULUCF Sektor bilanziert. Zudem werden nach dem Klimaschutzplan der Bundesregierung auch die energiebedingten Emissionen des Landwirtschaftssektors hinzugezählt. Diese umfassen den Wärmebedarf von Gewächshäusern, Stallungen, Trocknung und Gebäuden, als auch den Kraftstoffeinsatz 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.

Nachrichtlich: 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, wie beispielsweise 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. In dieser Studie werden die Emissionen nur nachrichtlich ausgewiesen.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die den Sektoren zugeordneten CRF-Kategorien.

Tabelle 1: Abgrenzung der Sektoren erfolgt nach dem Klimaschutzplan

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)

2.4 Rahmendaten

Die zentralen demografischen und wirtschaftlichen Variablen für die Entwicklung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen sind die Bevölkerungszahl, die Zahl der Haushalte, das Bruttoinlandsprodukt (BIP), die Bruttowertschöpfung (BWS) sowie die Zahl der Erwerbstätigen. Hinzu kommen die Heiz- und Kühlgradtage sowie die Energie- und CO₂-Preise. Tabelle 2 fasst die wichtigsten Annahmen für den Zeitraum bis 2050 zusammen. Dabei handelt es sich um die gleichen Annahmen wie in der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ für das Szenario KN2050. Zu beachten ist, dass die zu erwartenden positiven Rückwirkungen der zusätzlichen Investitionen aus dem beschleunigten Strukturwandel auf die Wirtschaftsleistung nicht betrachtet wurden.

Tabelle 2: Rahmendaten

		2016	2020	2030	2040	2045	2050
Bevölkerung	Mio.	83	83	83	81	80	79
Haushalte	Mio.	41	42	43	43	43	43
Erwerbstätige	Mio.	44	*	42	40	40	39
Energiepreise (Grenzübergang)							
Rohöl	USD ₂₀₁₉ /Barrel	42	40	62	59	57	55
Erdgas	EUR ₂₀₁₉ /MWh (Hs)	15	12	20	21	22	22
Steinkohle	EUR ₂₀₁₉ /MWh (Hs)	8	7	8	8	8	8
EU-ETS	EUR ₂₀₁₉ /t	5	25	52	70	80	90
Heizgradtagszahl		3.407	3.375	3.343	3.223	3.164	3.104
Kühlgradtagszahl		165	168	177	186	190	193

Eigene Berechnungen Prognos, WEO 2019 (*aufgrund der Corona-Effekte keine belastbare Schätzung für 2020)

Die Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung in Deutschland basieren auf der 14. Bevölkerungsvorausberechnung und unterstellen jeweils eine moderate Entwicklung bei der Geburtenhäufigkeit, der Lebenserwartung sowie der Zu- und Abwanderung. Die Bevölkerungszahl verringert sich demnach ab 2016 von 83 Millionen Einwohnerinnen und Einwohnern um fünf Prozent auf 79 Millionen im Jahr 2050. Die Anzahl der Haushalte steigt bis 2045 auf 43 Millionen. Auslöser für den Anstieg ist die weiterhin sinkende durchschnittliche Haushaltsgröße. Die Zahl der Erwerbstätigen sinkt ab 2020 kontinuierlich von geschätzt 45 Millionen über 42 Millionen im Jahr 2030 bis 2045 auf 40 Millionen. Dieser Rückgang begründet sich vor allem durch die demografische Entwicklung. Die Bevölkerungszahl nimmt ab und die Bevölkerung altert, sodass sich die Anzahl der Personen im Erwerbsalter verringert.

Gemessen am Bruttoinlandsprodukt steigt die reale Wirtschaftsleistung zwischen 2016 und 2050 durchschnittlich um rund 1 Prozent pro Jahr. Unberücksichtigt sind bei dieser Annahme die

volkswirtschaftlich positiven Effekte der stärkeren Investitionstätigkeit für den schnelleren Strukturwandel im Szenario KN2045.

Die Energiepreise (Grenzübergang) für Rohöl, Erdgas und Steinkohle basieren auf dem *Sustainable Development* Szenario des World Energy Outlooks 2019.

Die Preisentwicklung für den EU-ETS wurde für das Szenario KN2045 aus dem Szenario KN2050 übernommen. Im Rahmen der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ wurden Annahmen zur notwendigen Minderung des ETS-Sektors bei verschärften Gesamtzielen getroffen und mit Hilfe von Modellberechnungen der europäischen Stromerzeugung dann die CO₂-Kosten berechnet. Im Zeitraum bis 2035 ergibt sich der ETS-Preis dabei primär durch die Verdrängung der Kohleverstromung durch Erdgas. Für das Jahr 2050 orientiert sich der Preispfad am EU-Reference-Szenario 2016 und steigt auf 90 Euro₂₀₁₉/t. Es wurde nach wie vor unterstellt, dass ein Teil der Minderungen im industriellen Teil des ETS, wie beispielsweise der Einsatz von Wasserstoff bei der Stahlproduktion, nicht nur durch den EU-ETS-Preis, sondern auch durch flankierende Maßnahmen wie Förderprogramme ausgelöst werden. Diese Minderungen entlasten den ETS und führen zu dem relativ geringen Zertifikatspreis. Für den Zeitraum nach 2030 besteht eine größere Unsicherheit über den ETS-Preis, da unklar ist, inwieweit zukünftige Minderungen der Industrie hauptsächlich über den EU-ETS-angereizt werden oder andere Maßnahmen.

Analog zum Szenario KN2050 wird für KN2045 eine Klimaerwärmung unterstellt. In der Folge werden die Winter-, aber auch die Sommermonate im Mittel der Jahre wärmer. Dadurch verringert sich der Bedarf nach Raumwärme im Winter, während der Bedarf nach Klimakälte zur Kühlung der Gebäude im Sommer steigt. Über die Heiz- bzw. Kühlgradtagszahlen kann der Einfluss der Jahreswitterung auf den Wärme- bzw. den Kühlbedarf eines Gebäudes berechnet werden. Die unterstellte Entwicklung der Gradtagszahlen wurde abgeleitet aus einer Studie im Auftrag des UBA (2008). Die Gradtagszahlen sinken im Zeitverlauf um 10 Prozent, von 3.407 im Jahr 2016 auf 3.104 (2050). Die Anzahl der Kühlgradtage steigt hingegen von 165 (2016) bis auf 193 im Jahr 2050. Grundlage für diese Abschätzung sind Angaben der EU-Kommission (EU-COM, 2016).

3 Ergebnisse Szenario Klimaneutral 2045 (KN2045)

3.1 Energiewirtschaft

3.1.1 Zielbild und Ausgangslage

Die meisten Treibhausgasemissionen werden in Deutschland durch den Sektor Energiewirtschaft verursacht. Im Jahr 2018 entfielen mit 305 von 858 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten mehr als ein Drittel der gesamten Treibhausgasemissionen auf die Erzeugung von Strom und Fernwärme in öffentlichen Kraftwerken sowie auf die Herstellung von Kohle- und Mineralölprodukten.

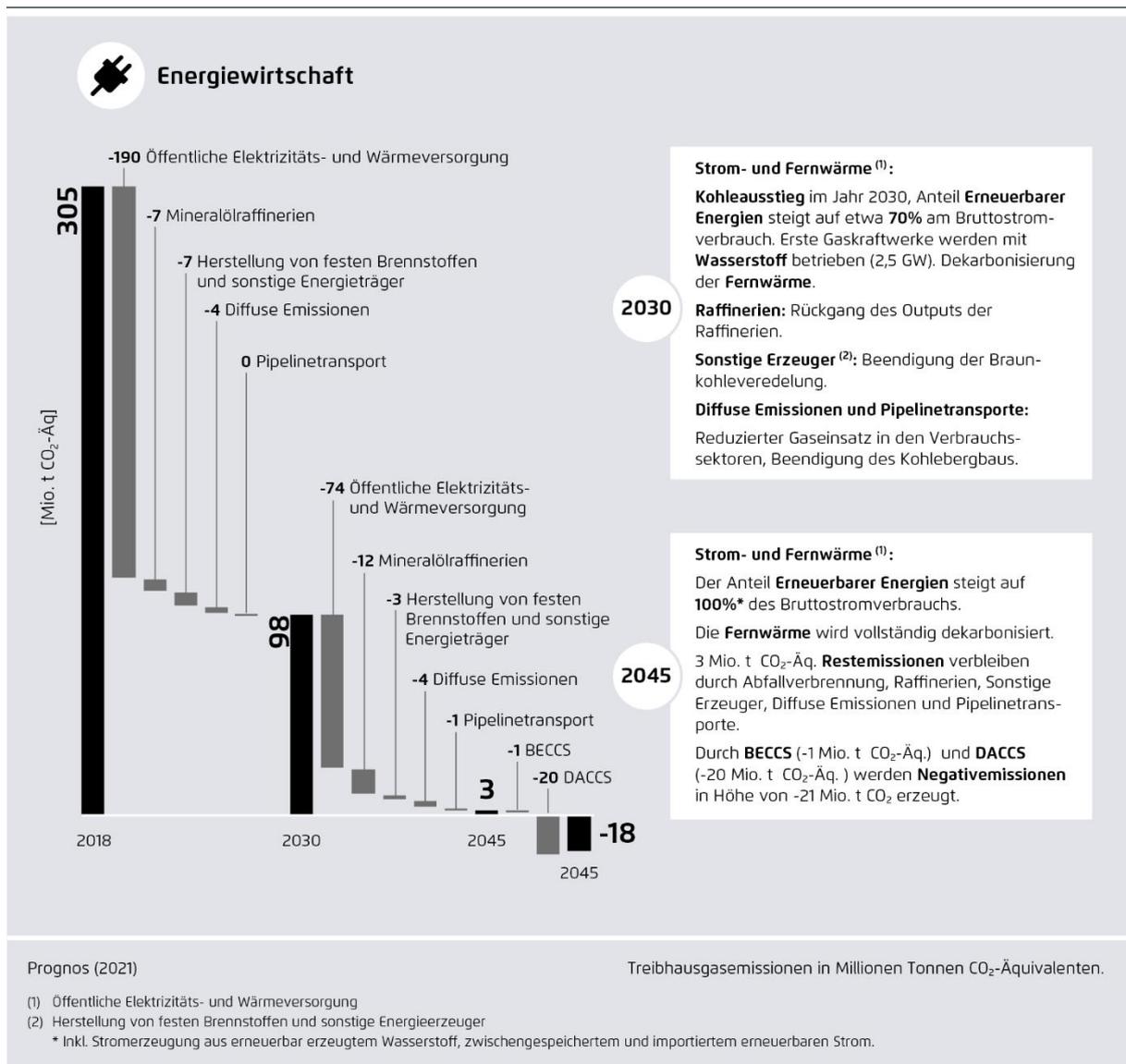
Die Energiewirtschaft kann im Vergleich zu den anderen Sektoren bis zum Jahr 2030 durch die starke Reduktion des Einsatzes von Kohle zur Strom- und Fernwärmeerzeugung den größten Minderungsbeitrag leisten. Der Ersatz von Kohlestromerzeugung durch erneuerbare Energien und temporär auch Erdgas ist gleichzeitig auch eine der kostengünstigsten CO₂-Vermeidungsoptionen.

Mit einem Ausbau Erneuerbarer Energien im Stromsektor und in den Wärmenetzen, der Beendigung der Kohleverstromung sowie einem Einstieg in die Wasserstoffnutzung in Gaskraftwerken können die Emissionen bis zum Jahr 2030 von heute 305 auf 98 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente gedrittelt werden. Die zentralen Maßnahmen hierfür sind in Abbildung 14 dargestellt.

Zwischen 2030 und 2045 werden die Erneuerbaren Energien im Szenario KN2045 weiter ausgebaut und die Stromerzeugung aus fossilem Erdgas wird vollständig durch Wasserstoff ersetzt. Flankiert werden diese Maßnahmen wie im Szenario KN2050 durch den Ausbau von Batteriespeichern und anderen Flexibilitätsoptionen wie beispielsweise das intelligente Laden von Elektrofahrzeugen. Dies ist erforderlich, um Stromnachfrage und -angebot zu jeder Zeit in Einklang zu bringen. Die Systemdienstleistungen werden langfristig zu größeren Anteilen durch Erneuerbare Energien, Speicher und die Stromverbraucher erbracht. Ein Teil wird auch langfristig durch – zunehmend mit Wasserstoff gefeuerte – Gaskraftwerke übernommen.

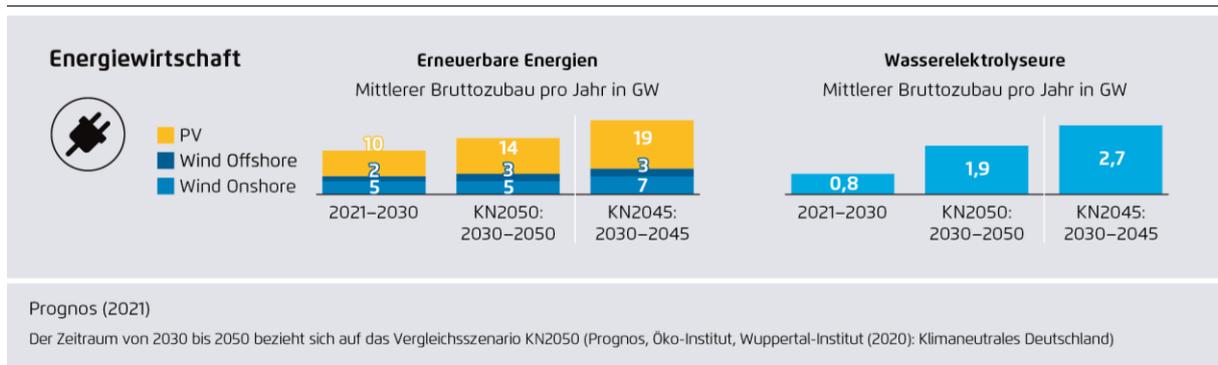
Die Energiewirtschaft leistet auch einen Beitrag zur Kompensation von nicht vermeidbaren Restemissionen in anderen Sektoren. Die Kompensation erfolgt in der Energiewirtschaft einerseits durch die Abscheidung und Speicherung der Emissionen aus den Abgasen der Biomassefernhwerke und Heizkraftwerke. Andererseits wird CO₂ aus der Luft gefiltert und anschließend dauerhaft gespeichert (vgl. Kapitel 3.7, Direct Air Capture and Storage - DACCS).

Abbildung 14: Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft



Gegenüber dem Szenario KN2050 wird im Szenario KN2045 der Umbau der Energiewirtschaft um fünf Jahre beschleunigt. Notwendig ist hierfür vor allem ein stärkerer Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Wasserstoffherzeugung vor Ort.

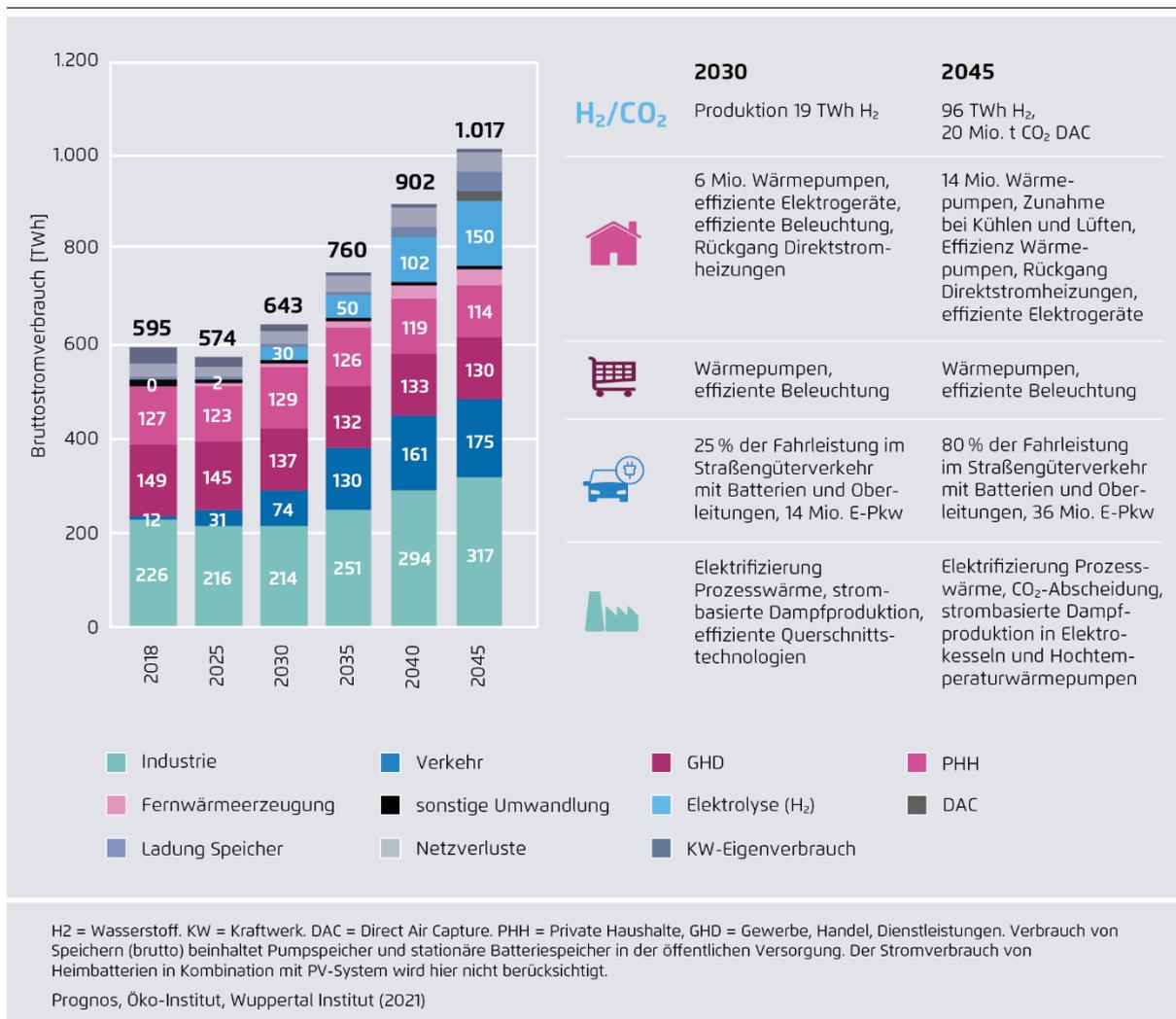
Abbildung 15: Umsetzungsgeschwindigkeit in der Energiewirtschaft in den Szenarien KN2050 und KN2045



3.1.2 Stromnachfrage

Im Vergleich zum Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ beschleunigt sich ab 2030 die Elektrifizierung und die Produktion von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff. Damit steigt der Strombedarf bis zum Jahr 2045 auf etwa 1.000 Terawattstunden. Der Stromverbrauch im Jahr 2045 liegt dann etwa 400 Terawattstunden höher als heute und 130 Terawattstunden über dem Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“. Von dem Anstieg des Stromverbrauchs bis 2045 entfallen etwa 160 Terawattstunden auf den Verkehr, 150 Terawattstunden auf die Wasserstoffherstellung und etwa 90 Terawattstunden auf die Industrie. Leicht rückläufig entwickelt sich der Stromverbrauch im Gebäudesektor. Effizienzverbesserungen bei Elektrogeräten, Beleuchtung und der Ersatz von Nachtspeicherheizungen und Elektroboilern sparen mehr ein, als die Wärmepumpen verbrauchen.

Abbildung 16: Bruttostromverbrauch



Im Szenario KN2045 werden in Deutschland im Jahr 2030 bereits 6 Millionen Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Bis zum Jahr 2045 steigt die Anzahl auf 14 Millionen, ein Ausbaustand, der im Szenario KN2050 erst fünf Jahre später erreicht wird. Elektrogeräte und die Beleuchtung werden immer effizienter. Einsparungen lassen sich auch durch die Umstellung von ineffizienten Nachtspeicherheizungen erzielen, von denen heute immer noch mehr als eine Million im Einsatz sind. Wärmepumpen benötigen – je nach Dämmung des Hauses und Vorlauftemperatur – nur ein Drittel der Strommenge für die gleiche Wärmebereitstellung. Zusammen mit einer besseren Dämmung von Häusern mit Wärmepumpe führen diese Entwicklungen dazu, dass sich der Strombedarf der Haushalte kaum verändert und im GHD-Sektor sogar langfristig sinkt.

Strom spielt auch im Verkehrssektor in Zukunft eine zentrale Rolle. Im Jahr 2030 werden mehr als 14 Millionen E-PKW (inkl. Plug-in-Hybride) auf den Straßen fahren. Auch der Schwerlastverkehr wird elektrifiziert – über Batteriesysteme und Oberleitungen auf den Autobahnen. Im Szenario KN2045 macht die direkte Stromnutzung im Jahr 2045 dann rund drei Viertel des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors aus (vgl. Kapitel 3.4).

Im Industriesektor steigt der Strombedarf bis zum Jahr 2030 durch die Elektrifizierung der Bereitstellung von Prozesswärme und den Einstieg in die strombasierte Dampfbereitstellung. Dieser Entwicklung stehen Einsparungen durch eine Effizienzsteigerung bei den Querschnittstechnologien, wie Ventilatoren und Pumpen, entgegen. Zwischen 2030 und 2045 steigt der Strombedarf im Szenario KN2045 in der Industrie um rund 100 Terawattstunden. Auslöser sind die weitere Zunahme der strombasierten Dampfproduktion in Elektrokesseln sowie der Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen. Weitere Faktoren für den zunehmenden Stromverbrauch sind die steigende Produktion von Sekundärstahl und die CO₂-Abscheidung und Gasifizierung von Biomasse.

Auch im Umwandlungssektor wird in Zukunft mehr Strom eingesetzt. Für die Erzeugung von 96 Terawattstunden erneuerbar erzeugtem Wasserstoff im Jahr 2045 werden 150 Terawattstunden Strom benötigt. Zudem wird langfristig ein Drittel der Fernwärme mit Hilfe von Strom bereitgestellt. Für die Filterung von 19 Millionen Tonnen CO₂ aus der Luft (Direct Air Capture and Storage) werden zusätzlich rund 20 Terawattstunden benötigt. Damit steigt der Bruttostromverbrauch bis 2050 auf knapp über 1.000 Terawattstunden.

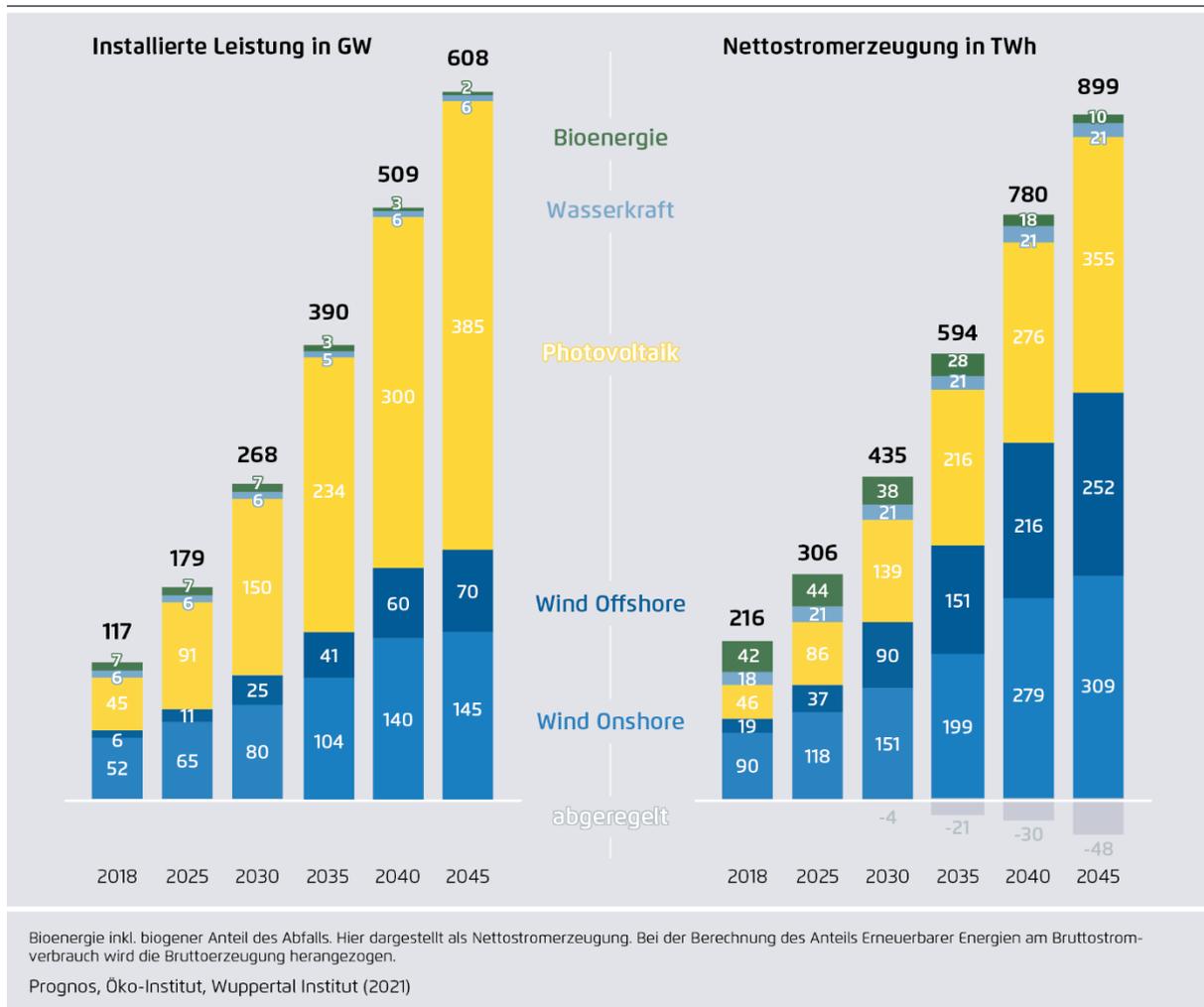
3.1.3 Stromerzeugung

Das Stromsystem basiert in diesem Szenario bereits 2045 zu 100 Prozent auf Erneuerbaren Energien. Die erneuerbare Stromerzeugung aus Windenergie, Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse deckt im Jahr 2045 88 Prozent des Stromverbrauchs direkt ab, 7 Prozent entfallen auf Gaskraftwerke, die aus Erneuerbaren Energien erzeugten Wasserstoff als Brennstoff nutzen. Die restlichen 5 Prozent werden hälftig durch zwischengespeicherten und importierten erneuerbaren Strom gedeckt.

Im Vergleich zur Vergangenheit beschleunigt sich der Ausbau der Photovoltaik und Windenergie. In der Dekade bis 2030 beträgt der mittlere jährliche Bruttozubau 10 Gigawatt bei Photovoltaik, 4,5 Gigawatt bei Wind an Land und knapp 2 Gigawatt bei Offshore-Wind. Im Vergleich zum Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2050“ fällt in diesem Szenario der Zubau nach 2030 auch höher aus, da zum einen die Stromnachfrage höher ist und bereits fünf Jahre früher eine CO₂-freie Stromerzeugung benötigt wird. Im Jahr 2045 liegt die installierte Leistung der Photovoltaik 70 Gigawatt höher, Wind an Land 17 Gigawatt und Wind Offshore 9 Gigawatt.

Die Stromerzeugung des Szenarios ergibt sich aus der installierten Leistung und den angenommenen Volllaststunden. Die in den Szenarien verwendeten Volllaststunden berücksichtigen technische Entwicklungen bei der Windenergie, insbesondere die Größe und Anlagenhöhe, die Standorte sowie ertragsmindernde Effekte durch Verschattung, Redispatch und aus anderen Gründen temporär notwendige Abschaltungen und Leistungsreduktionen. Im Vergleich zu anderen Studien ergeben sich damit für 2045 vergleichsweise niedrige Volllaststunden von 2.200 bei Onshore-Windenergie und etwa 3.700 im Offshore-Bereich. Letztere können auch nur mit einer relativ niedrigen Bebauungsdichte erreicht werden, da auch Offshore-Windparks sich untereinander durch Effekte wie Windverschattung und Wirbelbildung beeinflussen können (Agora 2020). Aus diesem Grund müsste ein Teil der 70 Gigawatt voraussichtlich außerhalb der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) installiert werden.

Abbildung 17: Erneuerbare Energien

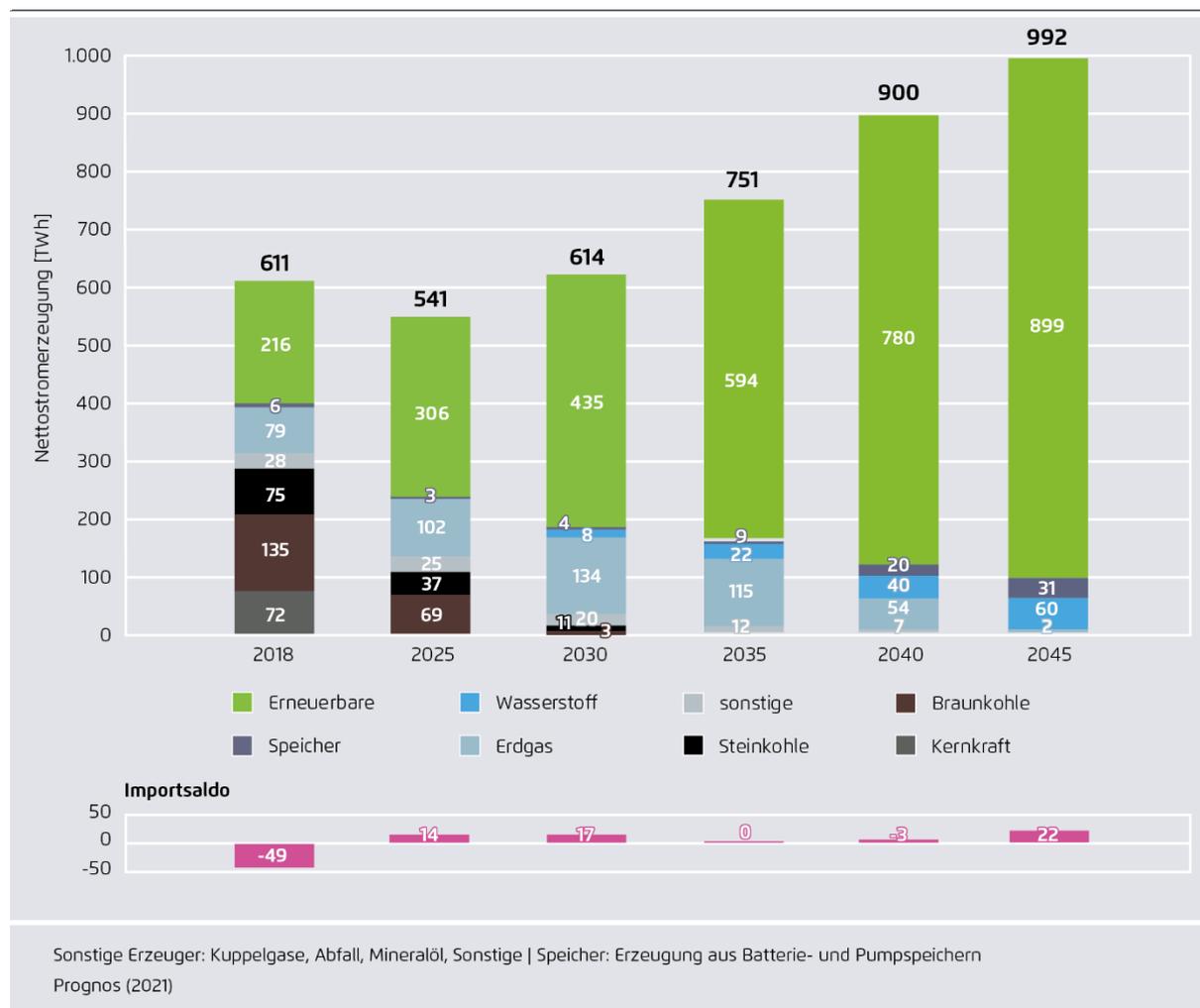


Die resultierende Nettostromerzeugung wird in Abbildung 18 dargestellt. Für das Jahr 2030 wird mit 435 Terawattstunden Erneuerbarer Stromerzeugung, eine Verdopplung gegenüber dem Wert von 2018 erzielt. Bis zum Jahr 2045 steigt der Wert auf 899 Terawattstunden. Der Anteil Erneuerbarer Energien am steigenden Bruttostromverbrauch kann somit von rund 38 Prozent im Jahr 2018 auf 69 Prozent im Jahr 2030 und 100 Prozent im Jahr 2045 gesteigert werden. Trotz zunehmender Flexibilität des Stromsystems kann ein Teil der Leistungsspitzen der volatilen Erzeugung Erneuerbarer Energien nicht integriert werden. Mit fortschreitendem Ausbau steigt die abgeregelte Strommenge auf 48 Terawattstunden im Jahr 2045, dieses entspricht rund 6 Prozent der Gesamterzeugung.

Essenziell für die Dekarbonisierung des Stromsektors ist ein rasches Auslaufen der Kohleverstromung. Der steigende Preis für CO₂-Zertifikate in Kombination mit niedrigen Erdgaspreisen führt in diesem Szenario dazu, dass die bis dahin verbliebenen Kohlekraftwerke Ende der 2020er-Jahre wirtschaftlich unter Druck geraten und vom Netz gehen. Im Szenario KN2045 steigt bis zum Jahr 2030 die Stromerzeugung aus Erdgas von heute rund 80 Terawattstunden auf etwa 130 Terawattstunden. Erste Gaskraftwerke werden mit Wasserstoff betrieben. Rund 20 Terawattstunden Wasserstoff werden in Gaskraftwerken etwa 2,5 Gigawatt Kraftwerksleistung eingesetzt, um

damit Strom und Fernwärme zu produzieren. Nach 2030 geht die jährliche Erzeugung aus brennstoffbasierten Kraftwerken weiter zurück. Durch den starken Ausbau von Erneuerbaren Energien, kombiniert mit Speichernutzung und flexiblen Endverbrauchern sinkt die Erzeugung aus brennstoffbasierten Kraftwerken von heute rund 400 Terawattstunden (ohne Bioenergie) auf 60 Terawattstunden im Jahr 2045. Erdgas wird bis dahin vollständig durch Wasserstoff ersetzt.

Abbildung 18: Nettostromerzeugung und Importsaldo



3.1.4 Installierte Leistung und Flexibilität des Stromsystems

Voraussetzung für ein stabiles Stromsystem ist, dass zu jeder Zeit Stromnachfrage und Stromangebot im Einklang stehen. Mit zunehmender Einspeisung aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien und dem Rückgang konventioneller Kraftwerksleistung sind neue Flexibilitätsoptionen gefragt.

Die technischen Lösungen aus dem aktuellen Szenario KN2045 entsprechen dabei denen des Szenarios KN2050, sie werden allerdings im Szenario KN2045 beschleunigt ausgebaut und umgesetzt, um mit dem schnelleren Ausbau der Erneuerbaren Energien Schritt zu halten. So wird

das Lastmanagement in der Industrie weiter ausgebaut, um den Stromverbrauch zeitlich zu verlagern. Dies ermöglicht einerseits, kurzzeitige Lastspitzen zu mindern und andererseits, Erzeugungsspitzen Erneuerbarer Energien besser zu nutzen.

Parallel hierzu wird die Leistung an Speichern deutlich erhöht. Hierzu zählen sowohl zentrale Batteriespeicher als auch Heimspeicher in Kombination mit PV-Anlagen in Haushalten sowie den Strommarktsignalen folgende Anteile der E-Fahrzeuge und Haushalte. Dies sind beispielsweise Autos oder Wärmepumpen, die ihren Strom- beziehungsweise Wärmespeicher flexibel - gesteuert über den Strompreis und damit vom Stromangebot und vom Netzzustand - laden oder aufheizen. Diese Speicher tragen mit ihrem Potenzial zum Lastmanagement entscheidend zur Integration der erneuerbaren Stromproduktion und auch zur Reduktion der Residuallastspitzen bei.

Eine weitere Säule der Absicherung des gesamteuropäischen Stromsystems bildet der Ausbau der Austauschkapazitäten zwischen den Ländern. Er bildet die Grundlage für einen überregionalen Stromaustausch und die Nutzung von Pumpspeicherkapazitäten in Nachbarländern zum Lastausgleich. Für den längerfristigen Ausgleich sind regelbare Kraftwerkskapazitäten notwendig.

Im Szenario KN2045 wird wie im Szenario KN2050 angenommen, dass das europäische Ausland aufgrund nationaler oder EU-weiter Ziele ebenfalls Klimaneutralität anstrebt und dementsprechend seine Stromerzeugung klimaneutral gestaltet. Dies verhindert eine sonst mögliche Verlagerung von THG-Emissionen durch Stromimporte. Der Stromaustausch zwischen den einzelnen europäischen Ländern wurde mit einer stündlichen Auflösung modellendogen simuliert.

Aufgrund der Beendigung der Kohleverstromung geht die regelbare Kraftwerksleistung bis 2030 von heute rund 97 Gigawatt auf rund 66 Gigawatt zurück. Zur Deckung der Residuallast und zur Leistungsabsicherung des Stromsystems muss die Leistung regelbarer Gaskraftwerke mittelfristig deutlich ausgebaut werden. Erforderlich für den Ersatz der wegfallenden Kapazitäten aus Kernkraft und Kohle sind bis 2030 rund 20 Gigawatt und im Szenario KN2045 bis 2045 weitere 30 Gigawatt in Gaskraftwerken. Ab 2030 wird der Sekundärenergieträger Wasserstoff in einem Teil der Gaskraftwerke mit einer elektrischen Leistung von zusammen rund 2,5 Gigawatt mit steigenden Anteilen eingesetzt, so dass 2045 Erdgas zur Verstromung vollständig durch Wasserstoff abgelöst ist. Dieser Prozess läuft im Szenario KN2045 schneller als im Szenario KN2050, in dem der Ersatz von Erdgas erst im Jahr 2050 erreicht wird. Dabei kommen entsprechend den Modellergebnissen in beiden Szenarien Gasmotoren-, Gasturbinen- und GuD-Kraftwerke zum Einsatz. Brennstoffzellenkraftwerke werden aus Kostengründen nicht errichtet.

Abbildung 20 zeigt den modellierten stündlichen Einsatz der Stromerzeugung und der Stromnachfrage in Deutschland am Beispiel einer Winter- und Sommerwoche des Jahres 2045.

Abbildung 19: Flexibilitäten zur Leistungsabsicherung

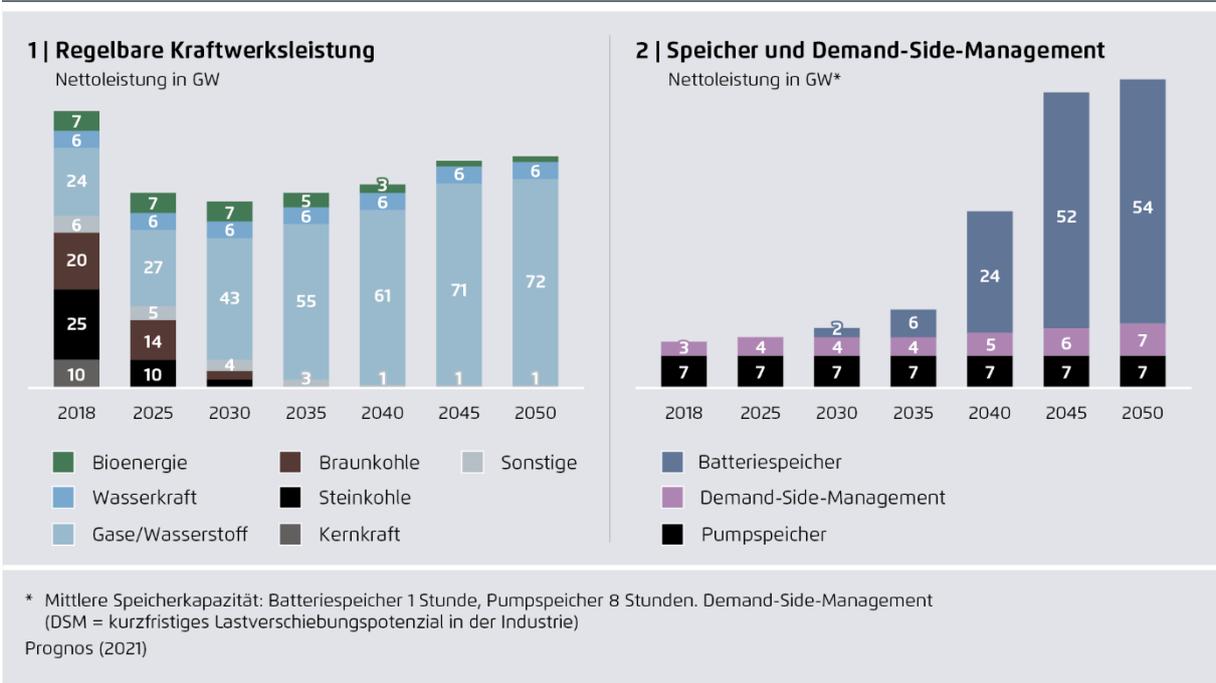
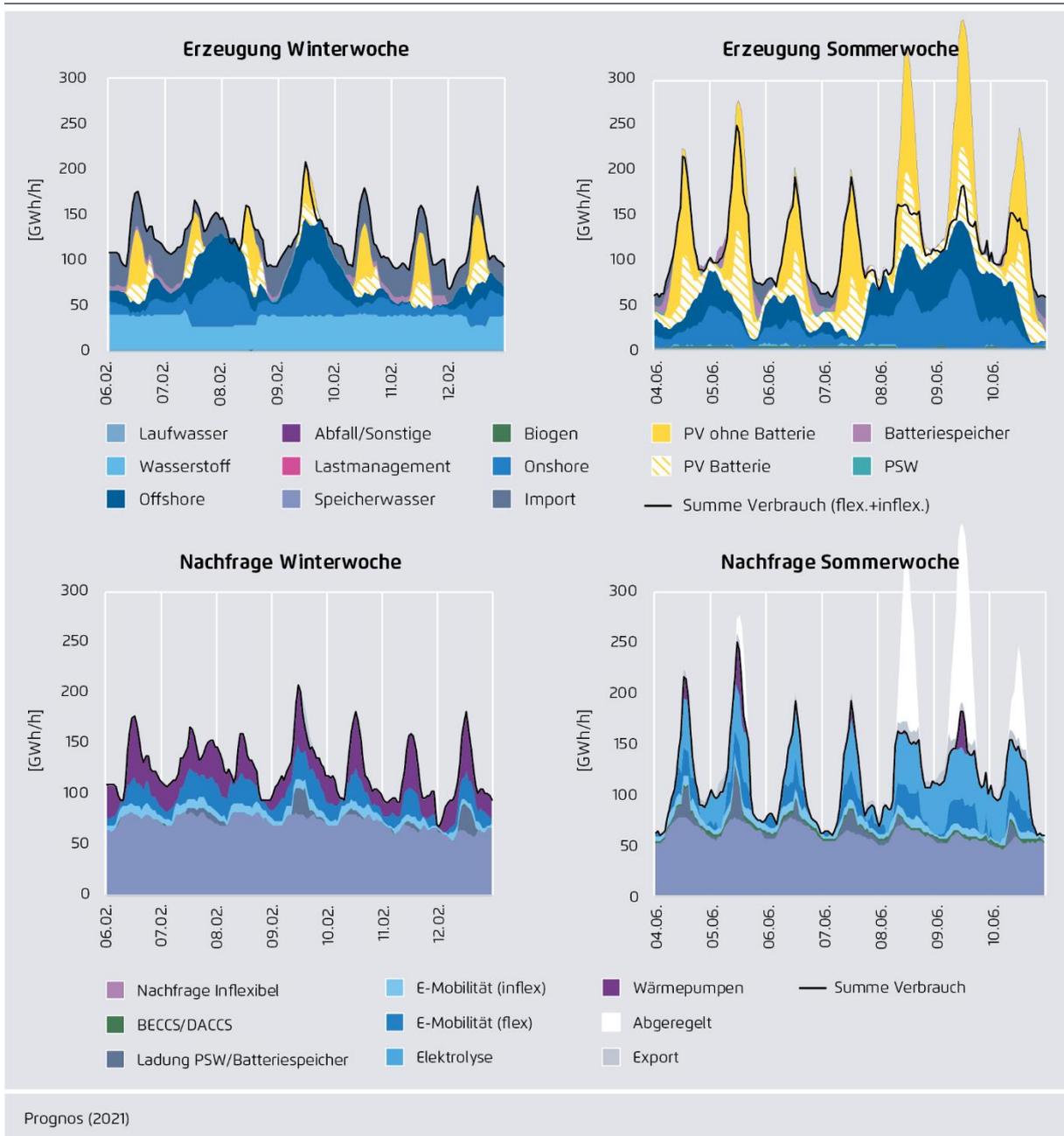
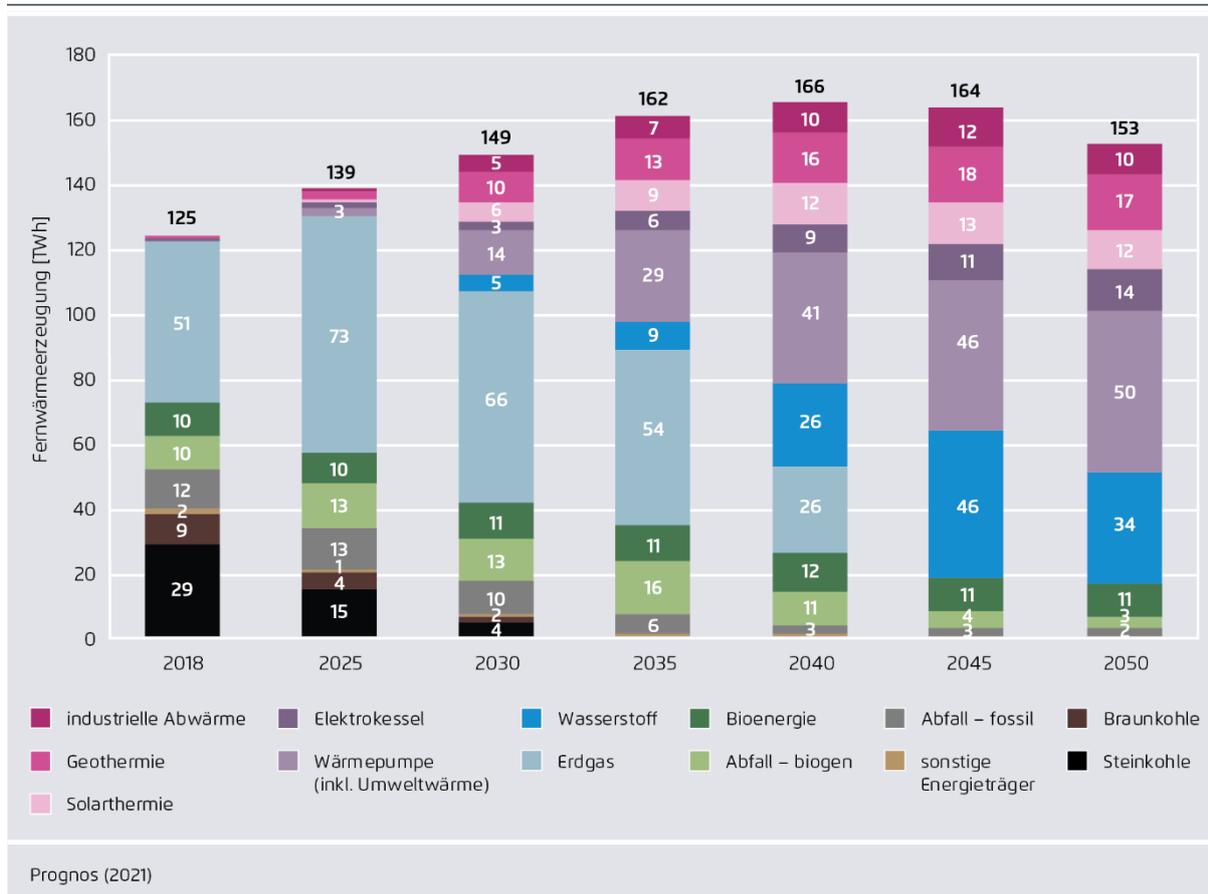


Abbildung 20: Flexibilität des Stromsystems 2045



3.1.5 Fernwärmeerzeugung

Abbildung 21: Fernwärmeerzeugung



Die Dekarbonisierung betrifft auch die Erzeugung von Fernwärme. In urbanen Räumen werden Wärmenetze stark ausgebaut, die notwendige Fernwärmeerzeugung steigt bis in die Mitte der 2030er-Jahre kontinuierlich. Die hohe Zahl der Neuanschlüsse überkompensiert in diesem Zeitraum den sanierungsbedingten Rückgang des Wärmebedarfs der einzelnen versorgten Gebäude. Die Struktur der Fernwärmeerzeugung ändert sich im Zeitverlauf deutlich, da mit dem Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2030 auch die Fernwärmeerzeugung dieser Kraftwerke verschwindet. Analog zur höheren Stromerzeugung der Erdgaskraftwerke steigt zunächst auch die Fernwärmeerzeugung aus Erdgas-KWK-Anlagen. Allerdings geht der Einsatz von Erdgas nach 2035 deutlich zurück, ein Teil wird durch Wasserstoff ersetzt. Ab 2030 werden die ersten wasserstoffgefeuerten KWK-Anlagen in Betrieb genommen. Im Szenario KN2045 decken Heizwerke und Heizkraftwerke mit Wasserstoffeinsatz bereits im Jahr 2045 etwa ein Viertel der Fernwärmeerzeugung und ersetzen so vollständig den Einsatz von Erdgas. Im Szenario KN2050 wird der vollständige Ersatz des Erdgases in der Fernwärmeerzeugung erst im Jahr 2050 erreicht.

Der Markthochlauf bei neuen Wärmeerzeugern wie der tiefen Geothermie, Solarthermie, Elektrokesseln und Großwärmepumpen kommt nach 2020 ins Rollen. Von heute etwa einem Prozent Erzeugungsanteil steigt der Anteil dieser Technologien bis 2030 auf 22 Prozent. Langfristig steigt

ihr Anteil im Szenario KN2045 auf über 60 Prozent. Die Nutzung von Abwärme steigt ebenfalls. Auch hier erwartet das Szenario KN2045 einen schnelleren Markthochlauf als das Szenario KN2050.

Der Beitrag der Bioenergie bleibt im Zeitverlauf konstant. Die genutzten Biomassen ändern sich aber. Der sinkende Anteil von Biogas wird durch höhere Holzmengen ausgeglichen.

3.1.6 Mineralölraffinerien

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 der Verarbeitung der Raffinerien als Nebenprodukt an und werden ebenfalls stofflich in vielfältiger Weise genutzt. Diese Produkte spielen aus heutiger Sicht eine eher untergeordnete Rolle in der Nachfrage. Zu nennen sind hier insbesondere das im Straßenbau genutzte Bitumen, das rund 2 Prozent der Mineralölnachfrage ausmacht. Weitere Produkte werden als Schmierstoffe genutzt (1 Prozent der Mineralölnachfrage) oder sie finden, wie beispielsweise Petrolkoks (0,2 Prozent), Verwendung in der Aluminiumproduktion.

Bis zum Jahr 2030 geht die Nachfrage nach Mineralölprodukten auf rund 56 Prozent des Wertes von 2018 zurück. Da die Raffinerien auf diesen Nachfragerückgang reagieren, sinkt die Produktion analog.

Im Szenario KN2045 kommt die Mineralölverarbeitung in Deutschland bis 2045 vollständig zum Erliegen. Der Grund hierfür ist der vollständige Rückgang der Nachfrage nach fossilen Mineralölprodukten, sowohl bei der energetischen Verwendung als auch bei der Nachfrage der chemischen Industrie nach Naphtha. Ab 2045 kommt in der chemischen Industrie nur noch importiertes strombasiertes Naphtha zum Einsatz. Im Szenario KN2050 wird dieser vollständige Umstieg auf „grünes“ Naphtha erst im Jahr 2050 erreicht. „Grünes“ Naphtha wird per Fischer-Tropsch-Synthese aus erneuerbarem Strom und aus der Luft abgeschiedenem Kohlendioxid gewonnen. Bei seiner Produktion fallen jedoch Produkte mit längeren Kohlenstoffketten wie Bitumen oder Petrolkoks nicht an.

Heute fallen diese längererkettigen Produkte nur als Nebenprodukte in der Koppelproduktion der Raffinerien an. Deshalb ist es unwahrscheinlich, dass hierfür eigene Produktionsanlagen bestehen bleiben, die ausschließlich diese Produkte bereitstellen. Im Szenario KN2045 wurden analog zum Szenario KN2050 keine expliziten Annahmen hinsichtlich der zukünftigen Bereitstellung dieser Produkte getroffen. Die Nachfrage nach Schmierstoffen wird aufgrund des Rückgangs an Verbrennungsmotoren bis 2045 einerseits stark abnehmen, andererseits lassen sich Schmierstoffe sowohl biogen als auch per Fischer-Tropsch-Synthese herstellen. Petrolkoks für die Anoden könnte auch aus biogenen Rohstoffen hergestellt werden.

Aus heutiger Sicht ist die Herstellung von Bitumen nicht über die Fischer-Tropsch-Synthese möglich. Zwar kann davon ausgegangen werden, dass die Nachfrage nach Bitumen langfristig zurückgeht, da Recycling, der Bau haltbarer Straßen und die Möglichkeit zur Beimischung von Zuschlagsstoffen den Bedarf reduzieren. Dennoch wird auch langfristig ein Bedarf an Bitumen bestehen bleiben. Als Möglichkeiten bieten sich hier zum einen der Abbau von Naturbitumen an, zum anderen wäre auch eine Produktion in Spezialraffinerien denkbar, die schweres

bitumenhaltiges Rohöl einsetzen und zur Produktion dieser Produkte optimiert werden. In diesem Fall dürften die anfallenden Leicht- und Mitteldestillate jedoch nur treibhausgasneutral verwendet werden. Hierfür ist beispielsweise der Einsatz von CCS bei der Verbrennung denkbar.

3.2 Industrie

3.2.1 Zielbild und Ausgangslage

Im Jahr 2018 trug die Industrie insgesamt 23 Prozent zu den deutschen Treibhausgasemissionen bei, wobei 70 Prozent der industriellen Treibhausgasemissionen in den Grundstoffindustrien anfiel (Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019). Aufgrund der für die Verarbeitung von Rohstoffen nötigen energieintensiven Hochtemperaturprozesse sowie des Auftretens von prozessbedingten Emissionen in einigen Produktionsprozessen stehen die Grundstoffindustrien zudem mit Blick auf eine Reduktion von Treibhausgasemissionen vor besonders großen Herausforderungen. Bei der Erstellung des Szenarios KN2045 wurden daher die emissionsintensiven Branchen (Stahl, Grundstoffchemie, Zement, Kalk, Nichteisenmetalle, Glas, Gießereien sowie Zellstoff, Papier und Pappe) sehr detailliert untersucht.

Im Szenario KN2045 ist Deutschland auch zukünftig ein bedeutender Standort für Grundstoffe wie Stahl, Grundstoffchemikalien und Zement und meistert die Transformation der Grundstoffindustrien hin zur Klimaneutralität. Klimaneutralität wird in der Industrie in gleicher Weise wie im Szenario KN2050 durch Effizienzmaßnahmen, einen weitgehenden Umstieg auf erneuerbare Energieträger (Strom, Wasserstoff, biogene Energieträger), innovative Produktionsrouten wie die Herstellung von Roheisen in Direktreduktionsanlagen und chemisches Recycling sowie den Einsatz von CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) erreicht. Gegenüber dem Szenario KN2050 wurden der Ausstieg aus fossilen Energieträgern und der Ausbau des CO₂-Netzes beschleunigt (s. Abbildung).

Langfristig, nach 2040, erreicht die Industrie durch den gezielten Einsatz von biogenen Energieträgern in Kombination mit CCS sogar negative Emissionen. Hierfür sind aufgrund ihrer räumlich hoch konzentrierten Energiebedarfe insbesondere die Standorte der chemischen Industrie und der Stahlindustrie geeignet.

Abbildung 22: Umsetzungsgeschwindigkeit in der Industrie in den Szenarien KN2050 und KN2045

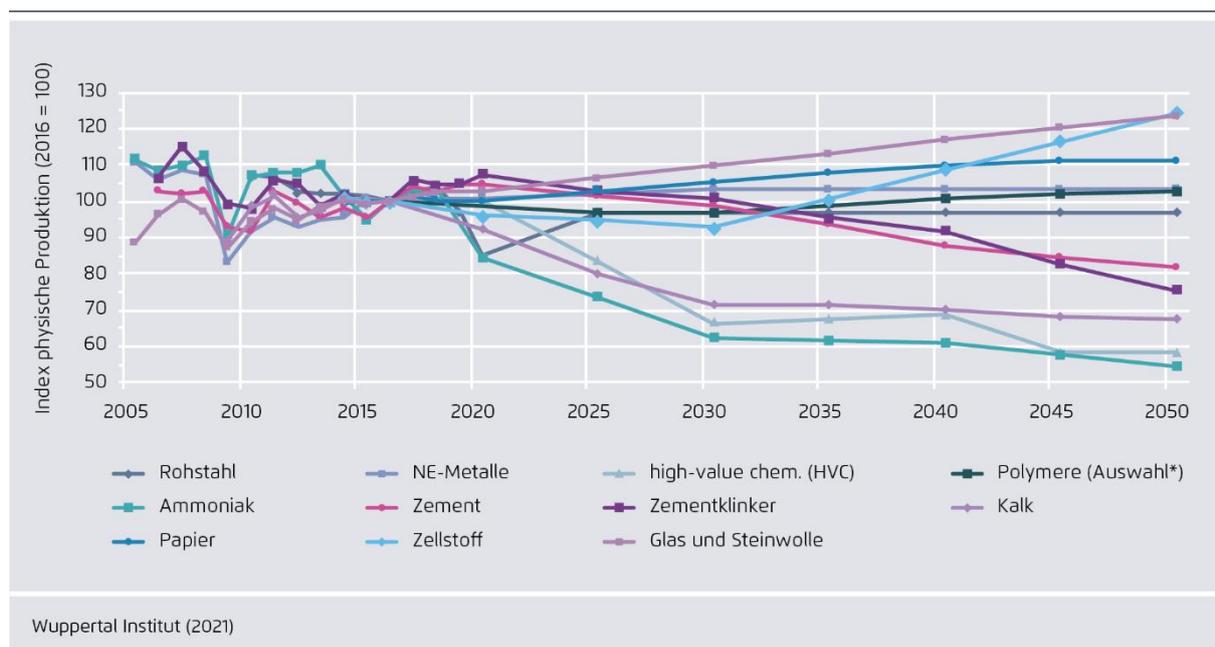


3.2.2 Entwicklung der Produktionsmengen

Die deutsche Industrie kann sich im Szenario KN2045-Szenario auf eine für die meisten Grundstoffe auch zukünftig leicht steigende Nachfrage innerhalb Europas stützen. Zwar geht die Nachfrage nach Pkw als einem wichtigen Endprodukt in Europa selbst zurück, die exportorientierte deutsche Automobilindustrie kann dies aber durch Marktanteile an einer wachsenden Nachfrage nach emissionsfreien Pkw in anderen Weltregionen kompensieren. Die Bautätigkeit, als weiterer starker Treiber der Nachfrage nach Grundstoffen, steigt im Szenario zukünftig weiter an. Im hier vorliegenden Szenario wurde – abweichend vom Szenario KN2050 – eine in etwa konstante Entwicklung der Verpackungsnachfrage innerhalb der EU bis zum Jahr 2050 unterstellt, was gegenüber dem Szenario KN2050 zu einer um 25 Prozent niedrigeren Nachfrage in diesem Segment führt. Die Nachfrage nach Kunststoffen zur Verarbeitung in langlebigen Gütern steigt im Szenario KN2045 (ebenso wie im KN2050) weiter, so dass die Kunststoffnachfrage insgesamt im Szenario weiter wächst.

Die relative Entwicklung einzelner Produktionsmengen in Deutschland zeigt die folgende Abbildung.

Abbildung 23: Produktionsmengenentwicklung für energie- und kohlenstoffintensive Produkte



Im Szenario KN2045 gehen wir unverändert davon aus, dass sich die Rohstahlproduktion langfristig auf dem Niveau vor der Coronakrise (d. h. auf dem Niveau von 2019) stabilisiert. Wichtige Standortvorteile sind neben den bereits bestehenden Anlagen zur Sekundärmetallurgie und zum Walzen von Rohstahl sowie das Know-how für Spezialstähle, die räumliche Nähe zu den Abnehmern und die vorhandene Logistik für den Umschlag von Massengütern wie Eisenerz.

Weit stärker in globale Wertschöpfungsketten eingebunden als die Stahlindustrie ist die chemische Industrie in Deutschland. Gleichzeitig liegen die wichtigen deutschen Standorte alle im Binnenland und stehen bereits heute unter starkem wirtschaftlichem Druck. Im Bereich der

Plattformchemikalien finden deshalb Ersatz- oder Erweiterungsinvestitionen schon heute außerhalb Deutschlands statt. Da dies mit grundlegenden Wettbewerbsfaktoren (wie dem günstigen Zugang der Hafenstandorte zum Weltmarkt) zusammenhängt, geht das Szenario KN2045² – davon aus, dass sich dieser Trend mittelfristig sogar noch etwas verstärken wird. Ein Auslöser hierfür ist, dass die deutschen Standorte mit anstehenden Raffinerieschließungen einen Teil ihrer regionalen Rohstoffbasis verlieren werden. Die Simulationsrechnungen zeigen, dass die deutschen Standorte bei der Grundproduktion von Plattformchemikalien mittelfristig Anteile an die europäischen Küstenstandorte (vor allem Antwerpen und Rotterdam) abgeben werden, da diese sich leichter auf mittelfristig attraktivere Feedstocks³ umstellen lassen. Die vorhandene Pipeline-Infrastruktur für Feedstocks in Nordwesteuropa und bereits bestehende grenzüberschreitende Lieferketten innerhalb der Unternehmen (BASF, INEOS, Shell, Covestro, Lanxess, Dow) erleichtern eine solche Restrukturierung und sichern andererseits mittelfristig die Feedstock-Basis für die deutschen Standorte im Binnenland. Damit können diese „Verbundstandorte“ auch zukünftig ihren Wert behalten und die Produktion von Polymeren bleibt in Deutschland auf einem stabilen Niveau. Aufgrund der Fokussierung der deutschen Industrie auf die Herstellung von spezielleren „engineering plastics“ zum Einsatz in hochwertigen Gütern (Automobil, Bau) wirkt sich die gegenüber dem KN2050 niedrigere Verpackungskunststoffnachfrage auf das Volumen der Kunststoffproduktion in Deutschland nicht aus, sondern stärkt die relative Wettbewerbsfähigkeit der Standorte gegenüber dem Szenario KN2050.

Der Markt für Düngemittel in Europa geht im Zuge der im Szenario KN2045 angenommenen Veränderungen in der Landwirtschaft zurück. Rückläufig ist in diesem Szenario daher auch die Produktion der entsprechenden Grundstoffe (Ammoniak, Salpetersäure). Ein zunehmender Nettoimport von Ammoniak oder Düngerprodukten wurde nicht angenommen.

Zement bleibt im Szenario KN2045 ein überwiegend regional gehandeltes Produkt. Die für Deutschland erwartete weiter steigende Bautätigkeit stützt den Absatz deutscher Zementwerke. Zement, Zementklinker und Beton werden allerdings zukünftig effizienter eingesetzt, indem Bauteile bei gleicher Leistungsfähigkeit mit weniger Beton hergestellt und die Betonzusammensetzung und die Wahl der Zementart besser auf den Einsatzzweck abgestimmt werden. Trotz steigender Wertschöpfung im Betonbau geht die Tonnage daher beim Zementabsatz nach 2030 zurück.

Andere emissionsintensive Industrien wie Zellstoff und Papier, Aluminium oder Glas wachsen im Szenario KN2045 zukünftig noch leicht (sowohl in Bezug auf Bruttowertschöpfung als auch in Bezug auf die Tonnage), während der Absatz in der Kalkindustrie aufgrund der sinkenden Nachfrage aus dem Kraftwerkssektor und der Stahlindustrie (aufgrund niedrigerer Primärstahlanteile) rückläufig ist. Die weniger treibhausgasintensiven Industrien, die teils stark exportorientiert sind, gewinnen in Bezug auf die Bruttowertschöpfung an Bedeutung und wachsen mit 1,3 Prozent pro Jahr stärker als die Grundstoffindustrien (0,4 Prozent).

Somit behält die Industrie in Deutschland ihre wichtige ökonomische Bedeutung und trägt 2045 knapp 23 Prozent zur Wertschöpfung bei (gegenüber 24 Prozent im Jahr 2018).

² Die Simulationsrechnungen bilden Europa (EU27 + Vereinigtes Königreich, Norwegen und Schweiz) ab. Die Ergebnisse zur Investition in neue Anlagen und zur Produktion an den verschiedenen Zeitpunkten wurden durch ein Optimierungsmodell bestimmt (vgl. zum Modellansatz Schneider und Saurat 2020).

³ Die ökonomische Attraktivität von Ethan ist vor allem auf seinen günstigen Marktpreis als Kuppelprodukt der Shalegas-Förderung in den USA zurückzuführen. Auch im Hinblick auf die Emissionsintensität der Produktion ist Ethan vorteilhaft und gewinnt somit bei steigendem CO₂-Zertifikatspreis zusätzlich an Attraktivität. Langfristig werden bei der Produktion von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen Ethan und LPG als Begleitgase anfallen. Aufgrund der im Vergleich zu flüssigem Naphtha höheren Transportkosten geht das Szenario jedoch nicht davon aus, dass diese Kuppelprodukte auch langfristig (2045) den europäischen Markt dominieren.

3.2.3 Energieeinsatz und Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen der Industrie sinken wie im Szenario KN2050 bis 2030 um 36 Prozent auf 123 Mio. t CO₂-Äq, und liegen damit etwas über dem Zielniveau im aktuellen Entwurf zur Anpassung des Klimaschutzgesetzes (Reduktion auf 118 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030). Die absolut größten Minderungsbeiträge erbringen in beiden Szenarien die Stahlindustrie und die chemische Industrie. Mit 47 Prozent erbringt die Stahlindustrie auch einen sehr großen relativen Minderungsbeitrag bezogen auf ihre heutige Emissionsmenge. Dagegen bleibt der Minderungsbeitrag der Zementindustrie noch klein (siehe Näheres zu den Gründen im Brancheneinblick unten). Die anderen Mineralstoffindustrien erreichen ein Minderungsvolumen von vier Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente und die Papierindustrie von knapp zwei Millionen, was jeweils etwa 24 Prozent Minderung gegenüber 2016 entspricht. In den weniger emissionsintensiven „sonstigen Industriebranchen“ werden bis 2030 bedeutende Effizienzfortschritte erreicht. Gemeinsam mit dem Energieträgerwechsel hin zu Strom erbringt das zehn Millionen Tonnen Minderung. In den sonstigen Bereichen, zu denen auch der bauwirtschaftliche Verkehr sowie die „Produktverwendung“ zählen, werden bis 2030 elf Millionen Tonnen (51 Prozent) Minderung erreicht.

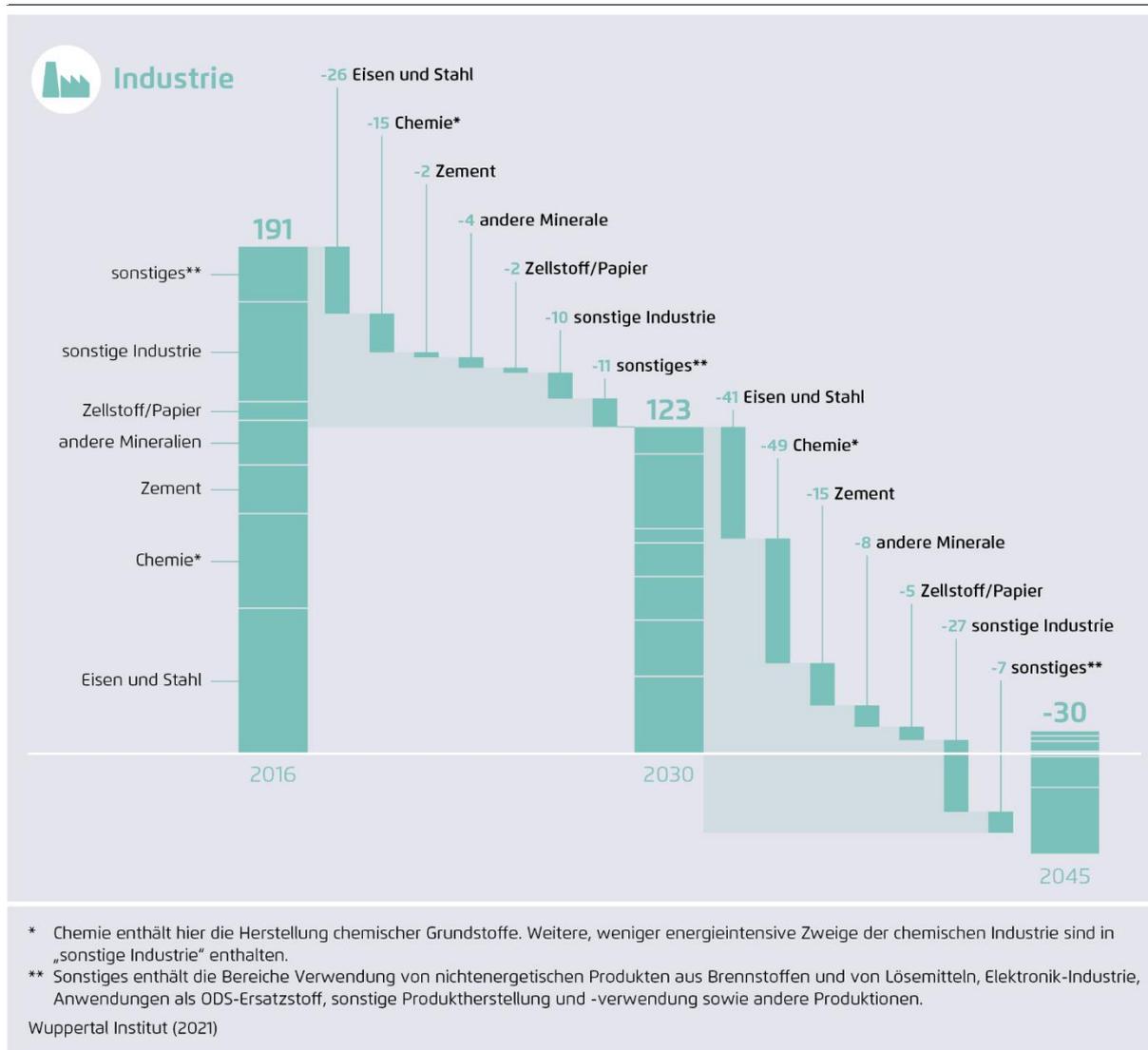
Im Zeitraum von 2030 bis 2045 mindert die Stahlindustrie im Szenario KN2045 ihre Emissionen noch einmal um 41 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente, während die chemische Industrie um 49 Millionen Tonnen mindert. Sowohl die Stahlindustrie (minus 12 Mio. t CO₂-Äq) als auch die Chemieindustrie (minus 27 Mio. t CO₂-Äq) werden damit 2045 in ihrer Treibhausgas-Emissionsbilanz netto-negativ. Die Zementindustrie erreicht im Jahr 2045 eine annähernd ausgeglichene Treibhausgasbilanz (1 Mio. t CO₂-Äq), während bei den übrigen mineralischen Industrien (Glas, Kalk) in Summe noch Treibhausgasemissionen in Höhe von fünf Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten zu Buche schlagen. Im Vergleich zum Szenario KN2050 werden die angestrebten Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen in der Industrie früher erreicht.

Prozessemissionen entstehen auch durch den Einsatz von fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen), die für spezielle Anwendungen hergestellt werden. Beispiele sind: Kältemittel, Schutzgas, Isoliergas oder Löschgas. Im Jahr 2016 betragen die F-Gas-Emissionen knapp 15 Mio. t CO₂-Äq. Durch die F-Gas-Verordnung von 2014 ist eine Minderung auf etwa 4 Mio. t CO₂-Äq bis 2030 zu erwarten. Da für fast alle Anwendungszwecke Alternativen mit keiner oder viel geringerer Treibhausgaswirkung zur Verfügung stehen, wird bis zum Jahr 2045 eine Reduktion bis auf etwa 1 Mio. t CO₂-Äq angenommen. Die Reduktion der Prozessemissionen aus dem Einsatz von F-Gasen ist im Bereich „Sonstiges“ miterfasst.

Der Sektor des Verarbeitenden Gewerbes insgesamt wird in Deutschland damit im Szenario KN2045 nach 2040 klimaneutral und verbucht im Jahr 2045 Negativ-Emissionen in Höhe von knapp 30 Mio. t CO₂-Äq.

Abbildung 24: Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Industrie

Angaben in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente

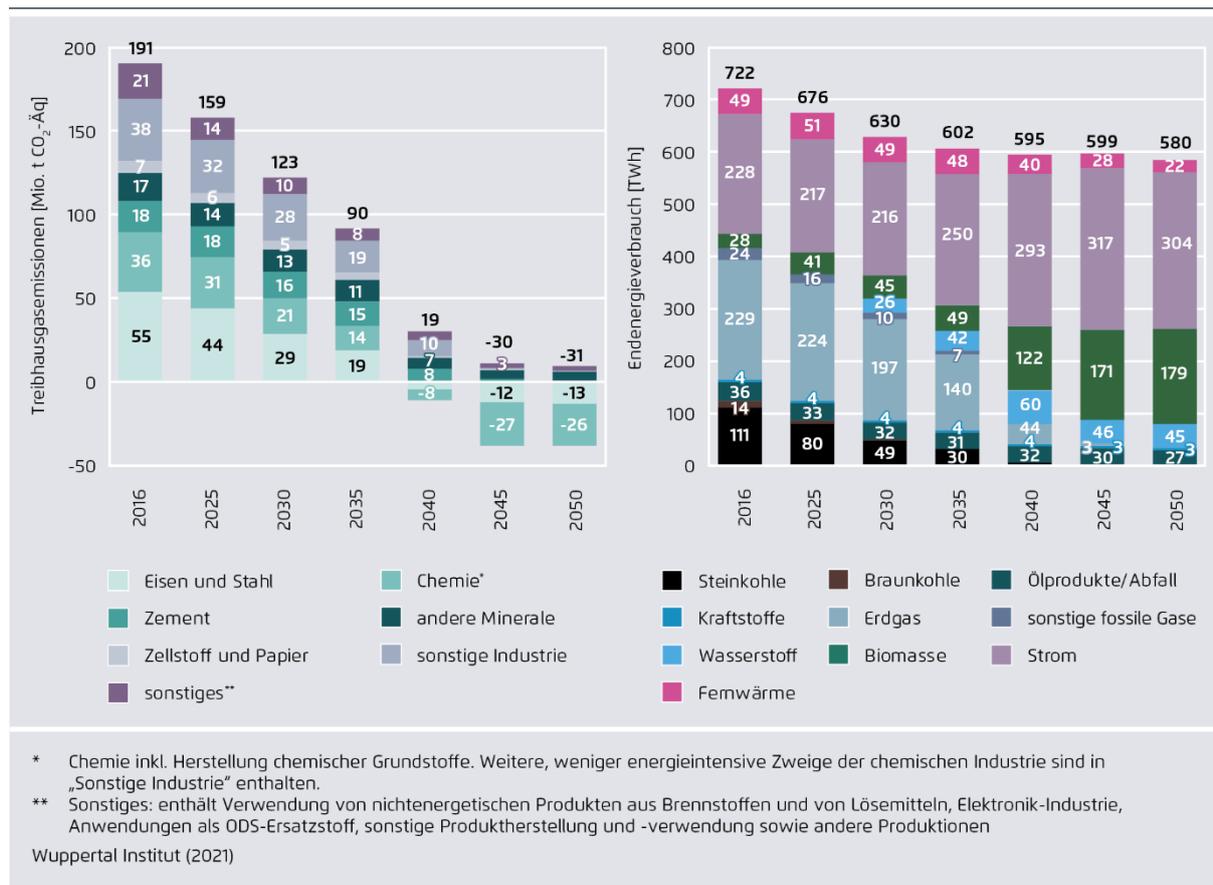


Infolge von Produktionsmengenveränderungen und steigender Effizienz sinkt der Endenergiebedarf bis 2030 um 13 Prozent (gegenüber 2016) und zwischen 2030 und 2045 noch einmal um 5 Prozent. Zudem gibt es einen zügigen Energieträgerwechsel: Kohle und Öl werden bis 2040 nahezu vollständig⁴ ersetzt. Der Erdgasbedarf in der Industrie sinkt bis 2030 vergleichsweise moderat um 14 Prozent. Im Zeitraum bis 2045 erfolgt der Ausstieg aus dem Erdgas gegenüber dem Szenario KN2050 beschleunigt, und Erdgas wird bis zum Jahr 2045 sehr weitgehend durch andere Energieträger ersetzt (es verbleiben im Szenario KN2045 im Jahr 2045 noch 3 Terawattstunden Erdgas, im Szenario KN2050 verbleiben 2045 noch 32 Terawattstunden). Strom ist 2045 der dominante Energieträger in der Industrie und baut seinen Anteil bis dahin auf etwa 53 Prozent aus. Letztendlich bleibt die zusätzliche Anwendung von Strom jedoch aufgrund der

⁴ Kleine Mengen Kohle werden im Jahr 2040 noch für metallurgische Zwecke (1 TWh) verwendet. Kohle und Öl werden im Jahr 2040 in der mineralischen Industrie noch in geringen Mengen eingesetzt (< 0,5 TWh). Diese werden jedoch in den fünf Jahren bis 2045 aus biogenen Stoffen bereitgestellt beziehungsweise durch biogene Energieträger ersetzt.

absoluten Knappheit beschränkt. Zusätzliche Anwendungsfelder für Strom liegen vor allem dort, wo er deutliche Effizienzvorteile gegenüber anderen Energieträgern aufweist, in erster Linie bei der Bereitstellung von Wärme unter 100 Grad Celsius durch Wärmepumpen. Auch in Industrieöfen wird Strom aufgrund klarer Effizienzvorteile gegenüber Wasserstoff vermehrt eingesetzt, allerdings vorwiegend in mittelständischen Unternehmen, in denen Strom bereits heute eine wichtige Rolle einnimmt. Wasserstoff, feste Biomasse, Biogas sowie Abfälle und Fernwärme sind die weiteren relevanten Energieträger im klimaneutralen Zielsystem 2045.

Abbildung 25: Treibhausgasemissionen und Endenergieverbrauch in der Industrie



CO₂-Abscheidung und -Speicherung nimmt im Szenario KN2045 eine wichtige Rolle ein: Bereits 2030 werden – wie im Szenario KN2050 – 1,2 Millionen Tonnen CO₂ an günstig gelegenen Standorten der Zementindustrie abgeschieden, abtransportiert und in geeigneten CO₂-Lagerstätten im europäischen Ausland (zum Beispiel: Niederlande, Norwegen) gespeichert. Nach 2030 werden Standorte der Primärstahlerzeugung sowie die großen Chemieparcs Schritt für Schritt an ein zukünftiges CO₂-Netz angeschlossen. Dort wird CO₂-Abscheidung gezielt mit dem Einsatz biogener Energieträger kombiniert (BECCS), um negative Emissionen zu erzielen. Gegenüber dem Szenario KN2050 erfolgt dies im Szenario KN2045 jedoch deutlich schneller. Mit dem sehr konzentrierten Einsatz von BECCS nach 2035 und einer weiter wachsenden Zahl von Netzanschlüssen steigen die jährlich eingelagerten CO₂-Mengen aus industriellen Quellen bis 2045 auf 52 Millionen Tonnen an, wovon 36 Millionen Tonnen biogenes CO₂ sind.

3.2.4 Einblicke in die Transformation der Industriebranchen

Bereits in der Studie „Klimaneutrales Deutschland“ wurden die Transformationspfade der Industrie für das Szenario KN2050 ausführlich dargestellt. Zum besseren Verständnis der grundsätzlichen Entwicklungen in diesen Branchen werden die Erläuterungen in diesen Bericht übernommen.

Auf Abweichungen zwischen den Szenarien KN2045 und KN2050, beispielsweise bei der Geschwindigkeit, in der Entwicklungsschritte durchlaufen werden, wird jeweils hingewiesen.

Stahlindustrie

Die deutsche Stahlindustrie steht vor der Herausforderung, die emissionsintensive Hochofenroute zu verlassen. Während innerhalb der EU in anderen Ländern auch alternative Wege beschrieben werden, konzentrieren sich die in Deutschland produzierenden Standorte inzwischen auf Direktreduktionsanlagen als neuen Weg zur Reduktion von Eisenoxid zu Roheisen (hier: Direct Reduced Iron, DRI). Im ersten Schritt können Direktreduktionsanlagen mit Erdgas betrieben werden, was bereits eine CO₂-Minderung von rund 66 Prozent gegenüber der Hochofenroute ermöglicht. Mittelfristig können dann ohne signifikante Umrüstung steigende Anteile an Wasserstoff beigemischt werden – so kann fossiles Erdgas sukzessive ersetzt werden.

Die voraussichtlichen Produktionskosten für DRI-Stahl auf Basis von erneuerbarem Wasserstoff liegen auch 2050 mit knapp 600 Euro pro Tonne deutlich über den heutigen Produktionskosten in der Hochofenroute (knapp 400 Euro/t). Insofern wird der Einsatz von Schrott zukünftig deutlich attraktiver werden. Durch verbessertes Produktdesign und eine bessere Sortierung (Digitalisierung) wird es möglich, mehr Schrott mit klar definierter Qualität für die Erzeugung von Qualitätsstählen einzusetzen. Dadurch kann der Anteil von Sekundärstahl an der gesamten Stahlerzeugung im Szenario in Deutschland von 28 Prozent im Jahr 2016 auf 46 Prozent im Jahr 2045 (50 Prozent im Jahr 2050) steigen. Der heutige Nettoexport von Schrott mit nachfolgendem Downcycling geht entsprechend zurück.

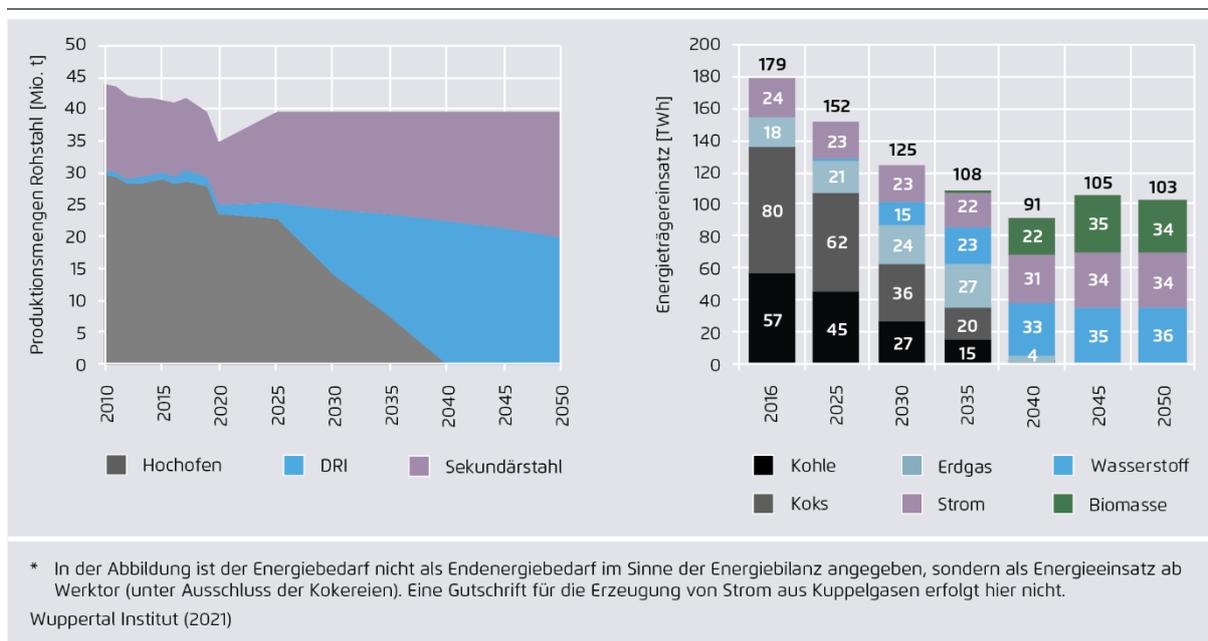
In Zukunft sind verschiedene Primärstahlrouten auf der Basis von DRI denkbar:

- Elektrolichtbogenöfen („Electric Arc Furnace“, EAF) wie sie heute schon im Rahmen des Schrott-Recyclings eingesetzt werden, ermöglichen das Aufschmelzen und die Verarbeitung von Schrott sowie DRI zu Rohstahl in einem Prozessschritt (DRI-EAF)
- Die großen deutschen Primärstahlhersteller sind heute auf Stähle im Linz-Donawitz-Verfahren (Konverterverfahren) spezialisiert. Auch hier kann DRI nach vorherigem Einschmelzen eingesetzt werden, z.B. in einem Einschmelzer wie einem „Submerged Arc Furnace“ (SAF). Hieraus ergibt sich die DRI-SAF-Konverter-Route.

Aus heutiger Sicht ist unklar, welche Rolle die EAF- und die SAF-Konverter-Route bis 2045 jeweils spielen können; eine Festlegung auf eine Route erfolgt im Szenario deshalb nicht.⁵ Die Route über die SAF benötigt weniger Strom und ermöglicht eine Weiternutzung der sehr langlebigen Konverter, während die EAF-Route weniger komplex in Bezug auf das Management von Kohlenstoffströmen und sehr flexibel in Bezug auf den Einsatz von Schrott ist.

⁵ Bei unseren Berechnungen zum Energiebedarf haben wir konservativ Werte zum DRI-Verfahren angenommen, da hierzu spezifische Werte aus der Literatur vorliegen (siehe Schneider et al. 2019 für einen Überblick).

Abbildung 26: Rohstahlproduktion nach Routen und Energieträgereinsatz* in der Eisen- und Stahlindustrie



Im Szenario werden keine Hochöfen mehr neu zugestellt, sondern stattdessen ab Mitte der 2020er Jahre alle zur Reinvestition anstehenden Hochöfen durch DRI-Anlagen ersetzt. Bis 2030 kommen in diesem Zuge elf Millionen Tonnen DRI-EAF-Kapazität mit einem Investitionsvolumen von 8,5 Milliarden Euro in den Anlagenbestand.⁶ Um mit diesen Anlagen weitgehend „grünen Stahl“ produzieren zu können und um die Investition auch gegenüber institutionellen Investoren klar als nachhaltig zu kennzeichnen, wird von Anfang an weitgehend (zu 80 Prozent, bezogen auf den Energiegehalt) Wasserstoff als Reduktionsmittel eingesetzt. Fossiles Erdgas im Umfang von 20 Prozent spielt dabei die Rolle des Kohlenstofflieferanten im Reduktionsmittel⁷ bzw. dient als Backup bei Ausfall der Wasserstoff-Versorgung.⁸

Stahlunternehmen sind bereits heute sehr erfahren im effizienten Umgang mit Hüttengasen in wechselnder Zusammensetzung. Diese Kompetenz und die Flexibilität von DRI-Anlagen in Bezug auf die Zusammensetzung des Reduktionsmittels ermöglicht es der Stahlindustrie, auch die langfristigen (metallurgischen) Herausforderungen zu bewältigen und bis 2045 sogar zur Kohlenstoffsenke zu werden. Gegenüber dem Szenario KN2050 wurde der Ersatz von fossilen Kohlenstoffträgern durch biogene beschleunigt. Neben Wasserstoff kommt im Szenario langfristig auch der Biomasse eine besondere Bedeutung zu. Als Hackschnitzel angeliefert wird sie in den Werken zu Synthesegas umgesetzt (gasifiziert). Diese Gasmischung aus Kohlenmonoxid, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid kann zum einen als biogener Kohlenstofflieferant für die metallurgischen Prozesse dienen. Zum anderen kann sie auch die benötigte Wärmeenergie zum Vorheizen von DRI und Schrott sowie zum Wiedererwärmen des Rohstahls im Zuge des Warmwalzens liefern. Bei Verbrennung des Synthesegases in einem Oxyfuel-Ofen werden hohe CO₂-Konzentrationen im Abgas erreicht, sodass eine effiziente Abscheidung und Abgabe an ein CO₂-Netz mit anschließender

⁶ Hier wurde davon ausgegangen, dass in eine wasserstoffbasierte DRI-EAF-Route investiert wird.

⁷ Der Kohlenstoff wird hier nicht zum Zweck der Reduktion selbst benötigt, sondern aus metallurgischen Gründen, zum Beispiel zur Schlackenbildung.

⁸ Im Szenario sind alle Standorte, an denen DRI produziert wird, 2030 bereits mit einer Wasserstoffpipeline verbunden.

geologischer Speicherung als Biomasse-CCS (BECCS) möglich ist. Das CO₂-Netz verbindet Deutschland über die Seehäfen mit geeigneten Offshore-Lagerstätten im europäischen Ausland.

Chemische Grundstoffe

Ein Großteil der Emissionen in der chemischen Industrie sind auf drei Bereiche zurückzuführen:

- die Spaltung von Kohlenwasserstoffen und Erzeugung so genannter Plattformchemikalien im Steamcracker,
- die Wasserstofferzeugung, in erster Linie zur Produktion von Ammoniak, sowie
- die Bereitstellung von Dampf (und Strom) durch Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) und Dampfkessel.

Die Steamcracker bilden neben der Chlor- und Ammoniakproduktion einen zentralen Ausgangspunkt für die Wertschöpfungsketten der chemischen Industrie. Ihre Hauptprodukte (Olefine und Aromaten) werden als High Value Chemicals (HVC) subsumiert und finden als sogenannte „Plattformchemikalien“ Eingang in verschiedene ein- oder mehrstufige Produktionsrouten hin zu den Polymeren. Die bisher in Europa vorherrschende Produktionsstruktur ist eine Einbettung der Steamcracker in Raffineriekomplexe und die Verwendung des von den Raffinerien destillierten Rohbenzins (Naphtha) als Feedstock für die Steamcracker. Im Zuge des Rückgangs der Produktionsmenge von Mineralölraffinerien ist absehbar eine Anpassung der Rohstoffbasis für die Plattformchemikalien vonnöten.

Die in den vergangenen Jahren in Europa installierten neuen Produktionskapazitäten (allesamt an den europäischen Küstenstandorten) verwenden als Eingangsstoffe Nebenprodukte der Schiefergasförderung – in erster Linie Ethan und Propan – und produzieren dezidiert nur ein bestimmtes Hauptprodukt wie Ethylen oder Propylen. Sie können somit sehr gut in spezialisierte Kunststoffproduktionsstandorte mit Polyethylen- oder Polypropylen-Produktion (PE beziehungsweise PP) eingebunden werden und sind in diesem Produktspektrum wettbewerbsfähiger als Standorte im Binnenland.

Als alternative Route zum Steamcracker steht für die Produktion von Olefinen zudem das Methanol-to-Olefins-Verfahren (MtO-Verfahren) zur Verfügung, das bereits heute im industriellen Maßstab verwendet wird, um Ethylen und Propylen zu erzeugen. Methanol-to-Aromatics-Verfahren (MtA) sind dagegen bisher nicht etabliert, ihre Produktausbeuten in Bezug auf die Einsatzmenge Methanol sind deutlich ungünstiger und die Anwendung des Verfahrens ist deshalb auch langfristig mit hohen Kosten verbunden (vgl. Agora Energiewende/ Wuppertal Institut 2019).

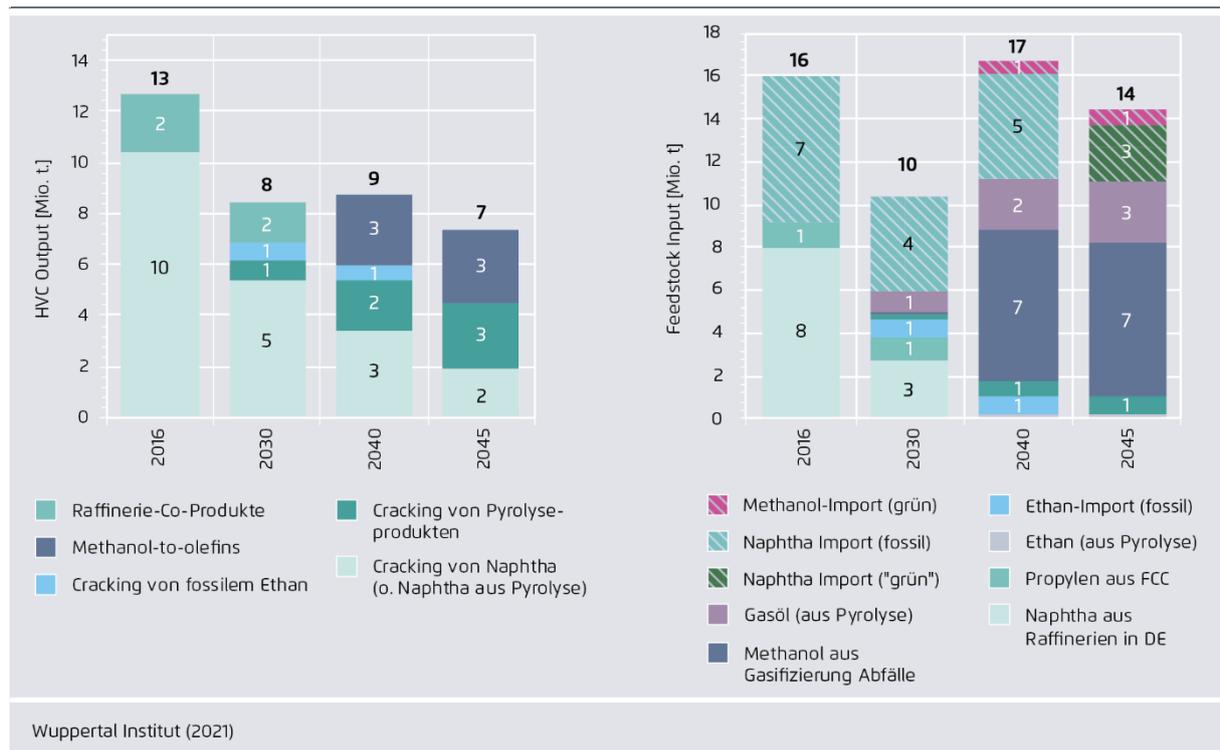
In Deutschland machen die Cluster an Rhein und Ruhr sowie der Standort Ludwigshafen heute zusammen etwa 80 Prozent der Steamcracker-Kapazitäten aus. Dort sind die regionalen Wertschöpfungsketten besonders komplex und in besonderer Weise auf die effiziente Nutzung der gesamten Palette der Naphtha-Cracker-Produkte⁹ abgestimmt. Insofern sind diese Standorte in besonderer Weise auch auf Steamcracker-Produkte wie Butadien und Aromaten angewiesen, die mit heute verfügbarer Technologie nur relativ ineffizient in alternativen Routen (siehe oben zu Methanol-to-Aromatics) hergestellt werden können.

An deutschen Standorten gibt es neben der Produktion der Standardpolymere wie Polyethylen, Polypropylen und Polyethylenterephthalat (PET) auch stark spezialisierte Anlagen wie zum

⁹ Die Palette der *high-value chemicals* umfasst beim Naphtha-Cracking die Olefine *Ethylen*, *Propylen* und *Butadien* sowie als Aromaten *Benzol*, *Toluol* und *Xylol*.

Beispiel zur Produktion des Polyurethan-Vorprodukts Toluendiisocyanat (TDI), von denen es weltweit nur wenige gibt. Dies schafft eine starke Ausgangsposition dafür, dass Anlagen der chemischen Industrie, die die Plattformprodukte weiterverarbeiten, langfristig in Deutschland weiterbetrieben werden. Daher bleibt dieser bedeutende Teil der Wertschöpfung im Szenario in Deutschland erhalten.

Abbildung 27: HVC-Produktion nach Routen und Feedstock-Einsatz



Im Zuge des Rückgangs der Produktionsmenge von Mineralölraffinerien und mit Blick auf eine Reduktion von Treibhausgasemissionen stellen sich die deutschen Standorte der Chemieindustrie im Szenario auf neue Feedstocks um. Die Abbildung oben zeigt die Produktion von HVC nach verschiedenen Routen über die Zeit, (wozu heute auch die Co-Produkte aus den Raffinerien gehören), sowie den Einsatz von Feedstock in den Crackern und MtO-Anlagen. Im Jahr 2045 werden 33 Prozent der Plattformchemikalien (HVC) durch das Cracking von Pyrolyseprodukten hergestellt, 31 Prozent durch das Cracking von (importiertem grünem) Naphtha, und 36 Prozent über die MtO-Route.¹⁰

Wie die Abbildung zeigt, kommt der Pyrolyse von (gut sortierten) Kunststoffabfällen im Szenario KN 2045 bereits 2030 eine wichtige Rolle zu. Sie ermöglicht den Einsatz von 1,3 Millionen Tonnen Feedstock in den bestehenden (aber umzurüstenden) Steamcrackern (siehe auch Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019 Material Economics 2019, VCI 2019, Schneider et al.

¹⁰ Im Vergleich zu den anderen hier dargestellten Feedstocks hat Methanol einen hohen Sauerstoffanteil, der erheblich zu dessen Gewicht beiträgt. Da der im Methanol gebundene Sauerstoff während der HVC-Produktion abgetrennt und nicht in die HVC eingebunden wird, deckt Methanol in 2050 zwar 52 Prozent des Feedstockbedarfs ab, die methanolbasierte HVC-Produktion macht aber nur 36 Prozent der gesamten HVC-Produktion in Deutschland aus.

2020).¹¹ Daneben wird 2030 über den Rhein fossiles Ethan importiert. Eine Gasifizierung von stark gemischten Abfällen mit anschließender Methanol-Synthese eröffnet langfristig den Weg zur Anwendung des MtO-Verfahrens. Die dem Szenario zugrunde liegenden Rechnungen zeigen, dass MtO in Deutschland eine ergänzende Rolle spielen kann, aber dass die Steamcracker insbesondere an den deutschen Standorten auch zukünftig einen zentralen Beitrag zur Versorgung mit Plattformchemikalien leisten werden. Damit sie im europäischen Verbund weiter produzieren können, müssen sie im Rahmen ihres ohnehin anstehenden Reinvestitionszyklus im Hinblick auf den eingesetzten Feedstock diversifiziert werden. Nur so können sie bereits mittelfristig Pyrolyseprodukte und Import-Ethan, langfristig (2045) auch „grünes“ Naphtha (aus Power-to-Liquid Verfahren) verwenden. Im Jahr 2045 kommen etwa 2,6 Millionen Tonnen hiervon über die bereits vorhandenen Feedstock-Pipelines ins Land. Analog zu den Annahmen im Hinblick auf die Versorgung mit Kraftstoffen geht das Szenario davon aus, dass ein solcher synthetisch hergestellter Feedstock (grünes Naphtha) im Jahr 2045 auf den Weltmärkten gehandelt werden wird und über die Seehäfen und bestehenden Pipelines zu sehr niedrigen Transportkosten importiert werden kann.

Die dem Szenario zugrunde liegenden Simulationsrechnungen haben ergeben, dass eine Elektrifizierung der Cracker zur Erzeugung der benötigten Prozesswärme selbst unter der Nebenbedingung der Treibhausgasneutralität unwirtschaftlich ist, weshalb im Szenario keine Elektrifizierung von Steamcrackern angenommen wird. Daher entstehen im Szenario auch zukünftig CO₂-Emissionen aus der Verbrennung der Nebenprodukte des Crackers im Cracker selbst. Die Cracker bleiben daher als CO₂-Punktquellen erhalten. Alle im Szenario KN2045 im Jahr 2045 verbleibenden Cracker werden mit Carbon Capture (Aminwäsche) ausgerüstet und an das CO₂-Netz angeschlossen. Eine Produktion von Plattformchemikalien auf Basis von importiertem grünem Methanol ist langfristig in Europa ebenfalls möglich und könnte unter sehr günstigen Bedingungen zu CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von unter 100 Euro pro Tonne CO₂ erfolgen (vgl. Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019). Gegenüber der Naphtha-Route ist diese Route für Küstenstandorte mit ausschließlichem Ethylen- oder Propylen-Bedarf wirtschaftlich vorteilhaft. In den durchgeführten Simulationsrechnungen werden die entsprechenden Anlagen auch aufgrund einer fehlenden Pipelineinfrastruktur jedoch nicht an Standorten des Binnenlandes errichtet.¹² Die HVC-Produktion aus importiertem grünem Methanol spielt daher im Szenario KN 2045 nur an kleineren Küstenstandorten eine Rolle.

Die Ammoniakproduktion bildet den zweiten emissionsintensiven Ausgangspunkt für Wertschöpfungsketten. Auch Ammoniak geht in einige Polymer-Produktionsketten ein, wird jedoch ganz überwiegend in der Düngemittelherstellung verwendet. Im Haber-Bosch-Verfahren werden Wasserstoff und Stickstoff zu Ammoniak synthetisiert. Die heutigen Emissionen sind in allererster Linie auf die Wasserstoffbereitstellung zurückzuführen. Eine klimaneutrale Ammoniakproduktion baut also langfristig auf erneuerbar erzeugtem Wasserstoff auf. Im Szenario KN2045 setzt die Industrie mittelfristig auch fossilen Wasserstoff mit Kohlenstoffabscheidung in ihren bestehenden Haber-Bosch-Anlagen ein. Der Wasserstoff wird jedoch nicht an den Standorten selbst produziert, sondern über Pipelines bezogen. Gerade bei Ammoniak stellt sich langfristig aber auch die Frage, ob er überhaupt noch in Mitteleuropa erzeugt werden wird. Durch seine gute Transportfähigkeit könnte er ähnlich wie grünes Naphtha (und günstiger als Wasserstoff) importiert werden (vgl. IEA 2019).

¹¹ In den Simulationsrechnungen wird Europa insgesamt betrachtet, und die dort ermittelten Abfallmengen zum Einsatz in Pyrolyse sind über Europa insgesamt verfügbar. Die für Deutschland ermittelte Einsatzmenge von 1,3 Millionen Tonnen lässt sich jedoch nicht allein aus in Deutschland abfallenden Mengen erzeugen. Wir gehen davon aus, dass ein Teil der Pyrolyse-Produkte über die Seehäfen nach Deutschland kommt. Rotterdam und Antwerpen könnten ihre heute schon bestehende Hub-Funktion für Kunststoffabfälle weiter ausbauen.

¹² Ein Umstand, der sich langfristig ändern könnte, falls z.B. Rohölpipelines umgenutzt werden. Die Hafenstandorte haben in Bezug auf die Nutzung von importiertem Methanol jedoch einen Startvorteil.

Den größten Block an den heutigen Emissionen der chemischen Industrie stellen die Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. In der chemischen Industrie werden diese überwiegend wärmegeführt betrieben. Sie liefern – neben konventionellen mit Erdgas betriebenen Dampfkesseln – den benötigten Prozessdampf, der überwiegend in kontinuierlich betriebenen Prozessen benötigt wird. Der Dampf wird in der chemischen Industrie einerseits als Wärmeträger, andererseits auch stofflich als Lösungsmittel bzw. Wasserstofflieferant eingesetzt. Entsprechend des Szenarios zur Stromerzeugung läuft die Dampfbereitstellung aus KWK-Anlagen analog zum Szenario KN2050 langfristig (bis zum Jahr 2050) aus. Die Dampfversorgung wird in diesem Zuge auf einen Mix aus Erzeugungstechnologien umgestellt: Elektrodenkessel und Hochtemperaturwärmepumpen können aufgrund der Knappheit von erneuerbarem Strom nur ein Teil der Lösung sein, und insbesondere bis 2030 trotz teilweise niedriger CO₂-Vermeidungskosten (vgl. Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019) nur geringe Beiträge zur Treibhausgas-Vermeidung leisten.

Aufgrund der starken räumlichen Konzentration von Dampf-Senken in Chemieparks und des damit verbundenen hohen Energiebedarfs der Dampfbereitstellung bietet sich bereits mittelfristig Wasserstoff als Energieträger an, da er in großen Mengen kosteneffizient über Pipelines angeliefert werden kann. Langfristig sieht das Szenario insbesondere die Verwendung von Biomasse vor, um über die Kombination mit CCS Negative-Emissionen zu erreichen. Auch hier ist die starke Konzentration der Dampfsenken der entscheidende Grund. Die Dampfversorgung muss also innerhalb von etwa 15 Jahren zweimal umgestellt werden. Gegenüber dem Szenario KN2050 verkürzt sich der Umstellungszeitraum somit noch einmal um fünf Jahre. Diese Herausforderung kann die Industrie im Szenario nur bewältigen, indem sie im Rahmen von Ersatz- und Erweiterungsinvestitionen nur noch in Kessel investiert, die mit „Flex-Brennstoff“ betrieben werden können. Diese werden dann zunächst mit Wasserstoff (und gegebenenfalls noch Erdgas) und später mit Synthesegas (bestehend aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid) betrieben. Die für den ersten Umstieg benötigte Wasserstoff-Infrastruktur wird von den Unternehmen nach der Umstellung auf Biomasse (wenn auch in geringerem Umfang) für die stoffliche Nutzung von Wasserstoff eingesetzt. Darüber hinaus können die mit Wasserstoff versorgten Industrieparks auch Standorte für die Wasserstoff-Rückverstromung werden, insofern sie sich innerhalb von regionalen Schwerpunkten der Stromnachfrage befinden.

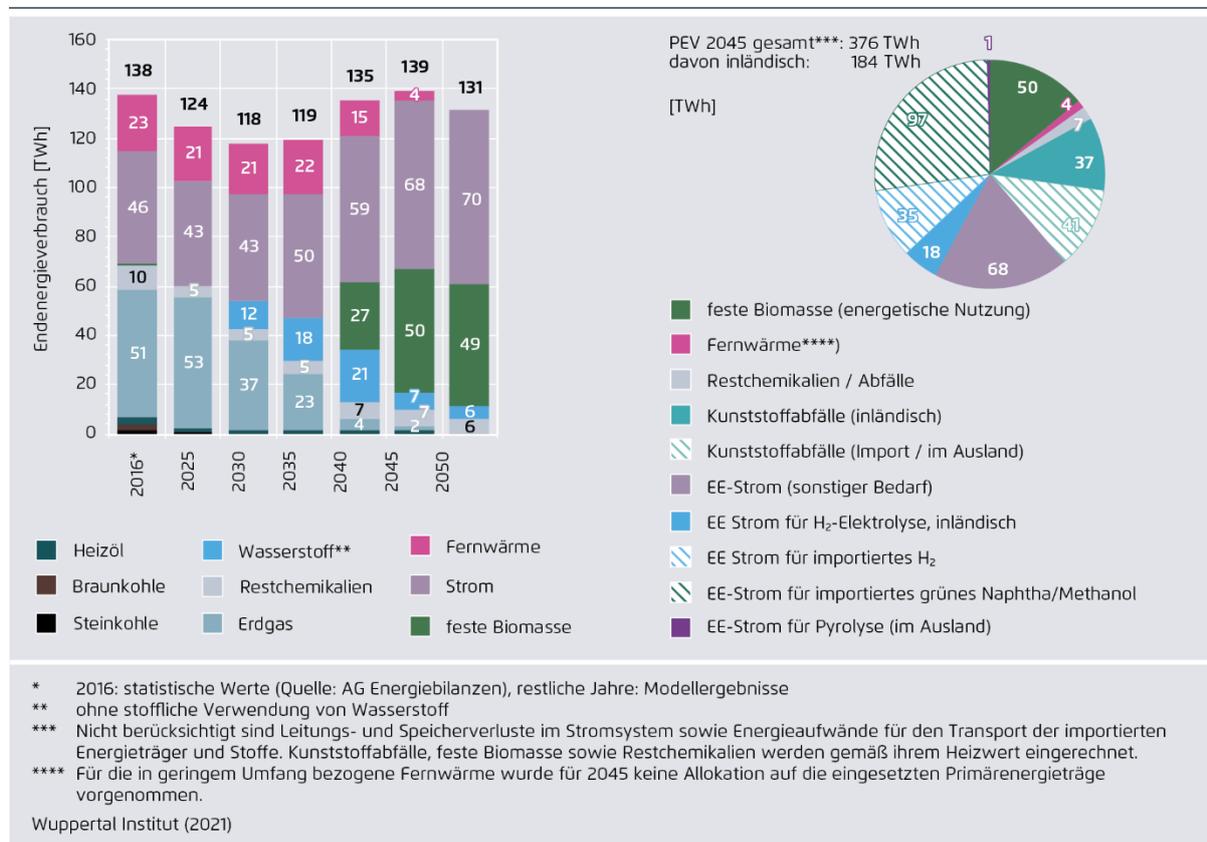
Aus diesen Entwicklungen ergibt sich im Szenario KN2045 der Energieverbrauch der Grundstoffchemie. Der Endenergieverbrauch bleibt langfristig in etwa auf dem heutigen Niveau.¹³ Strom wird durch den zusätzlichen Bedarf für die Dampfbereitstellung zum insgesamt wichtigsten Energieträger. Feste Biomasse wird der Energieträger mit dem größten energetischen Beitrag für die Dampfbereitstellung und nimmt – aufgrund der zentralen Rolle der Dampfbereitstellung für den gesamten Energiebedarf der Grundstoffchemie – ab 2040 auch bezüglich des gesamten Endenergiebedarfs der Chemieindustrie eine zentrale Rolle ein. Der Wasserstoffbedarf ist durch verschiedene Entwicklungen geprägt. Während eine sinkende Ammoniakproduktion (siehe Abbildung 23) die Nachfrage nach stofflich verwendetem Wasserstoff bis 2030 sinken lässt, entsteht im Zeitraum 2030 bis 2040 ein Bedarf für eine energetische Nutzung von Wasserstoff in der Dampfbereitstellung. Darüber hinaus wird Wasserstoff zunehmend auch für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme als Ersatz von Erdgas energetisch sowie in der MtO-Route stofflich genutzt. Die Menge an „Restchemikalien“, die in den Steamcrackern anfallen und energetisch in anderen

¹³ Die Gründe für diesen im Vergleich zu Szenarien in anderen Studien (zum Beispiel Szenario „Treibhausgasneutralität“ des VCI 2019 und Szenario „EL95“ der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende) im Jahr 2050 niedrigen Endenergieverbrauch sind vielschichtig: 1) im Szenario KN 2045 wird eine im Vergleich geringere inländische Nachfrage nach Naphtha unterstellt. Hintergrund ist ein Rückgang der inländischen HVC-Produktion infolge einer Verlagerung der Produktion an Küstenstandorte im außereuropäischen Ausland durch Marktkräfte. 2) Eine weitere Reduktion des Naphtha-Bedarfs entsteht durch einen höheren Anteil an Kunststoffrecycling. 3) Zudem wird (grünes) Naphtha in einem Umfang importiert, für dessen inländische Produktion mittels Fischer-Tropsch Synthese 97 TWh Strom benötigt würden. 4) Auf elektrische Steamcracker wird aus Gründen der Wirtschaftlichkeit verzichtet. 5) Es wird ein Rückgang der Ammoniakproduktion in Übereinstimmung mit dem Szenario zur Landwirtschaft unterstellt.

Prozessen verwertet werden, nimmt durch einen erhöhten Anteil an abfallbasierten Feedstocks und eine Erhöhung der thermischen Effizienz der Steamcracker im Zeitraum ab 2035 zu.

Im Jahr 2045 werden 68 Terawattstunden erneuerbarer Strom aus heimischer Produktion direkt genutzt, sowie 18 Terawattstunden Strom für die Erzeugung von 12 Terawattstunden grünem Wasserstoff aufgewendet. Darüber hinaus werden 22 Terawattstunden Wasserstoff importiert, für dessen Herstellung mittels Elektrolyse 35 Terawattstunden erneuerbaren Stroms aufgewendet werden. Für die Herstellung von importiertem grünem Naphtha und Methanol werden weitere 97 Terawattstunden erneuerbarer Strom benötigt. Auch die Pyrolyse der importierten Pyrolyseprodukte erfordert erneuerbaren Strom (1 Terawattstunde). Insgesamt benötigt die Chemieindustrie somit im Jahr 2045 219 Terawattstunden Strom aus erneuerbaren Quellen (im In- und Ausland).

Abbildung 28: Grundstoffchemie: Endenergieverbrauch und Primärenergieverbrauch im Jahr 2045

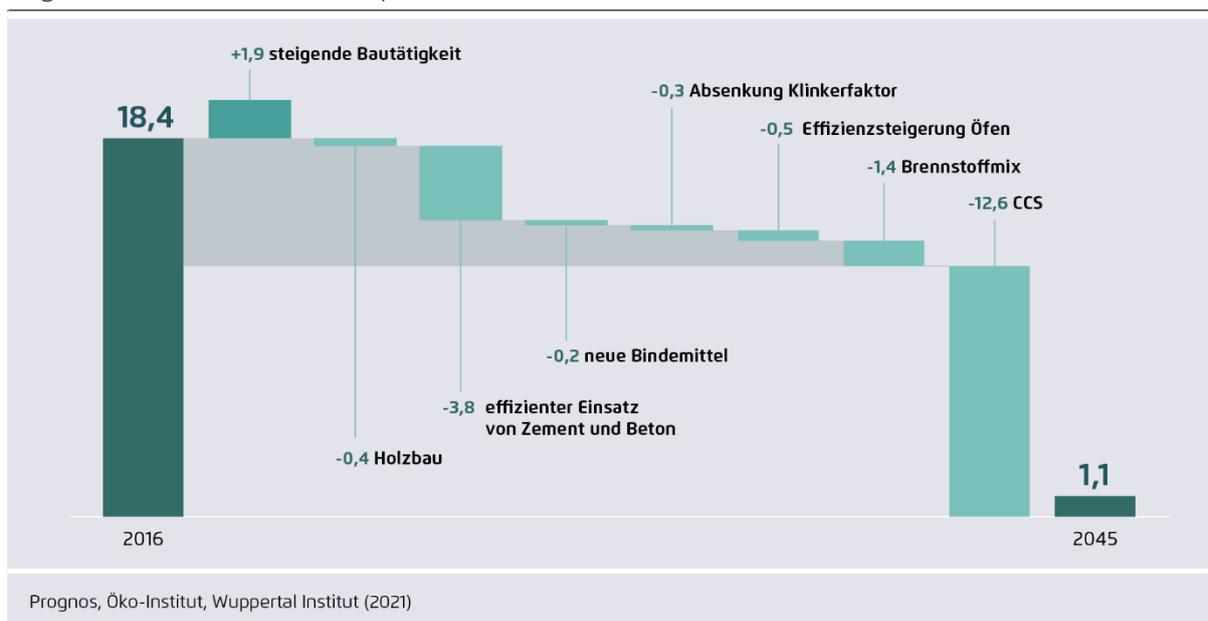


Zementindustrie

Für eine Transformation zu einer (nahezu) klimaneutralen Zementproduktion werden im Szenario dieselben Strategien verfolgt wie im Szenario KN2050. Die Minderungsbeiträge dieser Strategien im Szenario KN2045 sind in Abbildung 29 im Überblick dargestellt. Zwei Strategien sind zentral: der effiziente Einsatz von Zementklinker¹⁴ sowie CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS).

Abbildung 29: Reduktion der Treibhausgase in der Zementindustrie

Angaben in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente



Der effiziente Einsatz von Zementklinker umfasst die gesamte Wertschöpfungskette Betonbau und beinhaltet:

- eine Stabilisierung und schlussendlich Reduktion des Zementklinkeranteils in Zementen (Absenkung Klinkerfaktor) durch den Einsatz innovativer Hauptbestandteile (z. B. Betonbrechsande, kalzinierte Tone), trotz des vollständigen Wegfalls von Hüttensand bis 2040,
- die Reduktion des Zementanteils in Beton, unter anderem durch optimierte Korngrößenverteilung der Betonaggregate und verbesserte Betonzusatzmittel, sowie
- den mengenoptimierten Einsatz von Beton in Betonbauteilen zum Beispiel durch Carbon-Beton und eine intelligente Geometrie von Bauteilen.¹⁵

Im Szenario wird zudem wie im KN2050 eine moderate Fortsetzung des in den vergangenen Jahren zu beobachtenden Anstiegs des Holzbauanteils im Wohnungsbau von 16 Prozent im Jahr

¹⁴ Zementklinker ist der zentrale Bestandteil von Zement, der in verschiedenen Zementarten zu unterschiedlichen Anteilen durch weitere Hauptbestandteile (z. B. Hüttensand, gemahlener Kalkstein) ergänzt wird. Die Herstellung von Zementklinker ist ein energieintensiver Hochtemperaturprozess, bei dem durch die Entsäuerung von Kalkstein auch prozessbedingte CO₂-Emissionen entstehen.

¹⁵ Die sich aus dem Szenario zur Stahlindustrie ergebenden, insbesondere nach 2025 stark rückläufigen und bis 2040 gänzlich wegfallenden Hüttensandmengen wurden berücksichtigt und können im Szenario durch Fortschritte beim Einsatz innovativer Zementhauptbestandteile kompensiert werden. Der Klinkerfaktor bleibt im Szenario bis ca. 2045 in etwa konstant (im Bereich 0,7 - 0,75) und kann bis 2050 auf 0,66 abgesenkt werden. Der sich aus dem Szenario für die Stromproduktion ergebende Wegfall von Flugasche wird durch Fortschritte in der Betontechnik kompensiert. Im Zeitraum 2030 - 2045 kann im Szenario der Bindemittelanteil in Beton darüber hinaus um 9 Prozent gesenkt werden.

2016 auf 23 Prozent im Jahr 2045 sowie ein ebenfalls moderater Anstieg im Nichtwohnungsbau von 19 Prozent im Jahr 2016 auf 21 Prozent im Jahr 2045 angenommen.¹⁶ Der Einsatz neuer Bindemittel, die konventionelle Zemente in bestimmten Anwendungen substituieren können, steigt im Szenario ab 2030 bis auf einen Marktanteil von vier Prozent im Jahr 2045. Diese neuen Bindemittel erlauben im Mittel eine Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen um 30 Prozent gegenüber dem Durchschnitt konventioneller Zemente im Basisjahr 2016. Durch diese Maßnahmen ergibt sich in Summe bis 2045 – trotz steigender Bautätigkeit – ein dem Szenario KN2050 vergleichbarer, leichter Rückgang in der Zementproduktion sowie bei der Produktion von Zementklinker.

Zementklinker bleibt im Szenario jedoch ein bis zum Jahr 2045 (und darüber hinaus) unverzichtbares Baumaterial. Da seine Produktion mit prozessbedingten Emissionen verbunden ist, erscheint der Einsatz von CCS aus heutiger Sicht unumgänglich, um in der Zementindustrie (nahezu) Klimaneutralität zu erreichen. Es wird für das Szenario angenommen, dass die Oxyfuel-Technologie zur CO₂-Abscheidung an Zementöfen im industriellen Maßstab zwischen 2025 und 2030 verfügbar sein wird und damit eine CO₂-Abscheiderate von 90 Prozent (ab 2040 sogar 95 Prozent) erreicht werden kann. Reinvestitionen in Zementöfen erfolgen ab circa 2030 nur noch in Öfen mit Oxyfuel-Technologie. Öfen, die vorher reinvestiert werden, werden als Carbon Capture Ready angenommen. Eine Nachrüstung mit der Oxyfuel-Technologie erfolgt an solchen Anlagen, sobald der Standort an eine CO₂-Infrastruktur angeschlossen wird. An Standorten, die perspektivisch nicht an eine CO₂-Infrastruktur angebunden werden können, werden Öfen am Ende ihrer angenommenen technischen Lebensdauer (60 Jahre) nicht reinvestiert. Im Szenario KN2045 erreicht die CO₂-Infrastruktur im Endausbauzustand dieselbe Ausdehnung wie im Szenario KN2050. Der Aufbau einer CO₂-Infrastruktur kann jedoch schneller als im Szenario KN2050 realisiert werden, so dass das im Szenario vorgesehene CO₂-Pipeline-Netz bereits im Jahr 2045 vollständig aufgebaut ist.

Ein weiterer wichtiger Baustein zur Reduktion der CO₂-Emissionen der Zementindustrie ist eine (weitere) Umstellung des Brennstoffmix. Wir führen im Szenario KN2045 ebenso wie im Szenario KN2050 den historischen Trend zum verstärkten Einsatz von Alternativbrennstoffen aus Abfällen fort – dieser erreicht im Jahr 2045 circa 90 Prozent. Der biogene Anteil des in den Alternativbrennstoffen enthaltenen Kohlenstoffs verbleibt dabei auf dem heutigen Niveau (34 Prozent).¹⁷ In Ergänzung werden zunehmend biogene Brennstoffe aus Energiepflanzenanbau als Ersatz für die verbleibenden circa 10 Prozent fossiler Brennstoffe eingesetzt: feste Biomasse als Holzhackschnitzel sowie Biomethan beziehungsweise am Standort aufbereitetes Biogas. Der Ausstieg aus der Steinkohle erfolgt bereits vor 2040, und damit circa fünf Jahre früher als im Szenario KN2050.

Der anteilige Einsatz biogener Brennstoffe in Kombination mit CCS ermöglicht den Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre (negative Emissionen). An vielen Standorten können im Jahr 2045 durch den hohen Anteil biogener Brennstoffe (43 Prozent bezogen auf den Energieeintrag) in Kombination mit effektivem CCS (Abscheiderate: 95 Prozent) die verbleibenden, unvollständig abgeschiedenen prozessbedingten und fossilen Emissionen überkompensiert werden, sodass diese Standorte in ihrer Bilanz Netto-Negativ-Emissionen erreichen. Verbleibende Restemissionen der Zementindustrie an Standorten ohne CCS können hierdurch mit Blick auf die gesamte deutsche Zementindustrie im Jahr 2045 nahezu kompensiert werden. Durch den beschleunigten Aufbau

¹⁶ Prozentangaben bezogen auf die Anzahl genehmigter Gebäude.

¹⁷ Wir bezeichnen als „Alternativbrennstoffe“ sämtliche abfallbasierten Brennstoffe. Biogener Kohlenstoff ist enthalten in Klärschlamm, Tiermehl, Altholz, Zellstoff, Papier, und Pappe, sowie in Autoreifen (biogene Kautschukanteile) und weiteren als Brennstoff verwendeten Abfällen wie organischen Destillationsrückständen. Speziell für die energetische Verwendung angebaute Energiepflanzen sowie Biogas und Biomethan subsumieren wir *nicht* unter Alternativbrennstoffe, sondern weisen diese gesondert aus.

einer CO₂-Infrastruktur sowie dem schnelleren Ausstieg aus fossilen Energieträgern kann die an nähernde Treibhausgasneutralität der Zementindustrie in etwa fünf Jahre früher als im Szenario KN2050 erreicht werden.

Trotz fortgesetzter Effizienzsteigerungen kann die Zementindustrie spürbare absolute CO₂-Minderungen erst im Zeitraum nach 2030 vorweisen. Steigende Bautätigkeit sowie der Wegfall von Hütensand und Flugaschen als wichtige Rohstoffe der Zement- und Betonindustrie müssen zunächst kompensiert werden, während innovative Zemente und neue Bindemittel noch Zeit für Entwicklung und Normierungsverfahren benötigen. Die CCS-Technologien sind neben weiterer Technologieentwicklung vor allem auf den Aufbau einer entsprechenden CO₂-Infrastruktur angewiesen, welcher ebenfalls vor 2030 schwerlich realisiert werden kann.

Weitere Industrien

Signifikante CO₂-Emissionen entstehen auch bei der Herstellung von Glas, Kalk, Nichteisenmetallen und Papier. Des Weiteren spielen in vielen Industriebereichen genutzte Querschnittstechnologien, insbesondere für die Bereitstellung von Prozesswärme, eine bedeutende Rolle.

Die heute verwendeten fossilen Brennstoffe werden im Szenario KN2045 ebenso wie im Szenario KN2050 soweit technisch möglich durch Elektrifizierung vermieden und die restlichen fossilen Brennstoffe durch klimafreundliche ersetzt. Der Ausstieg aus fossilen Energieträgern erfolgt zum größten Teil bereits bis zum Jahr 2040, und damit in etwa fünf Jahre früher als im Szenario KN2050.

In der Glasindustrie beinhaltet der Energieträgerwechsel eine Ausweitung des strombasierten Anteils der Wärmebereitstellung in der Behälterglasherstellung auf (maximal) 36 Prozent sowie bei Flachglas auf (maximal) 16 Prozent bezogen auf den Endenergiebedarf, und – an geeigneten Standorten – eine Beimischung von Wasserstoff in die in der Glasindustrie verwendeten Brenngase von 50 Prozent (bezogen auf das Volumen).¹⁸ Verbleibende Erdgasmengen werden durch Biogas bzw. -methan ersetzt.

Bezüglich der Herstellung von Nichteisenmetallen unterstellen wir, dass der heute in Kupolöfen eingesetzte Koks bis 2040 durch biogenen Kohlenstoff sowie Erdgas überwiegend durch Wasserstoff und teilweise durch eine Elektrifizierung der Wärmebereitstellung ersetzt wird.

In der Kalkindustrie wird der Einsatz von Alternativbrennstoffen erhöht sowie verbleibende Erdgasmengen je nach angenommener Verfügbarkeit am Standort durch Biomethan oder am Standort aufgereinigtes Biogas ersetzt.

In der Papierindustrie spielt die Wärmebereitstellung über Dampf aus KWK-Anlagen oder Heizkesseln heute die zentrale Rolle für die CO₂-Emissionen. Da wärmegeführte, industrielle KWK-Anlagen mit ihrer geringen Flexibilität bei der Stromproduktion im modellierten Stromsystem 2045 keine signifikante Rolle mehr spielen, verlagert sich die Wärmebereitstellung stärker auf strombasierte (circa 20 Prozent) bzw. mit Biomasse befeuerte (knapp 30 Prozent) Heizkessel. Zudem kann ein Teil der Prozesswärme durch Hochtemperaturwärmepumpen (circa 25 Prozent) bereitgestellt werden. Fernwärme (circa 20 Prozent) spielt auch im Jahr 2045 eine bedeutende Rolle.¹⁹

¹⁸ Im Jahr 2045 erreicht im Szenario circa ein Fünftel der Glasschmelzwannen den maximalen Elektrifizierungsgrad. Beimischung von H₂ ins Brenngas erfolgt im Szenario an Standorten, die an eine H₂-Infrastruktur angeschlossen sind.

¹⁹ Prozentangaben jeweils bezogen auf die über Dampf bereitgestellte Energiemenge.

Prozessbedingte CO₂-Emissionen entstehen in der Glasindustrie (Zersetzung der im Gemenge befindlichen Karbonate, zum Beispiel Soda), der Kalkindustrie (Entsäuerung von Kalkstein) sowie bei der Herstellung von Aluminium (Abbrand von aus Petrolkoks und Steinkohlenteerpech hergestellten Anoden). Um ein Entlassen dieser prozessbedingten Emissionen in die Atmosphäre möglichst weitgehend zu vermeiden, erfolgt im Szenario an Produktionsstandorten dieser Industrien, die im Einzugsbereich der angenommenen CO₂-Infrastruktur liegen, eine Abscheidung der dort anfallenden prozessbedingten und brennstoffbedingten CO₂-Mengen mit einer Abscheiderate von 90 Prozent unter Einsatz einer Aminwäsche.

3.3 Gebäude

3.3.1 Zielbild und Ausgangslage

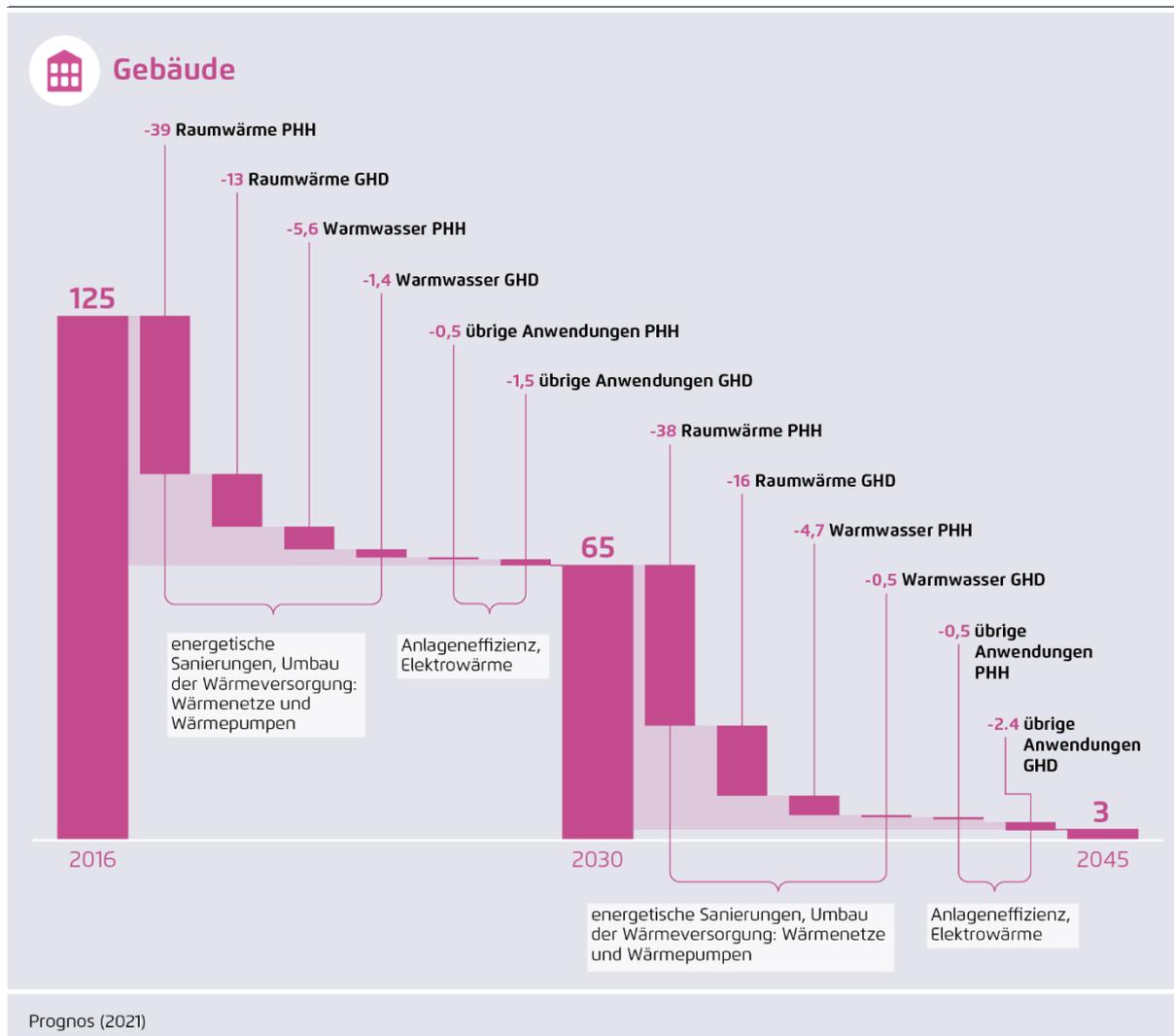
Im Gebäudesektor verringerten sich die THG-Emissionen zwischen 1990 und 2016 von 210 Mio. t CO₂-Äq auf 125 Mio. t CO₂-Äq (minus 40 Prozent). Aktuelle Zahlen des UBA beziffern die THG-Emissionen des Gebäudesektors im Jahr 2020 auf 120 Mio. t CO₂-Äq. Wichtige Ursachen für die bisherige Reduktion waren die Substitution weg von der Kohle, und ab dem Jahr 2000 auch weg vom Heizöl. Die verbesserten Nutzungsgrade der Wärmeerzeuger (Brennwerttechnologie), die gesteigerte Gebäudeeffizienz durch Sanierungen und das Aufkommen von Erneuerbaren Energien zur Wärmeerzeugung waren weitere wichtige Faktoren zur Emissionsreduktion.

Bis zum Jahr 2030 sollen die THG-Emissionen im Gebäudesektor gemäß der Novelle zum Klimaschutzgesetz (KSG 2021) auf maximal 67 Mio. t CO₂-Äq gesenkt werden. Mit den im Herbst 2019 verabschiedeten Maßnahmen des Klimaschutzprogramms werden die Emissionen bis 2030 voraussichtlich auf 78 Mio. t CO₂-Äq (Prognos et al. 2020) bis 87 Mio. t CO₂-Äq (Öko-Institut et al. 2020) reduziert. Die bisher verabschiedeten Maßnahmen sind noch nicht ausreichend, ohne zusätzliche Maßnahmen ist mit einer deutlichen Verfehlung der Reduktionsziele zu rechnen.

Das Reduktionsziel des KSG für das Jahr 2030 wird im Szenario KN2045 geringfügig unterschritten, die THG-Emissionen des Gebäudesektors werden auf 65 Mio. t CO₂-Äq reduziert. Nach 2030 werden die THG-Emissionen im Szenario KN2045 weiter vermindert, bis 2045 werden keine nennenswerten Mengen an Treibhausgasen emittiert (<3 Mio. t CO₂-Äq).

Abbildung 30: Reduktion der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude

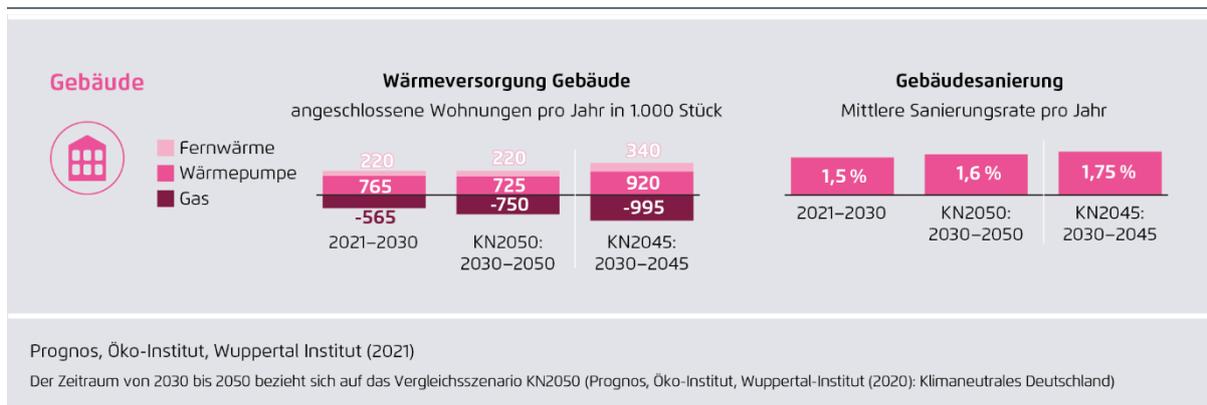
Angaben in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente



Die angestrebte Reduktion der THG-Emissionen im Gebäudesektor ist anspruchsvoll, aber erreichbar. Eine große Herausforderung ist die lange Lebensdauer der Wärmeerzeuger und der Bauteile der Gebäudehüllen. Diese hat zur Folge, dass jedes Jahr nur ein geringer Anteil des Gebäude- und Anlagenbestands ersetzt oder modernisiert wird. Die damit verbundene Trägheit erschwert die rasche Reduktion der Emissionen. Entsprechend wichtig ist es, die anfallenden Ersatzzyklen zu nutzen und dabei die notwendigen Effizienz- beziehungsweise Dekarbonisierungsmaßnahmen umzusetzen.

Wie im Szenario KN2050 sind auch im Szenario KN2045 die Umstellung der Wärmeversorgung sowie die Verbesserung der Effizienz bei Gebäudehüllen und Anlagen die beiden zentralen Maßnahmen zur Erreichung des Reduktionsziels. Auch im Szenario KN2045 werden ab 2025 keine neuen Wärmeerzeuger auf Basis von Heizöl oder Gas installiert. Zusätzlich wird im Szenario KN2045 die Nutzungsdauer fossiler Wärmeerzeuger auf maximale 20 Jahre beschränkt. Als Konsequenz fallen bis 2045 die fossilen Wärmeerzeuger nahezu vollständig aus der Wärmeversorgung. Demgegenüber gewinnen die elektrische Wärmepumpe und Wärmenetze stark an Bedeutung. Der Einsatz von Biomasse wird durch die verfügbaren Potenziale begrenzt.

Abbildung 31: Umsetzungsgeschwindigkeit im Gebäudesektor in den Szenarien KN2050 und KN2045



Die Ausstattung der Haushalte und Gewerbebetriebe mit Haushaltsgeräten und Informations- und Kommunikations(luK)-Technik geht nicht zurück, sondern steigt noch leicht an. Dank Effizienzverbesserungen sinkt in Summe der Stromverbrauch in diesem Segment. Es werden keine neuartigen Technologien angenommen. So wird Wäsche beispielsweise weiterhin nass gewaschen.

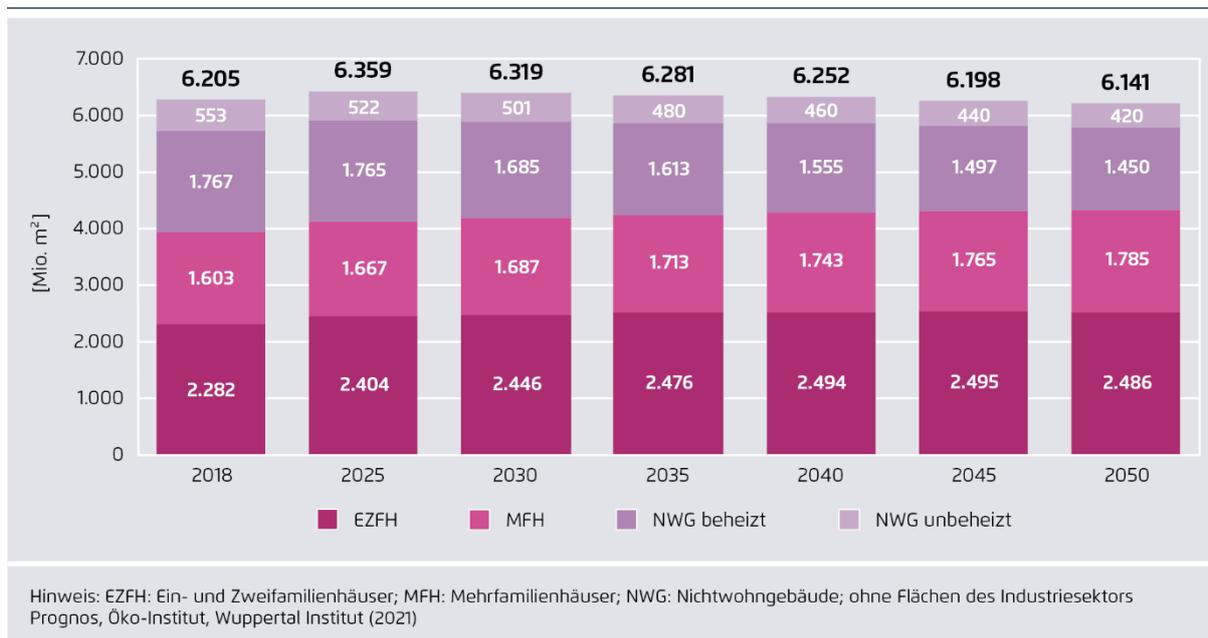
Ergänzende Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen sind eine Steigerung des Einsatzes von Biogas respektive Biomethan und Strom für gewerbliche Prozesse sowie ein verstärkter Einsatz wassersparender Armaturen (zur Reduktion des Warmwasserverbrauchs).

3.3.2 Entwicklung der Gebäudeflächen

Der Energieverbrauch des Gebäudesektors wird durch den Verwendungszweck Raumwärme dominiert. Die Höhe des Raumwärmeverbrauchs steht in engem Zusammenhang mit der beheizten Gebäudefläche. Die Entwicklung der Wohnfläche ist an die Bevölkerungsentwicklung geknüpft. In der Regel belegt jeder Haushalt eine Wohnung. Die Zahl der Haushalte ist dadurch ein wichtiger Treiber für die Entwicklung der Gesamtwohnfläche. Die Entwicklung von Bevölkerung, Haushalten und Wohnflächen verläuft im Szenario KN2045 identisch zum Szenario KN2050: Die Bevölkerungszahl wächst bis zum Jahr 2025 und nimmt dann kontinuierlich ab (Kapitel 2.4). Die gleichzeitig rückläufige mittlere Haushaltsgröße führt jedoch zu einem weiteren Anstieg der Zahl der Haushalte bis zum Jahr 2040. Danach überwiegt der Einfluss des Bevölkerungsrückgangs und die Zahl der Haushalte geht wieder zurück. Aufgrund der abnehmenden mittleren Haushaltsgröße und von Wohlstandseffekten steigt die Pro-Kopf-Wohnfläche von 45 m² im Jahr 2018 auf 52 m² im Jahr 2050. Die Gesamtwohnfläche steigt von 3.885 Millionen m² im Jahr 2018 über 4.132 Millionen m² im Jahr 2030 auf 4.271 Millionen m² im Jahr 2050 (Abbildung 32).

Die Gebäudeflächen der Nichtwohngebäude (NWG) des GHD-Sektors werden in der Modellierung anhand der Zahl der Erwerbstätigen nach Branchen sowie der branchenspezifischen Fläche je Erwerbstätigen hergeleitet. Auch die Zahl der Erwerbstätigen entwickelt sich identisch wie im Szenario KN2050. Mittel- und längerfristig geht sie deutlich zurück. Ursachen sind die rückläufige Bevölkerungszahl und der abnehmende Anteil der Bevölkerung im Erwerbsalter (dies aufgrund der älter werdenden Bevölkerung). Die Gesamtfläche der NWG im GHD-Sektor nimmt ab von 2.319 Mio. m² im Jahr 2018 über 2.187 Mio. m² im Jahr 2030 auf 1.870 Mio. m² im Jahr 2050. Dies entspricht einem Rückgang von annähernd 20 Prozent. Rund 20 bis 25 Prozent der NWG-Fläche wird nicht beheizt, dieser Teil der Fläche hat keinen Einfluss auf den Raumwärmebedarf.

Abbildung 32: Entwicklung der Gebäudefläche nach Gebäudetyp



3.3.3 Effizienzentwicklung Gebäudehülle: energetische Sanierungen

Energetische Sanierungen der Gebäudehülle sind eine zentrale Effizienzmaßnahme zur Reduktion des Raumwärmebedarfs und der damit verbundenen THG-Emissionen. Hierbei spielen sowohl die Sanierungsrate als Maß für die Häufigkeit getätigter Sanierungsmaßnahmen (Wie viele Bauteile werden im Gebäudebestand modernisiert?), als auch die Qualität beziehungsweise Sanierungstiefe der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen eine Rolle (Welche Dämmstärke wird gewählt?). Bei energetischen Sanierungen können entweder einzelne Bauteile modernisiert werden, zum Beispiel die Fenster oder das Dach, oder es wird die gesamte Außenhülle modernisiert. Entsprechend wird unterschieden zwischen Teilsanierungen und Gesamt- beziehungsweise Vollsanierungen. Bei der Modellierung werden Teilsanierungen als Vereinfachung zu Gesamt- beziehungsweise Vollsanierungen zusammengefasst und in Vollsanierungsäquivalenten ausgedrückt. Die im Folgenden genannten Sanierungsraten beziehen sich ebenfalls auf Vollsanierungsäquivalente. Dabei gilt: Je geringer der Energieverbrauch nach einer Vollsanierung ausfällt, desto höher ist die Sanierungstiefe der gewählten Sanierungsmaßnahmen.

Gemäß einer aktuellen Erhebung des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) zur Sanierungstätigkeit wurden bei Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH) im Zeitraum 2010 bis 2016 jährlich rund 1,4 Prozent der Altbauten energetisch saniert, bei Mehrfamilienhäusern (MFH) rund 1,6 Prozent (IWU 2018).²⁰ Umgerechnet auf den gesamten Gebäudebestand, also inklusive der Gebäude mit Baujahr jünger als 1978, ergeben sich jährliche Sanierungsraten von rund 1 Prozent bei den EZFH und annähernd 1,4 Prozent bei den MFH. Die einzelnen Bauteile zeigen deutliche Unterschiede bei der Sanierungshäufigkeit. Vergleichsweise hoch sind im Altbau die jährlichen Modernisierungsraten bei den Bauteilen Fenster (circa 2,5 Prozent) und Dach-/Obergeschoss (2,3 Prozent). Bei Fassaden beträgt der Anteil hingegen nur 1,1 Prozent, bei den Böden sogar weniger als 1 Prozent. Aufgrund der geringen jährlichen Modernisierungsraten verbessern die

²⁰ Die Ersatzraten der Bauteile Fenster, Aussenwände, Dächer und Böden wurden anhand bauteilspezifischer Gewichtungsfaktoren zu Vollsanierungsraten umgerechnet. Der Altbau bezieht sich in der IWU-Studie auf Gebäude mit Baujahr bis 1978.

Sanierungsmaßnahmen nur langsam die energetische Qualität des Gebäudebestands und der Raumwärmeverbrauch nimmt nur langsam ab.

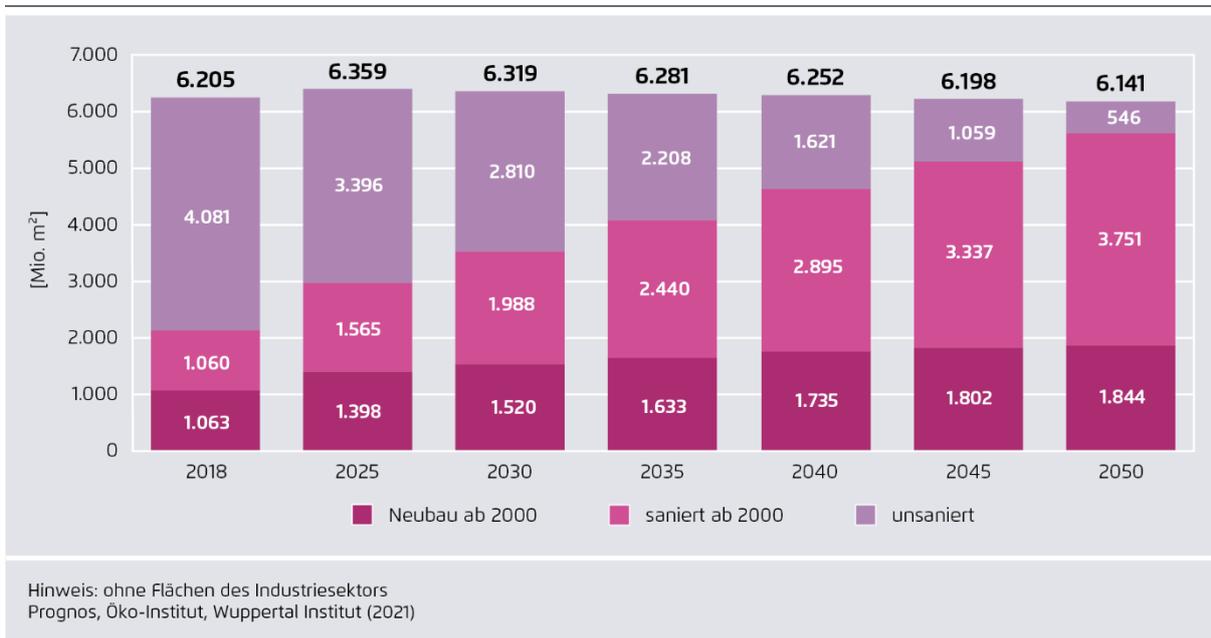
Im Szenario KN2045 wird die Sanierungsaktivität deutlich angehoben. Bis zum Jahr 2030 steigt sie gleich stark wie im Szenario KN2050, nach 2030 fällt der Anstieg stärker aus. Die jährlichen Sanierungsraten steigen bei EZFH auf annähernd 1,7 Prozent und bei MFH und NWG auf über 1,8 Prozent. Dabei beziehen sich die Raten jeweils auf den Gesamtbestand. Bei den NWG wird ein zu den MFH vergleichbarer Anstieg der Sanierungsrate unterstellt.

Die Sanierungstiefe lässt sich aus den erzielten Einsparungen ersehen: Aktuell liegt der mittlere flächenspezifische Heizwärmebedarf nach Gesamtsanierungen im EZFH-Segment bei schätzungsweise 80 bis 85 kWh/m² Wohnfläche, im Bereich der MFH bei rund 60 bis 65 kWh/m². Wie im Szenario KN2050 reduziert sich auch im Szenario KN2045 der mittlere spezifische Heizwärmebedarf bei Gesamtsanierungen bei EZFH auf etwa 60 kWh/m² (dies entspricht in etwa dem KfW-Effizienzhausstandard 70 oder besser) und bei MFH auf 40 bis 45 kWh/m² (dies entspricht in etwa dem KfW-Effizienzhausstandard 55; spezifische Verbrauchswerte bezogen auf die Nutzenergie für Raumwärme, ohne Warmwasser).

Der Energieverbrauch für Raumwärme ist bei Neubauten in der Regel deutlich geringer als in Bestandsgebäuden. Bei Neubauten wird der maximale Energieverbrauch seit 2020 durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG) beziehungsweise bis 2020 durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) vorgegeben. Bei neuen EZFH lag der Heizwärmebedarf 2018 bei rund 50 kWh/m², bei MFH bei 40 kWh/m². Im Szenario KN2045 verläuft die Effizienzentwicklung der Neubauten identisch zum Szenario KN2050. Der Heizwärmebedarf sinkt sowohl bei EZFH als auch beim MFH langfristig auf rund 25 kWh/m², was im Mittel in etwa einem KfW-Effizienzhausstandard 40 oder besser entspricht.

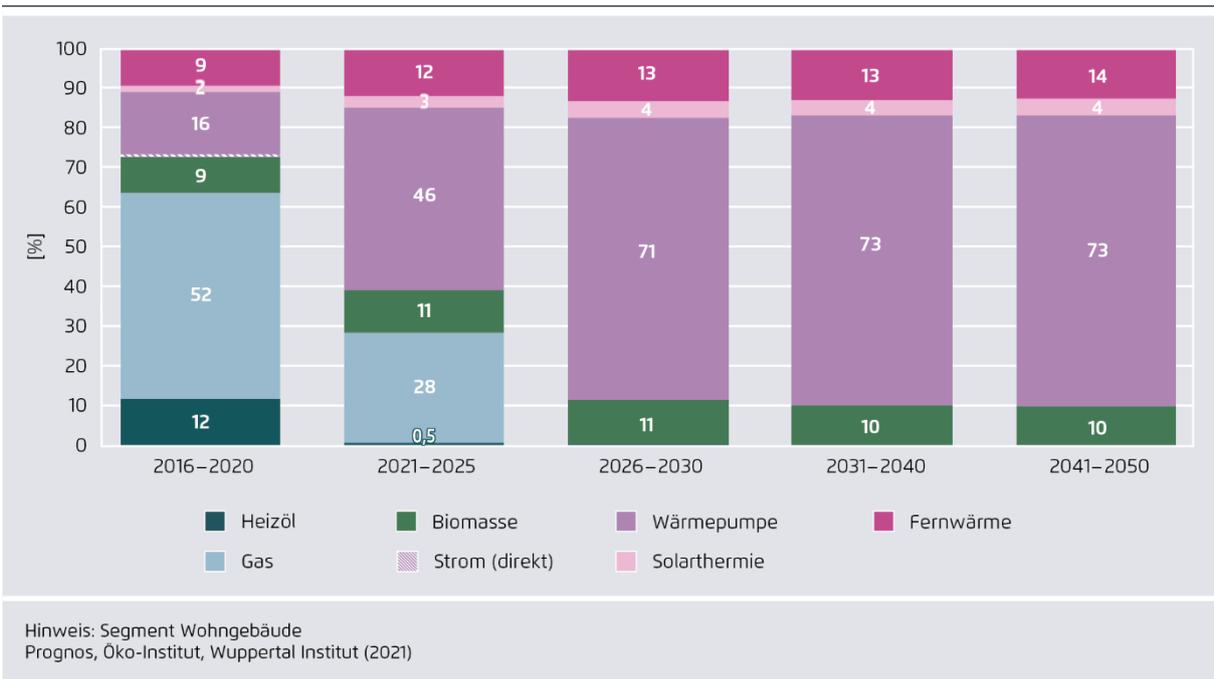
Die Entwicklung der Gebäudeflächen nach Baustandard ist in Abbildung 33 beschrieben. Die Neubauten ab 2000 entsprechen näherungsweise einem Baustandard nach EnEV 2002 oder besser. Aufgrund der abnehmenden Neubauaktivität nach 2020 wächst die Fläche des Neubaus nach 2020 nur noch langsam an. Von der Gesamtgebäudefläche entfallen im Jahr 2050 rund 30 Prozent auf die Kategorie Neubau (Baujahr 2000 oder jünger). Aufgrund energetischer Sanierungen verringert sich der unsanierte Anteil der Gebäudefläche, während der sanierte Anteil zunimmt. Bis zum Jahr 2050 steigt der Anteil der seit 2000 sanierten Fläche auf circa 91 Prozent. Die restlichen rund 9 Prozent wurden entweder vor dem Jahr 2000 saniert oder bleiben unsaniert. Auch diese Zahl ist als Vollsanierungsäquivalent zu interpretieren. In der Realität wären demnach nicht 10 Prozent der Gebäudeflächen vollständig unsaniert, sondern es handelt sich dabei um die aggregierten, im Rahmen von Teilsanierungen nicht modernisierten Gebäude beziehungsweise Bauteilflächen. Ein vollständiger Ersatz aller Bauteile ist für das Erreichen des THG-Reduktionszieles nicht notwendig.

Abbildung 33: Entwicklung der Gebäudefläche nach Baustandard (energetische Qualität)



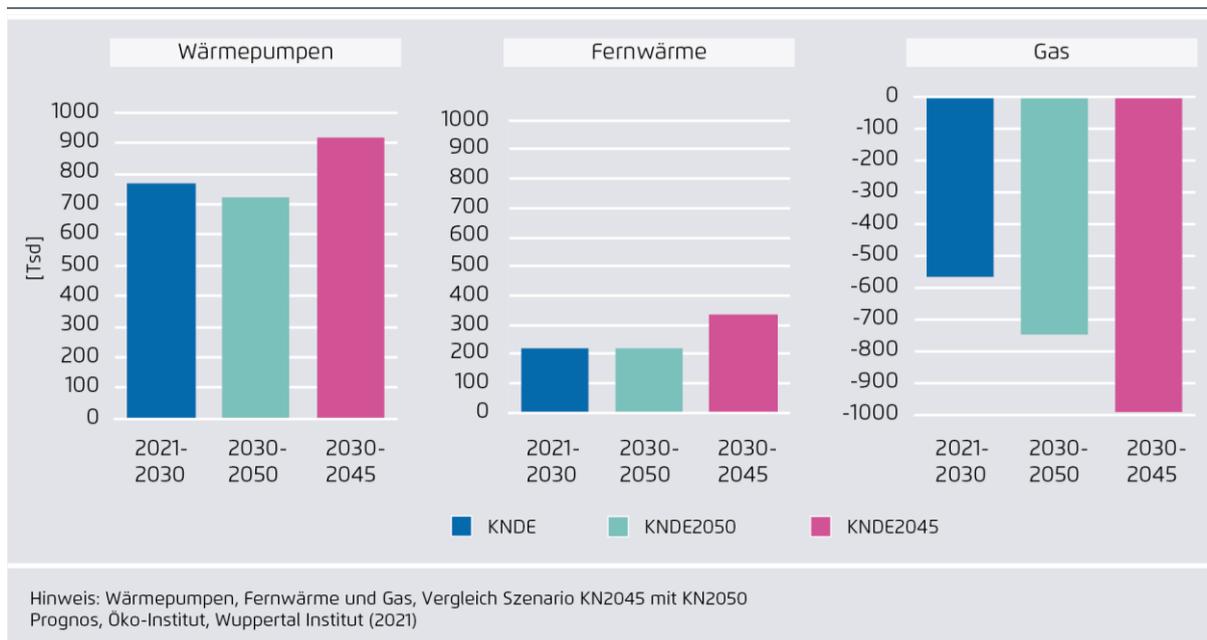
Eine weitere zentrale Maßnahme zur Erreichung der THG-Ziele ist im Szenario KN2045 die tiefgreifende Umstellung der Wärmeversorgung: Nach 2025 werden keine neuen Wärmerezeuger auf Basis von Heizöl oder Gas installiert. Zudem werden konventionelle Stromheizungen wie zum Beispiel Nachstromspeicherheizungen ebenfalls ersetzt. Eingebaut werden stattdessen elektrische Wärmepumpen, und die Wärmenetze werden stark ausgebaut. Die Absatzstruktur der Wärmerezeuger im Szenario KN2045 ist in Abbildung 34 für das Segment Wohngebäude dargestellt. Gasheizungen, welche bis 2020 die Absatzstruktur mit einem Anteil von über 50 Prozent dominieren, gehen im Zeitraum 2020 bis 2025 stark zurück, nach 2025 werden keine Gasheizungen mehr abgesetzt. Der Anteil der Ölheizungen ist bereits seit dem Jahr 2000 rückläufig. Nach 2025 werden keine Ölheizungen mehr eingebaut. Dem Rückgang fossiler Wärmerezeuger steht ein starker Anstieg der elektrischen Wärmepumpen gegenüber. Die Anteile der Wärmepumpen sind insbesondere in kleinen Gebäuden (EZFH) von hoher Bedeutung. Bei großen Wohngebäuden weisen auch die Wärmenetze hohe Anteile auf. Die Absatzstruktur für Wärmerezeuger im Szenario KN2045 unterscheidet sich nicht wesentlich von derjenigen im Szenario KN2050. Die Verkürzung der Nutzungsdauer fossiler Heizungen auf maximal 20 Jahre im Szenario KN2045 wirkt sich nicht direkt auf die Absatzstruktur aus. Die Maßnahme erhöht jedoch die Zahl der jährlich abgesetzten und ausgetauschten Wärmerezeuger.

Abbildung 34: Absatzstruktur Wärmeerzeuger (Raumwärme)



Jährlich werden rund 3 bis 4 Prozent der Wärmeerzeuger ausgetauscht. Dabei diffundieren die neu abgesetzten Wärmeerzeuger zusehends in den Anlagenbestand und verändern die Bestandsstruktur. Durch die Begrenzung der maximalen Nutzungsdauer bei Öl- und Gasheizungen ab dem Jahr 2030 steigt der Anteil der jährlich ersetzten Anlagen. Dies beschleunigt die Transformation hin zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung. Der Ersatz der Öl- und Gasheizungen verläuft aufgrund der Begrenzung der Nutzungsdauer im Szenario KN2045 schneller als im Szenario KN2050 (Abbildung 35). So werden im Szenario KN2045 im Zeitraum 2030 bis 2045 durchschnittlich 920 Tausend Wohnungen pro Jahr neu an eine Wärmepumpe angeschlossen und rund 340 Tausend an ein Fernwärmenetz. Im Szenario KN2050 liegen die durchschnittlichen Zahlen an neu angeschlossenen Wohnungen im Zeitraum 2030 bis 2050 bei rund 720 Tausend bei der Wärmepumpe und 220 Tausend bei der Fernwärme. Den höheren Anschlussraten bei der Fernwärme und den Wärmepumpen stehen höhere Abgänge bei Gas und Heizöl gegenüber. Im Szenario KN2045 sind es beim Gas im Zeitraum 2030 bis 2045 durchschnittlich rund 990 Tausend Wohnungsabgänge pro Jahr, im Szenario KN2050 sind es im Mittel des Zeitraum 2030 bis 2050 rund 750 Tausend Wohnungsabgänge pro Jahr.

Abbildung 35: Durchschnittliche jährliche Neuanschlüsse (Wohnungen in Tausend)



Durch die hohen Anteile der Wärmepumpen bei den Anlagenabsätzen steigt im Zeitverlauf auch deren Anteil an der Beheizungsstruktur des Gebäudebestands. Bis zum Jahr 2045 erhöht sich der Anteil der Wärmepumpen an der beheizten Wohnfläche auf annähernd 60 Prozent (2030: 24 Prozent; Abbildung 36). Die Zahl der betriebenen Wärmepumpen erhöht sich von knapp 1 Millionen Anlagen im Jahr 2018 über rund 6 Millionen Anlagen im Jahr 2030 auf über 14 Millionen Anlagen im Jahr 2045. Die eingebauten Wärmepumpen werden im Zeitverlauf aufgrund von technischen Weiterentwicklungen und Optimierungen zusehends effizienter. Mittel- und längerfristig werden auch bei Vorlauftemperaturen von 55 Grad Celsius Jahresarbeitszahlen von 3,5 oder sogar höher erzielt werden können, wenn die Anlagen fachgerecht eingebaut werden (NTB 2019).²¹ Im Szenario KN2045 steigt die mittlere Jahresarbeitszahl (JAZ) im Segment Wohngebäude von rund 3 im Jahr 2018 auf 3,65 im Jahr 2045. Bei Neubauten liegen dann die JAZ im Mittel bei annähernd 5,5. Ein zunehmender Anteil der elektrischen Wärmepumpen wird flexibel gesteuert und der Betrieb dem Angebot an fluktuierender Stromerzeugung aus Windenergie und Photovoltaik angepasst.

In Idealfall werden Wärmepumpen in sanierte Gebäude eingebaut. Dies ermöglicht einen Betrieb mit niedrigen Vorlauftemperaturen und hohen Wärmenutzungsgraden. Aufgrund des geringen Wärmebedarfs können zudem Anlagen mit geringer Wärmeleistung eingebaut und Kosten eingespart werden. In Bezug auf die Höhe des spezifischen Wärmeverbrauchs gibt es keine technischen Restriktionen. Ein Einbau ist technisch auch in unsanierten Altbauten möglich. In vielen Fällen können die Wärmepumpen auch in nur teilsanierten Gebäuden wirtschaftlich betrieben werden. Die Wirtschaftlichkeit hängt auch stark von der Entwicklung der Energiepreise ab.²²

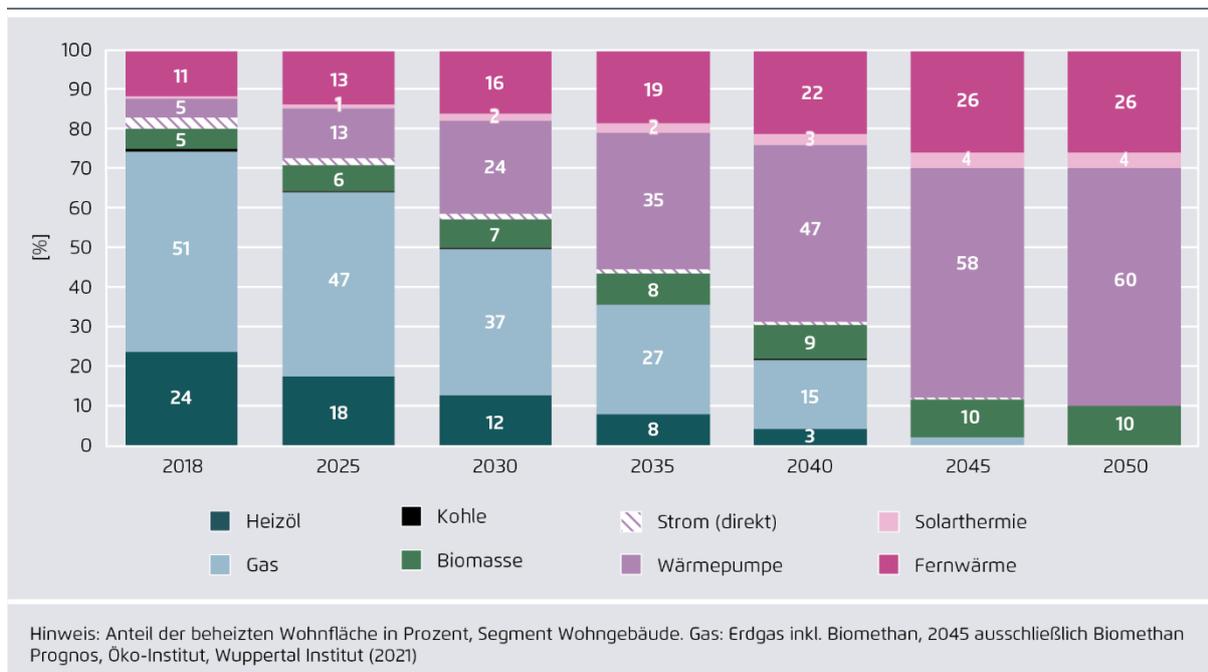
²¹ Bereits heute werden im unsanierten Altbau mit Sole-Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen von bis zu 4 erreicht (NTB 2019). Bei den stärker verbreiteten Luft-Wasser-Wärmepumpen liegen die Jahresarbeitszahlen in der Regel aber noch unter 3.

²² Eine Studie von Beuth und ifeu (2017) sah bereits im Jahr 2017 die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen bei einem Nutzwärmebedarf von bis zu 90 kWh/m² als gegeben. In günstigen Fällen lag diese Grenze sogar bei 120 kWh/m². Zudem werden die Vergleichssysteme Gas-Brennwert aufgrund von CO₂-Abgaben oder notwendigen Beimischungen von Biomethan oder PtG-Produkten zunehmend teurer, während die Wärmepumpe effizienter und billiger wird.

Wärmenetze sind besonders geeignet in dicht bebauten Gebieten und deshalb primär relevant für MFH und NWG. Der mit Wärmenetzen beheizte Anteil der Wohnfläche steigt bis zum Jahr 2045 auf über 25 Prozent. Dieser Anteil ist höher, als der Anteil an den Anlagenabsätzen suggeriert (Abbildung 34). Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit Wärmenetzen überwiegend großflächige MFH-Gebäude angeschlossen werden (mit vergleichsweise großer Fläche je Anlage/Gebäudeanschluss).

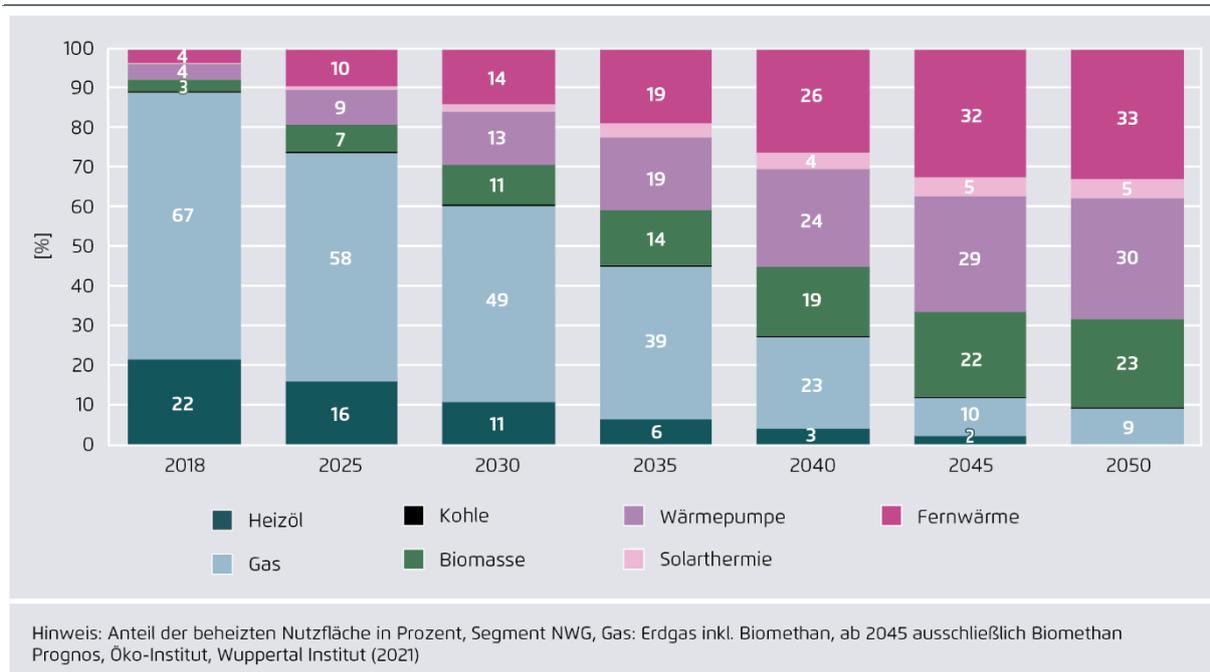
Auch die Anteile der mit fester Biomasse und solarthermisch beheizten Wohnfläche nehmen im Zeitverlauf zu.²³ Aufgrund des begrenzten Biomassepotenzials und der zunehmenden Verlagerung der Biomasseverwendung in den Industriesektor, fällt der Anstieg im Segment der Wohngebäude vergleichsweise gering aus. Da nach 2025 keine Gas- und Ölheizungen eingebaut werden und die Betriebsdauer auf 20 Jahre begrenzt wird, sind die Anteile der mit Öl oder Gas beheizten Wohnfläche stark rückläufig. Die wenigen im Jahr 2045 noch verbleibenden Gasheizungen werden mit Biomethan betrieben.

Abbildung 36: Beheizungsstruktur Wohnfläche



²³ Solarthermische Anlagen werden bei der Modellierung als Vereinfachung zu Vollversorgungsäquivalenten zusammengefasst. In der Regel werden Solarthermieanlagen in Kombination mit einem zusätzlichen Wärmeerzeuger eingebaut, z. B. einer Wärmepumpe, einem Pelletkessel oder aktuell noch mit einem Erdgaskessel. Diese Wärmeerzeuger ergänzen die solarthermische Wärmeerzeugung zu den Zeitpunkten, bei denen nicht ausreichend Wärme durch die Solarthermieanlage zur Verfügung steht (u.a. bei wenig Sonnenschein im Winter).

Abbildung 37: Beheizungsstruktur Gebäudefläche im GHD-Sektor



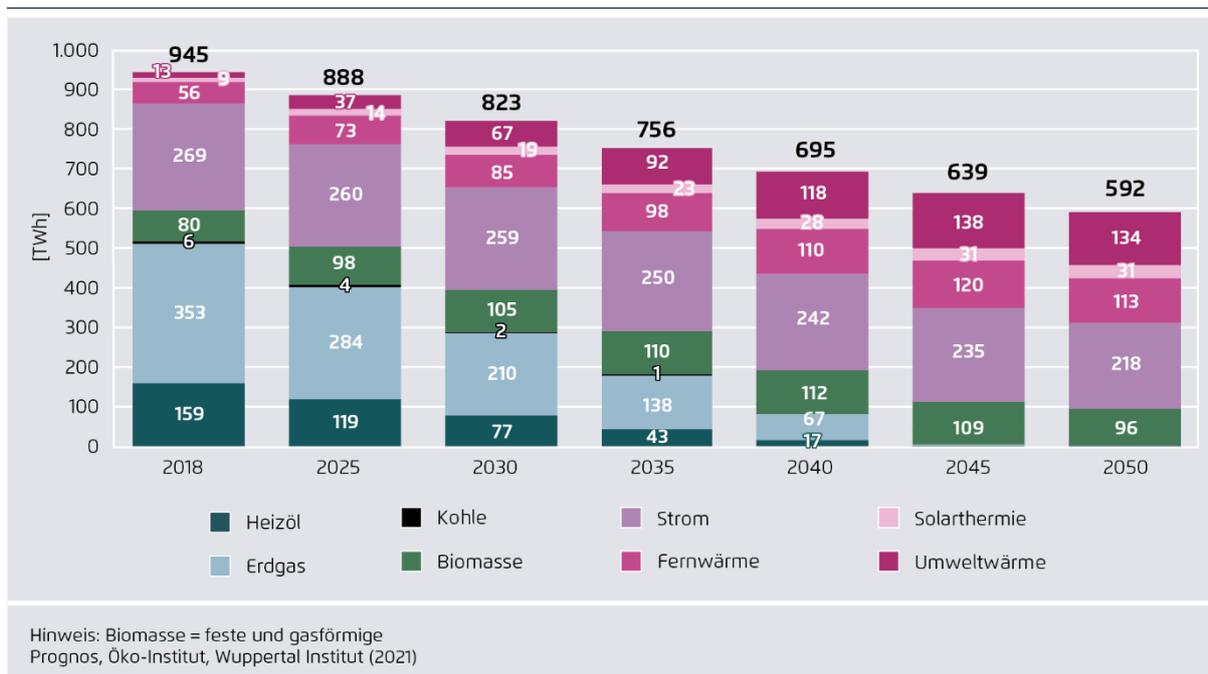
Die Entwicklung der Beheizungsstruktur der NWG ist vergleichbar mit derjenigen der großen Wohngebäude (MFH). Wie bei den Wohngebäuden verläuft der Ersatz fossiler Wärmeerzeuger im Szenario KN2045 schneller als im Szenario KN2050. Bis zum Jahr 2050 gleichen sich die Beheizungsstrukturen der beiden Szenarien wieder an. Langfristig wird je rund ein Drittel der Fläche mit Fernwärme und Wärmepumpen beheizt (Abbildung 37). Die Bedeutung fester Biomasse nimmt etwas stärker zu als bei den Wohngebäuden. Die feste Biomasse kommt insbesondere bei Altbauten zum Einsatz, bei denen keine Anschlussmöglichkeit an ein Wärmenetz vorhanden ist und der Einbau von Wärmepumpen schwierig ist (beispielsweise aufgrund baulicher Restriktionen). Auch bei den NWG werden die im Jahr 2045 noch vorhandenen Restbestände an Gasheizungen mit Biomethan betrieben.

3.3.4 Endenergieverbrauch und THG-Emissionen

Der Endenergieverbrauch des Gebäudesektors verringert sich im Szenario KN2045 bis zum Jahr 2045 gegenüber 2018 um 32 Prozent auf 639 Terawattstunden (Abbildung 38). Ursachen für den Rückgang sind hauptsächlich die effizienteren Gebäude, Anlagen, Antriebe und Elektrogeräte. Der Raumwärmeverbrauch wird zudem durch die Klimaerwärmung beeinflusst, da das wärmer werdende Klima den Bedarf nach Raumwärme verringert. Im Sektor GHD spielen auch zwei weitere Einflussfaktoren eine Rolle: Die Zahl an Erwerbstätigen und die Gebäudeflächen nehmen im Szenarienzeitraum ab.

Bedingt durch die beschriebene Veränderung der Beheizungsstruktur nimmt der Anteil der fossilen Energieträger am Endenergieverbrauch stark ab und sinkt von 55 Prozent im Jahr 2018 auf 35 Prozent im Jahr 2030. Bis zum Jahr 2045 fällt der fossile Energieverbrauch auf nahezu null (<1 Prozent).

Abbildung 38: Gebäudesektor: Endenergieverbrauch nach Energieträgern



Ebenfalls rückläufig ist der Stromverbrauch. Im Zeitraum 2018 bis 2045 verringert er sich um rund 13 Prozent auf 235 Terawattstunden (2030: 259 Terawattstunden). Der Stromverbrauch für Wärmepumpen steigt zwar stark an und liegt im Jahr 2045 bei 52 Terawattstunden (2030: 30 Terawattstunden). Die starken Effizienzsteigerungen bei Beleuchtung, IKT-Geräten und Haushaltsgeräten sowie der Rückgang des Stromverbrauchs konventioneller Elektroheizungen überwiegen den Mehrverbrauch durch Wärmepumpen und führen zu einer Reduktion des Stromverbrauchs.

Der Fernwärmeverbrauch steigt hingegen sehr stark und erhöht sich bis 2030 um annähernd 50 Prozent auf 85 Terawattstunden. Im Jahr 2045 liegt der Verbrauch bei 120 Terawattstunden, was in etwa einer Verdoppelung gegenüber dem Jahr 2018 bedeutet. Diese Zunahme ist auf die steigende Bedeutung bei der Erzeugung der Raumwärme und des Warmwassers zurückzuführen. Im Jahr 2045 werden 28 Prozent der beheizten Gebäudeflächen mit Wärmenetzen versorgt (2018: ca. 8 Prozent). Parallel zum Ausbau der Wärmenetze wird auch die Erzeugungsstruktur umgebaut, sodass die Fernwärme bis zum Jahr 2045 THG-frei erzeugt wird (Kapitel 3.1.5). Nach 2045 wird die Nachfrage nach Fernwärme aufgrund weiter fortschreitender Effizienz wieder etwas rückläufig.

Der Verbrauch und die Bedeutung der Erneuerbaren Energien nehmen im Zeitraum 2018 bis 2045 ebenfalls deutlich zu. Der Anteil der Energieträger Biomasse, Umweltwärme und Solarthermie am Sektorverbrauch erhöht sich von 11 Prozent im Jahr 2018 auf 43 Prozent im Jahr 2045.

- Der jährliche Verbrauch an Biomasse steigt bis zum Jahr 2030 und liegt ab dann bis 2045 bei rund 105 bis 110 Terawattstunden. Begrenzt wird ein weiterer Anstieg durch das verfügbare Potenzial. Prioritär ist der Einsatz in der Industrie, wo weniger kostengünstige Alternativen zur Erzeugung der hohen Prozesstemperaturen zur Verfügung stehen. Bei der im Gebäudesektor eingesetzten Biomasse handelt es sich überwiegend um feste Biomasse (Holz). Der Anteil des Biomethans am Biomasseverbrauch liegt bei 10 Prozent bis 15 Prozent und steigt

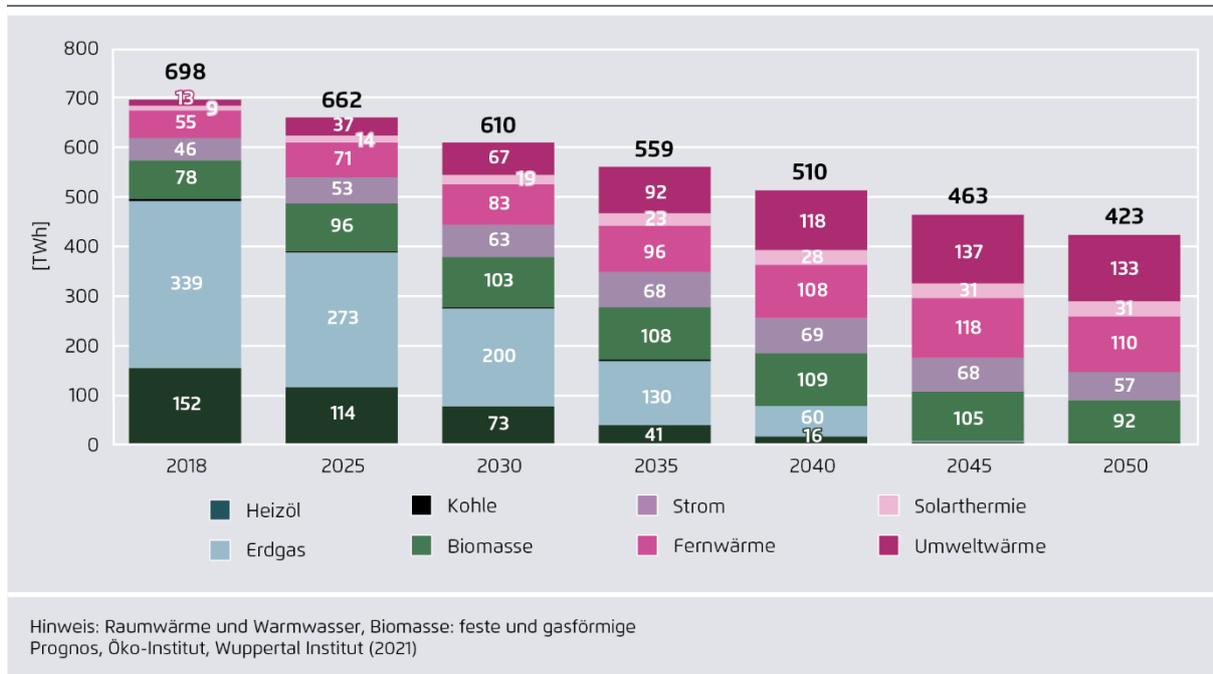
zwischenzeitlich auf rund 17 Terawattstunden. Langfristig (nach 2045) nimmt der Biomethanverbrauch in Gebäuden wieder ab, da durch den zunehmenden Wegfall der Gasheizungen auch die Nachfrage nach Biomethan für Heizzwecke abnimmt.

- Die Nutzung der Umweltwärme ist auf den Einsatz elektrischer Wärmepumpen zurückzuführen. Der Verbrauch steigt bis zum Jahr 2045 gegenüber 2018 um etwa den Faktor 10 auf annähernd 140 Terawattstunden.
- Der Verbrauch an Solarthermie steigt auf rund 30 Terawattstunden im Jahr 2045 und erreicht einen Anteil von rund 5 Prozent am Sektorverbrauch.

Strombasierte Energieträger wie erneuerbar erzeugter Wasserstoff, synthetisches Gas und Heizöl werden im Szenario KN2045 (wie auch im Szenario KN2050) nicht im Gebäudesektor eingesetzt. Dies ist auf die hohen Kosten für diese Energieträger zurückzuführen. Emissionsfreie Wärme kann kostengünstiger über Wärmepumpen, Wärmenetze oder Biomasse bereitgestellt werden.

Der Verbrauch für die Verwendungszwecke Raumwärme und Warmwasser ist von zentraler Bedeutung für den Energieverbrauch des Gebäudesektors. Insgesamt verringert sich dieser Verbrauch im Zeitraum 2018 bis 2045 um 34 Prozent (Abbildung 39). Aufgrund der weiter getätigten Effizienzmaßnahmen nimmt der Wärmeverbrauch nach 2045 weiter ab. Der Rückgang fällt bei der Raumwärme im Zeitraum 2018 bis 2045 mit 35 Prozent höher aus als beim Warmwasser (-28 Prozent). Dabei verringert sich der spezifische Raumwärmeverbrauch von rund 116 kWh/m² Wohn- bzw. Nutzfläche im Jahr 2016 auf unter 70 kWh/m² im Jahr 2045 (minus 40 Prozent). Die in Abbildung 39 dargestellte Entwicklung der Energieträgerstruktur spiegelt die Entwicklung der Struktur der Wärmeerzeuger wider.

Abbildung 39: Gebäudesektor: Endenergieverbrauch für Wärme nach Energieträgern

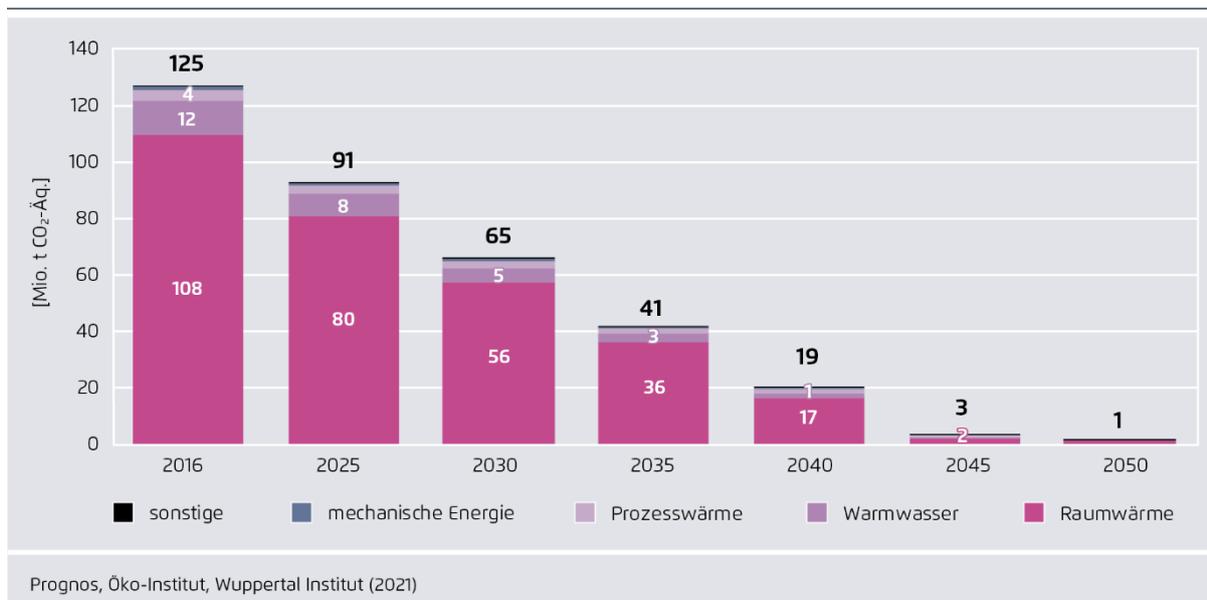


Die mit dem Energieverbrauch direkt verbundenen THG-Emissionen des Gebäudesektors verringern sich im Szenario KN2045 von 125 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2016 auf 65 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 (Abbildung 40). Dies entspricht einer mittleren jährlichen Reduktion um 5,4 Prozent. Der

Großteil der Emissionen entsteht bei der Erzeugung von Raumwärme, der Anteil der Raumwärme an den Sektoremissionen lag 2016 bei 86 Prozent. Die Erzeugung von Warmwasser verursachte 11 Prozent der Emissionen, knapp 5 Mio. t CO₂-Äq der THG-Emissionen entfielen auf Prozesse und Antriebe. Entsprechend entfällt der Großteil der THG-Reduktion auf den Bereich Raumwärme. 64 Prozent der Einsparung entfällt auf die Raumwärme in Wohngebäuden (PHH), weitere 22 Prozent auf die Raumwärme in NWG (GHD; Abbildung 30).

Bis zum Jahr 2045 sinken die THG-Emissionen auf nahezu null (<3 Mio. t CO₂-Äq). Auch im Zeitraum 2030 bis 2045 entfällt ein Großteil der Reduktion auf die Raumwärme. Bis zum Jahr 2050 sind alle fossilen Anlagen ersetzt und die THG-Emissionen sinken auf 1 Mio. t CO₂-Äq. Diese Restemissionen sind auf die Verwendung von Biomasse zurückzuführen. Bei deren Verbrennung werden neben CO₂, welches als THG-neutral betrachtet wird, auch geringe Mengen an CH₄ und N₂O emittiert. Die Emissionen dieser Gase werden in der THG-Bilanz und bei den Zielvorgaben berücksichtigt.

Abbildung 40: Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor nach Verwendungszwecken



3.4 Verkehr

3.4.1 Zielbild und Ausgangslage

Das Ziel im Verkehrssektor ist die Gestaltung einer zukünftigen Verkehrswelt, die Mobilität für alle gewährleistet und mit dem Übergang auf vollständige Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 kompatibel ist. Dies impliziert gleichzeitig einen deutlichen Rückgang der THG-Emissionen bis zum Jahr 2030.

Entsprechend des Entwurfs der Novelle des Klimaschutzgesetzes (KSG 2021) sollen die Emissionen im Verkehrssektor bis 2030 auf 85 Mio. t CO₂-Äq. sinken und damit um 4 Mio. t CO₂-Äq. stärker als im Szenario KN2045.

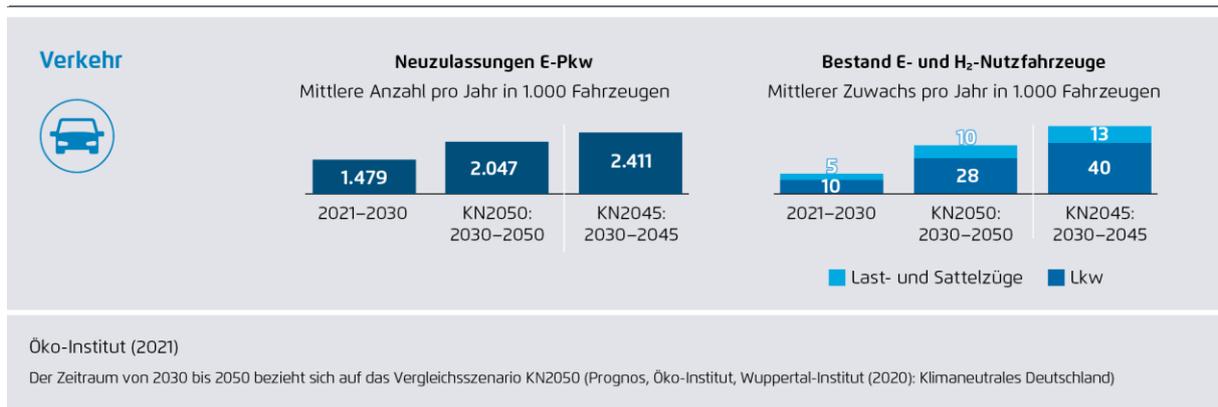
Vor dem Hintergrund, dass die THG-Emissionen im Verkehr mit 163 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2019 nach wie vor in etwa auf dem gleichen Niveau lagen wie 1990 und 93 Prozent des Endenergiebedarfs auf fossilen Energien beruhte, ist dies eine besondere Herausforderung. Es müssen eine ambitionierte technologische Entwicklung hin zu emissionsfreien Antrieben, eine Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr (MIV) zum öffentlichen Verkehr (ÖV) und zur aktiven Mobilität, eine erhöhte Auslastung der Pkw durch Pooling-Konzepte und eine Verlagerung des Gütertransports auf die Schiene erfolgen, wenn auch der Verkehrssektor seinen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten soll. Bei unveränderter Verkehrsnachfrage bedeutet die Klimaneutralität bereits im Jahr 2045 im Szenario KN2045 gegenüber dem Szenario KN2050 eine schnellere Marktdurchdringung von E-Pkw und alternativen Antriebstechnologien bei den Lkw sowie einen beschleunigten Markthochlauf von strombasierten Kraftstoffen, vor allem im Luft- und Seeverkehr.

Für das Szenario KN2045 wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Personenverkehrsnachfrage verbleibt insgesamt etwa auf dem heutigen Niveau von rund 1.200 Milliarden Personenkilometern. Durch die geteilte Nutzung von Fahrzeugen steigt die Auslastung und es werden auch dadurch weniger Fahrzeugkilometer zurückgelegt.
- Bei der Güterverkehrsleistung wird eine weitere Zunahme an Handelsströmen und Transporten entsprechend der BIP-Entwicklung angenommen. Der Transport von Gütern erreicht ausgehend von rund 660 Milliarden Tonnenkilometern im Jahr 2016 bis zum Jahr 2045 rund 850 Milliarden Tonnenkilometer. Gleichzeitig nimmt der Schienenverkehr bis 2030 stärker zu als der Straßengüterverkehr und erreicht 190 Milliarden Tonnenkilometer bis 2030, 220 bis 2045 und 230 Milliarden Tonnenkilometer bis 2050.
- Die motorisierten Verkehre, die auch 2045 und 2050 noch einen großen Teil des Verkehrsaufkommens ausmachen, müssen dann klimaneutral betrieben werden und bereits 2030 einen deutlichen Beitrag zur Zielerreichung leisten. Entsprechend wird eine zügige Umwälzung des Pkw-Bestands dadurch erreicht, dass ab 2032 keine verbrennungsmotorischen Antriebe mehr zugelassen werden. Das gilt auch für Plug-In-Hybride. Der Hochlauf der Neuzulassungen von Elektro-Pkw zwischen 2020 und 2032 erfolgt nahezu linear. Anders als im Szenario KN2050 mit rund 4 Millionen Pkw, sind ab dem Jahr 2045 im Szenario KN2045 bis auf einen Restbestand von rund 1,3 Millionen Oldtimern keine verbrennungsmotorischen Pkw mehr auf Deutschlands Straßen unterwegs.
- Im Straßengüterverkehr ist die technologische Entwicklung derzeit weniger absehbar als bei den Pkw, bei denen der Trend eindeutig Richtung batterieelektrischer Fahrzeuge geht. Für das Lkw-Segment stehen ebenfalls batterieelektrische Fahrzeuge zur Diskussion, aber auch die direkte Elektrifizierung durch Oberleitungen, insbesondere bei den Last- und Sattelzügen. Gleichzeitig wird der Brennstoffzellen-Lkw als Option gesehen, lange Strecken ohne Unterbrechungen durch notwendige Ladevorgänge zu absolvieren. Entsprechend dem derzeitigen Stand der Diskussion und vor dem Hintergrund unterschiedlicher Anforderungen an die Reichweiten und Flexibilität wird im Szenario daher langfristig ein Technologie-Mix angenommen. Aufgrund der technologischen Entwicklungsreife kommen die batterieelektrischen Lkw und Oberleitungs-Lkw früher in den Markt als die Brennstoffzellenfahrzeuge, und bereits im Jahr 2030 sind über die Hälfte der Neuzulassungen bei den Lkw elektrisch. Auch im Straßengüterverkehr fahren ab 2045 nahezu alle Fahrzeuge ohne Verbrennungsmotor, während im Szenario KN2050 noch rund 4 Prozent der Fahrleistung mit Verbrennern erbracht wird.
- Zusätzlich sind CO₂-freie Kraftstoffe im Verkehrssektor notwendig, um diesen langfristig klimaneutral zu gestalten. Aufgrund der Nutzungskonkurrenz vor allem zum Sektor Industrie, bei dem die Biomasse über die gesamte Prozesskette hinweg effizienter eingesetzt werden kann, werden Biokraftstoffe im Verkehr bis 2045 nicht mehr eingesetzt. Um Lock-In-Effekte zu vermeiden, wird der Biokraftstoffeinsatz im Verkehr daher auch bis 2030 nicht über das

heutige Niveau hinaus erhöht. Strombasierte Flüssigkraftstoffe werden als Dekarbonisierungsoption für den Luft- und Seeverkehr eingesetzt, bis 2035 zunächst im nationalen Luftverkehr. Da im Jahr 2045 noch geringe Restbestände an Pkw und Lkw mit verbrennungsmotorischen Antrieben (u. a. Hybride) im Bestand sind, werden auch diese mit strombasierten Flüssigkraftstoffen versorgt. Hinzu kommt der Bedarf an Wasserstoff für die Brennstoffzellen-Lkw.

Abbildung 41: Umsetzungsgeschwindigkeit im Verkehrssektor in den Szenarien KN2050 und KN2045



3.4.2 Verkehrsnachfrage

Personenverkehr

Im Szenario KN2045 ist bis zum Jahr 2045 eine grundlegende Mobilitätswende erfolgt, ohne jedoch das Gesamtaufkommen des Personenverkehrs zu verringern. Das Verkehrsangebot wird erweitert und multimodales Verkehrsverhalten erleichtert. Die Mobilitätswende führt dabei nicht zu weniger Mobilität, sondern zu einer anderen Qualität von Mobilität. Das bedeutet, dass die Verkehrsnachfrage je Einwohner in etwa konstant bleibt, aber Wege auf umweltverträgliche Verkehrsmittel verlagert und gebündelt werden. So verringern sich die Verkehrsaufwände mit dem privaten Pkw und Mobilität wird mit den Erfordernissen des Klimaschutzes in Einklang gebracht. Diese grundsätzliche Entwicklung entspricht den Annahmen aus dem Szenario KN2050.

Wie auch im Szenario KN2050 wurden im Szenario KN2045 keine expliziten Annahmen über strukturelle Verschiebungen im motorisierten Individualverkehr durch autonome Fahrzeuge getroffen, denn entscheidend für die Entwicklung des autonomen Fahrens werden neben der gesellschaftlichen Akzeptanz der Fahrzeuge und den Adaptionsraten vor allem auch die politischen Rahmenbedingungen sein. Voraussetzung für das Szenario KN2045 ist, dass autonome Fahrzeuge den öffentlichen Verkehr und das Pooling fördern, anstatt die Bedingungen für den privaten Pkw zu verbessern.

Da das Mobilitätsverhalten im Status quo und auch perspektivisch u. a. aufgrund der verfügbaren Optionen zwischen Stadt und Land sehr unterschiedlich ist, wird in gleicher Weise wie im Szenario KN2050 zwischen den Raumkategorien Stadt, Halbstadt und Land differenziert. Details hierzu können der Studie „Klimaneutrales Deutschland“ entnommen werden.

In Anlehnung an die Studie Agora (2019) wurden basierend auf den Daten „Mobilität in Deutschland“ Annahmen für die Modal-Split-Verteilung für die einzelnen Räume für die Jahre 2030 und 2050 getroffen:

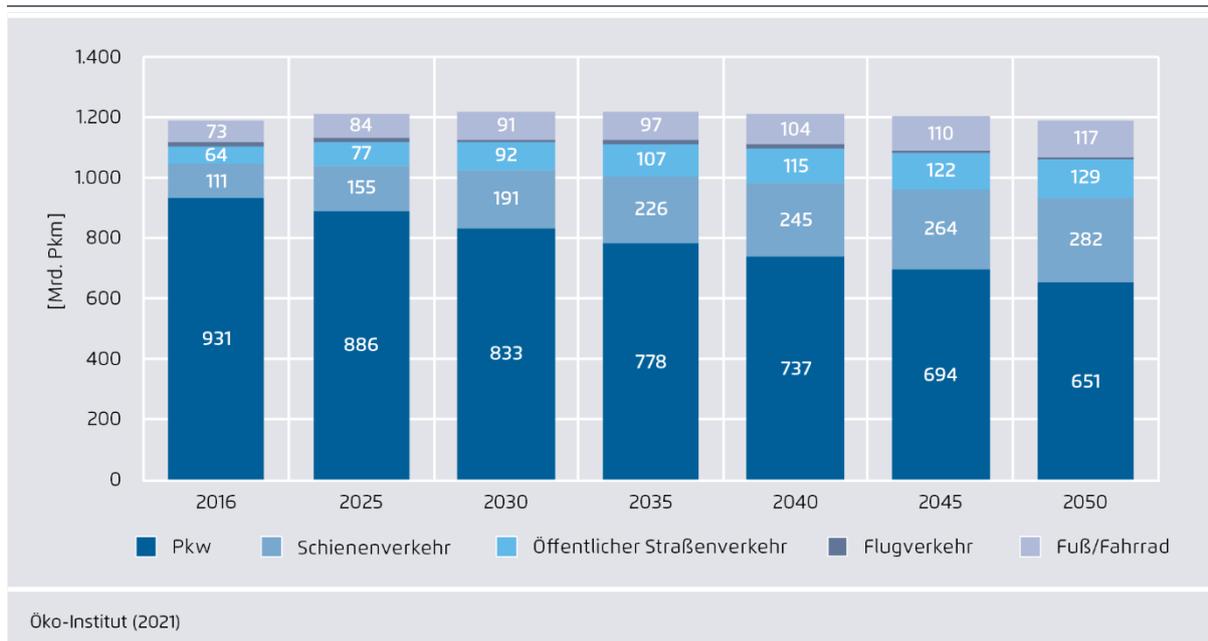
- Es werden die Annahmen aus Agora (2019) zur Entwicklung im Bereich Carsharing (gemeinschaftliche Nutzung von Fahrzeugen), Ridesharing (Teilen einer Autofahrt zum Beispiel über Mitfahrgelegenheiten oder Taxifahrten) und Ridepooling (gemeinsame Nutzung eines Fahrzeuges durch mehrere Personen zur selben Zeit) für die einzelnen Räume übernommen.
- Der öffentliche Verkehr (ÖV) verdoppelt sich nahezu bis 2035 im Mittel über alle Regionen und nimmt danach weiter zu, wobei eine Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr (MIV) stattfindet. In der Stadt und auf dem Land ist das Verlagerungspotenzial geringer als in der Halbstadt, bei allgemeiner Orientierung an (Agora 2019).
- Der Radverkehr wächst bis zum Jahr 2050 insgesamt um 80 Prozent, wobei das Wachstum in der Stadt über- und auf dem Land unterdurchschnittlich ausfällt.
- Der Fußverkehr wächst bis zur Mitte des Jahrhunderts um insgesamt 28 Prozent.

Die Abbildung 42 zeigt, dass die insgesamt zurückgelegten Personenkilometer über die Jahre bis 2050 auf ähnlich hohem Niveau bleiben wie heute. Es kommt allerdings zu einer deutlichen Veränderung beim Anteil der Verkehrsmittel. Car-Sharing, Ride-Sharing und Ride-Pooling sind dabei zusammen mit dem motorisierten Individualverkehr als Verkehrsmittel „Pkw“ dargestellt.

Die Verkehrsnachfrage im Pkw-Segment nimmt bis 2030 um 11 Prozent zu Gunsten des Schienenverkehrs, des Rad- und Fußverkehrs sowie des öffentlichen Straßenverkehrs ab. Bis 2045 beträgt der Rückgang 25 Prozent gegenüber 2016, bis 2050 27 Prozent. Durch die Verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsträger und eine höhere Auslastung u. a. durch Pooling-Fahrzeuge liegen die Minderungen bezogen auf die Fahrleistung der Fahrzeuge dann bei 13 Prozent und bis 2045 bei 33 Prozent.

Die Pkw-Fahrleistung stieg zwischen 2014 und 2017 jährlich um rund ein Prozent (KBA 2019) und verharrt seitdem auf ähnlichem Niveau. Verglichen mit der Entwicklung der letzten Jahre ist also eine deutliche Trendumkehr notwendig. Voraussetzung dafür ist eine Neuorientierung der politischen Rahmensetzung. So müssen die infrastrukturellen Kapazitäten für eine Verdopplung des öffentlichen Verkehrs bis 2035 geschaffen und dessen Attraktivität u. a. über die Reduktion der Reisezeiten, beispielsweise durch höhere Taktichten, weiter gefördert werden. Derzeit sind durch Digitalisierung und Vernetzung Veränderungen im Verkehrssystem zu beobachten, die sich zukünftig noch deutlich verstärken werden. Digitale Plattformen mit Echtzeitinformationen und mobilen Buchungs- und Bezahlssystemen machen den öffentlichen Verkehr durch eine größere Transparenz und Flexibilität wie auch einen einfacheren Zugang spürbar attraktiver. Neue Sharing- und Pooling-Modelle wurden durch die Digitalisierung populärer. Car- und Ridesharing werden als wirtschaftlich tragfähige Geschäftsmodelle in ein nachhaltiges Gesamtsystem für Stadt und Land integriert. Die Wahl energieeffizienterer Verkehrsmittel wird durch eine Kombination aus fordernden und fördernden Instrumenten auf kommunaler, Länder- und Bundesebene unterstützt.

Abbildung 42: Entwicklung Personenverkehrsnachfrage



Güterverkehr

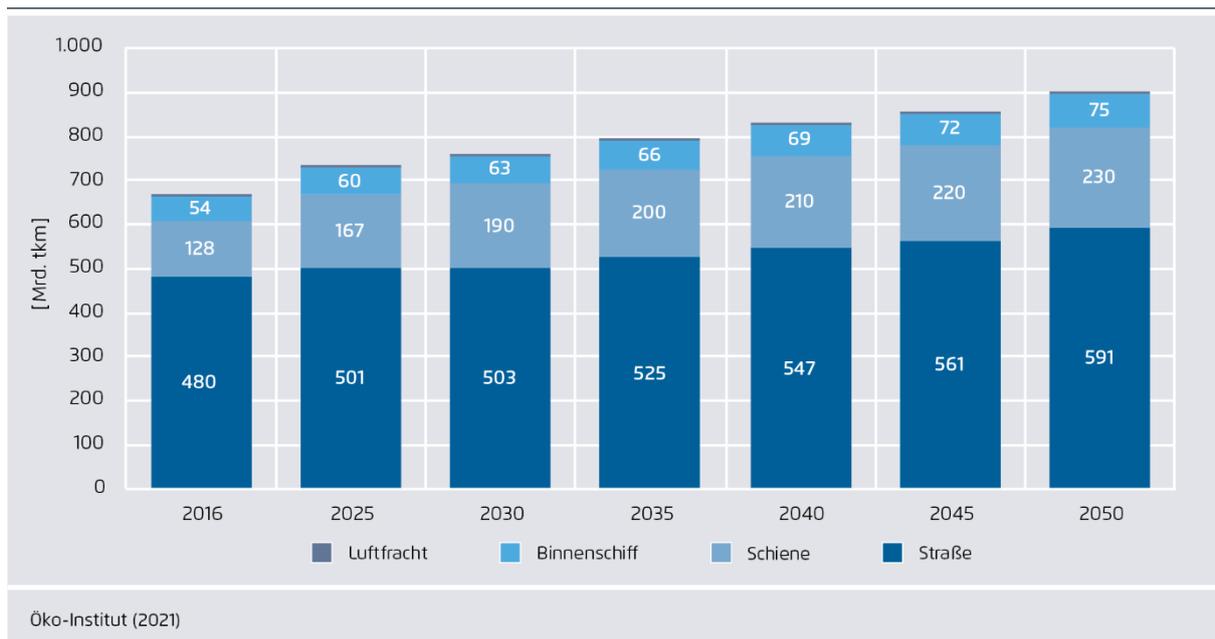
Die Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Güterverkehr wurde – analog zum Vorgehen in der Studie „Klimaneutrales Deutschland“ – aus der Entwicklung des BIP abgeleitet, wobei zunächst von einem Korrelationsfaktor von 225 tkm/Mio. Euro BIP in Anlehnung an Zimmer et al. (2016) ausgegangen wird. Die Güterverkehrsleistung wächst also mit steigendem BIP proportional weiter (jede Mio. BIP geht dabei mit einer Zunahme der Güterverkehrsleistung von 225 tkm einher). In einem nächsten Schritt wurden die Transportleistungen für die Gütergruppen reduziert, welche in einer klimaneutralen Welt weniger transportiert werden. So reduziert sich das Aufkommen in den Gütergruppen Steinkohle, Braunkohle, Rohöl, Koks um bis zu 100 Prozent im Jahr 2045 und folgende. Aber auch der Transport in den Gütergruppen Düngemittel, Stahl und Eisen sowie Fahrzeuge und Fahrzeugteile geht jeweils um rund ein Drittel gegenüber einer Referenzentwicklung ohne deutliche Klimaschutzmaßnahmen zurück. Grundlage für die Ableitung der Güterverkehrsleistung nach Gütergruppen bildete das Projekt Renewability (Zimmer et al. 2016), da in diesem die Transportleistungen je Gütergruppe bis 2050 in einer Referenzentwicklung zur Verfügung stehen.

Zusätzlich wird die Auslastung der Lkw bis 2040 um 7 Prozent bei den leichten Nutzfahrzeugen sowie bei den übrigen Lkw um 15 Prozent erhöht.

Eine Verdopplung des Schienengüterverkehrs sollte angestrebt werden, scheint aber bis 2030 auch hinsichtlich der langen Zeiträume für den Ausbau von Schieneninfrastrukturen nur schwer realisierbar. Nach der Bewertung der Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 (Stand Januar 2020) wird davon ausgegangen, dass bis 2030 182 Mrd. tkm auf der Schiene transportiert werden können (Öko-Institut et al. 2020). Daher wird im Szenario KN 2045 ebenso wie im KN 2050 eine knappe Verdopplung des Schienengüterverkehrs bis 2050 auf 230 Mrd. tkm angenommen. Bis zum Jahr 2030 werden davon 190 Mrd. tkm und bis zum Jahr 2045 220 Mrd. tkm realisiert. Notwendig dafür ist eine enge Verzahnung von Deutschlandtakt und dem Ausbau der Infrastrukturkapazitäten.

Insgesamt ergibt sich dann das folgende Ergebnis hinsichtlich der Verkehrsleistung im Güterverkehr (Abbildung 43): Eine weiter deutlich steigende Güterverkehrsnachfrage bis 2030 um 14 Prozent und bis 2045 um knapp 30 Prozent gegenüber 2016 bei gleichzeitiger Änderung des Modal-Splits hin zu 66 Prozent Straße, 26 Prozent Schiene und 8,5 Prozent Binnenschifffahrt im Jahr 2045. Die Güterverkehrsleistung im Szenario KN2045 liegt im Jahr 2045 geringfügig unter der des Szenarios KN2050, da die Dämpfung durch die Güter, die in einer klimaneutralen Welt weniger transportiert werden, bereits 5 Jahre früher eintritt.

Abbildung 43: Entwicklung Güterverkehrsnachfrage



Luft- und Seeverkehr

Die höchsten Wachstumsraten verzeichnete in den letzten Jahren der internationale Luft- und Seeverkehr. Sie stellen eine besondere Herausforderung für den Klimaschutz dar. Die Verantwortung zur Minderung der Emissionen liegt nicht bei den Nationalstaaten, sondern bei internationalen Gremien. Grundsätzlich werden die Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs nicht dem nationalen Treibhausgasinventar zugerechnet, sondern nur (basierend auf dem Kerosinabsatz in Deutschland) nachrichtlich mitgeteilt. Entsprechend werden die Emissionen auch im Rahmen dieser Studie separat ausgewiesen.

Für den internationalen Personenluftverkehr wird wie im Szenario KN2050 im Zeitraum 2017-2040 ein weiterer jährlicher Anstieg von durchschnittlich einem Prozent hinterlegt. Das liegt niedriger als die historischen Trends (2010-2018: 3 Prozent jährlich), da angenommen wird, dass sich die Anzahl der Berufsreisen durch eine zunehmende Anzahl von digitalen Treffen und Konferenzen abschwächt (Rutkowsky 2020). Ab 2035 werden zur Dekarbonisierung im internationalen Luftverkehr verstärkt strombasierte Kraftstoffe eingesetzt, welche gegenüber fossilem Kerosin fast viermal so teuer sind und daher zu einer Erhöhung der Preise um fast 50 Prozent zwischen 2035 und 2045 führen. Im Zeitraum 2030-2045 geht vor diesem Hintergrund und durch weitere preispolitische Maßnahmen der Personenluftverkehr zurück und liegt in 2045 wieder in etwa auf dem Niveau von 2016.

Der Luftfrachtverkehr ist in der Vergangenheit im Verhältnis zum BIP stets überproportional angestiegen und wird entsprechend diesem Trend für die Zukunft mit einem jährlichen Wachstum von rund 3,5 Prozent fortgeschrieben. Die Effizienzverbesserung im Luftverkehr (Auslastung und Energieverbrauch) wird mit jährlich 1,5 Prozent fortgeschrieben.

Für den Seeverkehr wird die Entwicklung bis 2050 über Wachstumsraten-Prognosen der IMO (2014), die BIP-Entwicklung in Deutschland sowie güterklassenspezifische Regressionsanalysen aus Zimmer et al. (2016) mit jährlich rund 2,6 Prozent Wachstum abgeleitet. Wie auch im bodengebundenen Güterverkehr werden Transporte von Gütern, deren Nachfrage sich in einer am Klimaschutz orientierten Welt reduziert, durch eine Reduktion der Güterverkehrsnachfrage gesenkt. Die Effizienzsteigerung im Seeverkehr liegt bis 2045 bei jährlich knapp zwei Prozent, was eher der „konservativen“ Annahme der IMO (2014) entspricht.

3.4.3 Neuzulassungen und Bestand

Pkw

Im Szenario KN2045 wird trotz eines deutlichen Rückgangs des Pkw-Verkehrs auch bis 2045 ein großer Anteil der Verkehrsleistung (58 Prozent der Personenkilometer) mit dem Pkw bewältigt (einschließlich Car-Sharing, Ride-Sharing, und Ride-Pooling). Die Pkw sollten entsprechend mit CO₂-freien Energieträgern betrieben werden und aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien möglichst effizient sein. Von den möglichen Technologien sind batterieelektrische Pkw besonders vorteilhaft, da sie erneuerbaren Strom ohne Umwandlungsverluste direkt nutzen können. Soll der Verkehr bis 2045 klimaneutral werden, so ist es aufgrund der durchschnittlichen Lebensdauer von Pkw von rund 14 Jahren zielführend, spätestens ab dem Jahr 2032 nur noch Pkw neu zuzulassen, die rein elektrisch betrieben werden. Daher wird im Szenario KN2045 für neu zugelassene Pkw ein Auslaufen der Verbrennertechnologie inklusive der Plug-In-Hybride (PHEV) bis 2032 angenommen. Gleichzeitig wird die Bestandsflotte schneller umgewälzt. Im Ergebnis sind im Szenario KN2045 bis auf rund 1,3 Millionen Oldtimer im Jahr 2045 nur noch elektrisch betriebene Pkw unterwegs.

Der Anteil der E-Fahrzeuge an den Neuzulassungen steigt im Szenario KN2045 wie im Szenario KN2050 näherungsweise linear an und erreicht im Jahr 2030 bereits 78 Prozent. Der Anteil der Plug-In-Hybride erreicht um das Jahr 2030 einen Höchstwert von knapp 30 Prozent und nimmt danach stetig ab. Ab dem Jahr 2032 werden keine Plug-In-Hybride mehr verkauft. So kann sichergestellt werden, dass im Jahr 2045 fast ausschließlich direkt elektrifizierte Pkw im Bestand sind und die Mengen an synthetischen Kraftstoffen im Straßenverkehr geringgehalten werden. Ein ähnliches Vorgehen für ein Phase-Out für Verbrenner plant die Kommission im Rahmen ihres *Climate Target Plan 2030*. Dort wird die Frage gestellt, wie lange sich Pkw im Fahrzeugbestand befinden und wann keine verbrennungsmotorischen Pkw mehr zugelassen werden dürfen, damit der Bestand im Jahr 2050 möglichst vollständig elektrifiziert ist.

Einhergehend mit steigenden Fahrzeugzahlen von BEV und PHEV im Bestand findet ein Ausbau der öffentlichen und privaten Ladeinfrastruktur statt.

Die konventionellen Antriebe werden bis 2030 ebenfalls effizienter: bis 2025 um rund 14 Prozent und bis 2030 um rund 28 Prozent gegenüber 2021. Diese angenommene Entwicklung ist ambitioniert insbesondere vor dem Hintergrund, dass aktuell die durchschnittlichen Emissionen der Verbrenner durch höhere Motorisierung/Gewicht/SUV-Trend weiter zunehmen.

Das aktuelle Ziel der Flottengrenzwerte der EU sieht vor, dass die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Pkw-Neuzulassungen in der EU im Jahr 2030 um 37,5 Prozent gegenüber 2021 reduziert werden. Im Szenario KN2045 wird dieser Wert für Deutschland durch den hohen Anteil an E-Pkw und die weitere Effizienzsteigerung verbrennungsmotorischer Pkw wie im Szenario KN2050 mit einer Minderung von rund 75 Prozent deutlich übertroffen.

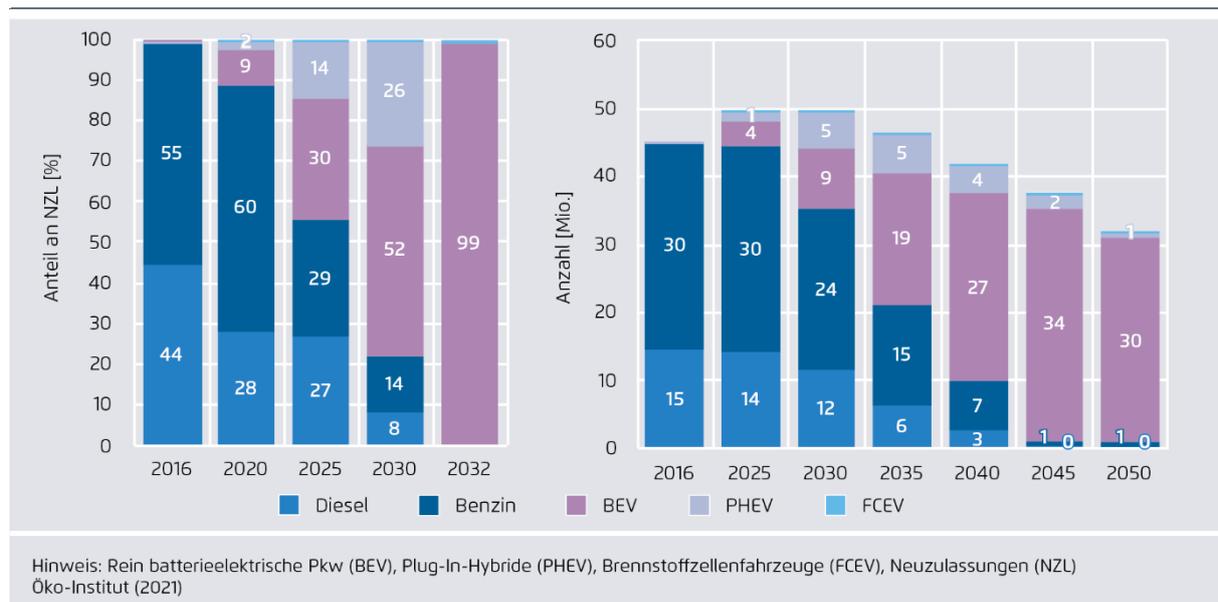
Die Neuzulassungen ab dem Jahr 2032 bestehen nahezu ausschließlich aus rein batterieelektrischen Pkw (BEV). Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) kommen in diesem Szenario nur zu sehr geringen Anteilen in den Pkw-Markt, denn sie sind wegen der auch in Zukunft vergleichsweise deutlich höheren Technologiekosten im Pkw-Bereich nicht konkurrenzfähig.

Die schnelle Entwicklung der Neuzulassungen hin zu E-Fahrzeugen muss durch einen entsprechenden Instrumenten-Mix ermöglicht werden. Sie ist nicht rein kostengetrieben und wird durch die bisher geltenden Flottenstandards auch nicht ausreichend angereizt.

Der schnelle Markthochlauf von E-Fahrzeugen in der Bestandsentwicklung zeigt aufgrund der teils langen Haltedauern von Pkw erst mit Verzögerung eine substanzielle Wirkung. Im Jahr 2030 werden rund 14 Millionen E-Fahrzeuge im Bestand gezählt, was einem Anteil von 28 Prozent entspricht und das Ziel aus dem Klimaschutzprogramm 2030 in Höhe von 7 bis 10 Millionen E-Pkw deutlich übertrifft. Es verbleibt ein stetig sinkender Anteil an Verbrennern im Bestand, bis der Pkw-Bestand im Jahr 2045 dann nahezu vollständig aus rund 34 Millionen BEV besteht.

Der Rückgang des Pkw-Bestands ist zum einen eine Folge der sinkenden Gesamt-Fahrleistung. Zum anderen werden gerade in Innenstädten weniger Fahrzeuge beschafft, da stärker auf den Umweltverbund, also auf den öffentlichen Verkehr, den Rad- und Fußverkehr sowie Poolingangebote, zurückgegriffen wird und Fahrzeuge immer mehr geteilt genutzt werden. Die durchschnittliche Fahrleistung pro Pkw geht leicht zurück von heute rund 13.500 Kilometern je Pkw auf rund 12.500 Kilometer je Pkw im Jahr 2045.

Abbildung 44: Entwicklung Neuzulassungen und Bestand Pkw



Last- und Sattelzüge

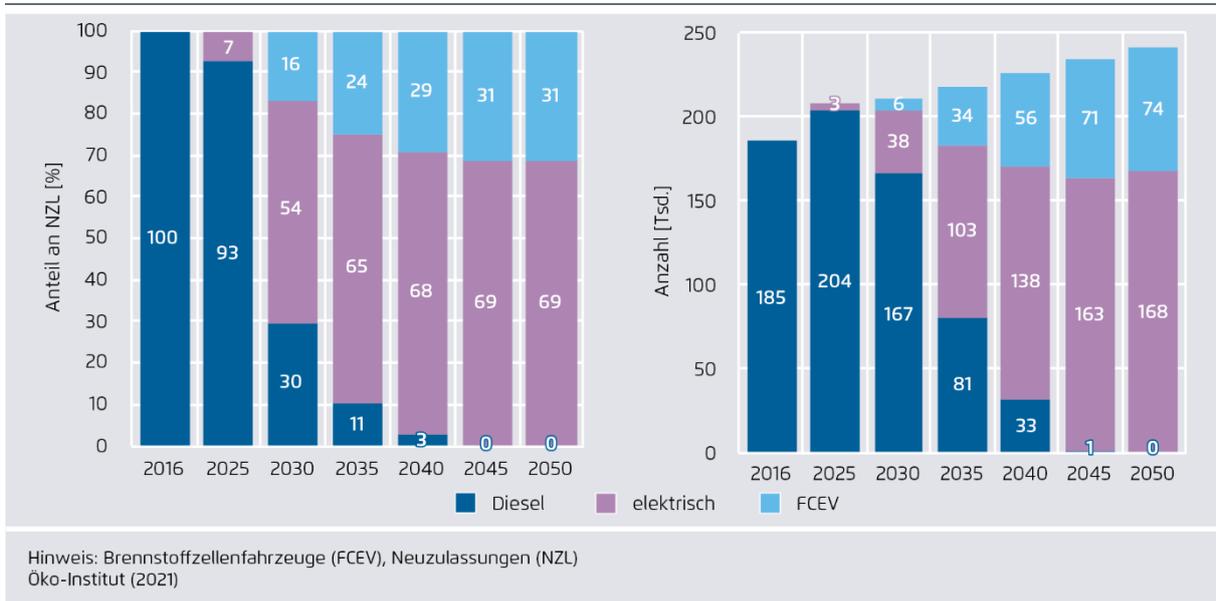
Die Bundesregierung hat sich im Klimaschutzplan das Ziel gesetzt, dass im Jahr 2030 ein Drittel der Lkw-Fahrleistung elektrisch erfolgt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass fast 70 Prozent der Fahrleistung im Straßengüterverkehr (ohne leichte Nutzfahrzeuge) von Last- und Sattelzügen erbracht wird. Die verbleibenden Fahrzeugkilometer verteilen sich dann jeweils etwa hälftig auf Lkw kleiner 7,5 Tonnen und größer 7,5 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht.

Ab 2025 erfolgt deshalb eine starke Zunahme von alternativen Antrieben, sodass 2030 bereits über 50 Prozent elektrische sowie rund 15 Prozent Brennstoffzellenfahrzeuge bei den Last- und Sattelzügen zugelassen werden. Ab 2040 kommen dann ähnlich wie im Szenario KN2050 nahezu keine konventionellen Lkw mehr in den Markt und die Neuzulassungen verteilen sich zu 1/3 auf Brennstoffzellenfahrzeuge und 2/3 auf elektrische Fahrzeuge. Die rein elektrischen Fahrzeuge können batterieelektrische Lkw, Oberleitungs-Lkw (O-Lkw, batteriehybrid) oder eine Kombination aus Oberleitung und batterieelektrisch sein. Die Zusammensetzung hängt ab von politischen Rahmenbedingungen, dem Ausbau eines flächendeckenden Ladesystems in Depots, Umschlagpunkten und von Ladepunkten an Autobahnen sowie vom Ausbau einer Oberleitungsinfrastruktur entlang der Autobahnen.

Werden alle Technologien gleichwertig adressiert, kommt es zu einem parallelen Aufbau von drei unterschiedlichen Energieversorgungsinfrastrukturen: Wasserstofftankstellen, Schnellladeinfrastruktur und Oberleitungssystem. Dieser parallele Aufbau ist einerseits mit höheren Kosten verbunden, andererseits ermöglicht er Nutzern eine gewisse Flexibilität bei der Fahrzeugwahl. Tatsächlich können auch Synergien entstehen: die O-Lkw können beispielsweise die Ladeinfrastruktur der BEV nutzen, um die Reichweite abseits der elektrifizierten Streckenabschnitte zu erhöhen. Mittelfristig sind auch Kombinationen, beispielsweise von Brennstoffzellen und Oberleitung denkbar. Perspektivisch, das zeigen die Berechnungen von Hacker et al. (2020), können auf einem rund 4.000 Kilometer langen Oberleitungsnetz im Jahr 2045 unter geeigneten Rahmenbedingungen rund 100.000 O-Lkw betrieben und damit eine elektrische Fahrleistung von über 20 Milliarden Fahrzeugkilometern erbracht werden. Dies entspricht rund 40 Prozent der Fahrleistung der Last- und Sattelzüge in den beiden Szenarien KN2045 und KN2050.

Grundsätzlich ist der Energieverbrauch von O-Lkw und BEV ähnlich. Vorteil des Oberleitungs-Lkw ist, dass mit heute realisierten Batteriekapazitäten auch ein Einsatz im Fernverkehr ohne signifikante Nutzlastverluste möglich wäre; die Batterie wäre dabei je nach Konfiguration des O-Lkw nur rund ein Viertel bis halb so groß wie bei einem reinen BEV (Hall, Lutsey 2019). Neben der größeren Nutzlast gegenüber einem reinen BEV bzw. einem geringeren Fahrzeuggewicht lassen sich damit auch bei der Ressourceninanspruchnahme für die Fahrzeugbatterien Einsparungen erzielen. O-Lkw können während der Fahrt geladen werden, BEV dagegen müssen stationär, beispielsweise in den Fahrerpausen, geladen werden. Dadurch führt der Einsatz von O-Lkw zu einer zeitlich und räumlich weniger konzentrierten Stromnachfrage. Während O-Lkw in Bezug auf die Pausenzeiten eine größere Flexibilität aufweisen, besitzen sie eine geringere Flexibilität in Hinblick auf die möglichen Einsatzstrecken.

Abbildung 45: Entwicklung Neuzulassungen und Bestand Last- und Sattelzüge im Szenario KN2045

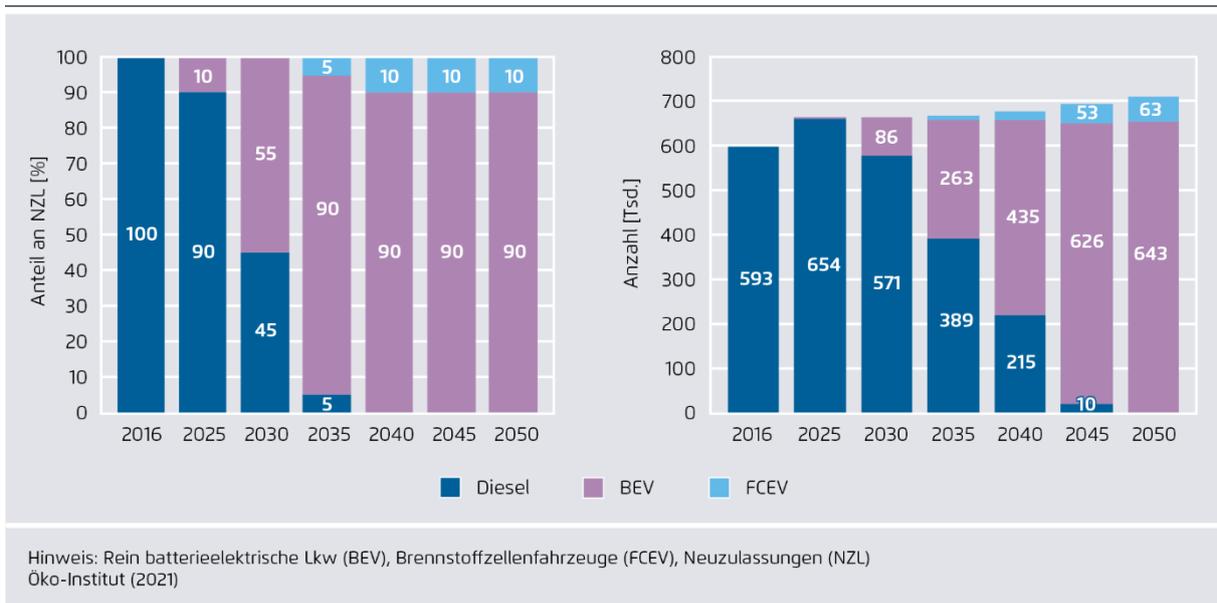


Lkw

Bei den restlichen Lkw erfolgt wie bei Last- und Sattelzügen eine starke Elektrifizierung ab etwa 2025, sodass im Jahr 2030 bereits über die Hälfte der Neuzulassungen E-Fahrzeuge sind. Bereits 2035 werden nahezu keine Verbrenner mehr zugelassen. Brennstoffzellenfahrzeuge gelangen erst ab etwa 2035 in den Markt, da bei leichteren Fahrzeugen batterieelektrische Konzepte konkurrenzfähiger sind: Durch die kleinere Batterie ist der Kostenvorteil von BEV gegenüber Brennstoffzellenfahrzeugen bei kleineren Lkw größer als bei Last- und Sattelzügen.

Im Jahr 2030 befinden sich knapp 90.000 BEV-Lkw im Bestand, der Großteil besteht dann noch aus Diesel-Fahrzeugen. Bis 2045 befinden sich dann rund 625.000 BEV-Lkw im Bestand und dazu rund 53.000 Brennstoffzellen-Lkw. Es gibt einen geringen Restbestand an Diesel-Lkw, der dann mit synthetischen Kraftstoffen betrieben wird. Im Jahr 2050 fahren dann im Szenario KN2045 keine verbrennungsmotorisch betriebenen Lkw mehr auf Deutschlands Straßen, während es im Szenario KN2050 noch fast 60.000 sind.

Abbildung 46: Entwicklung Neuzulassungen und Bestand Lkw im Szenario KN2045

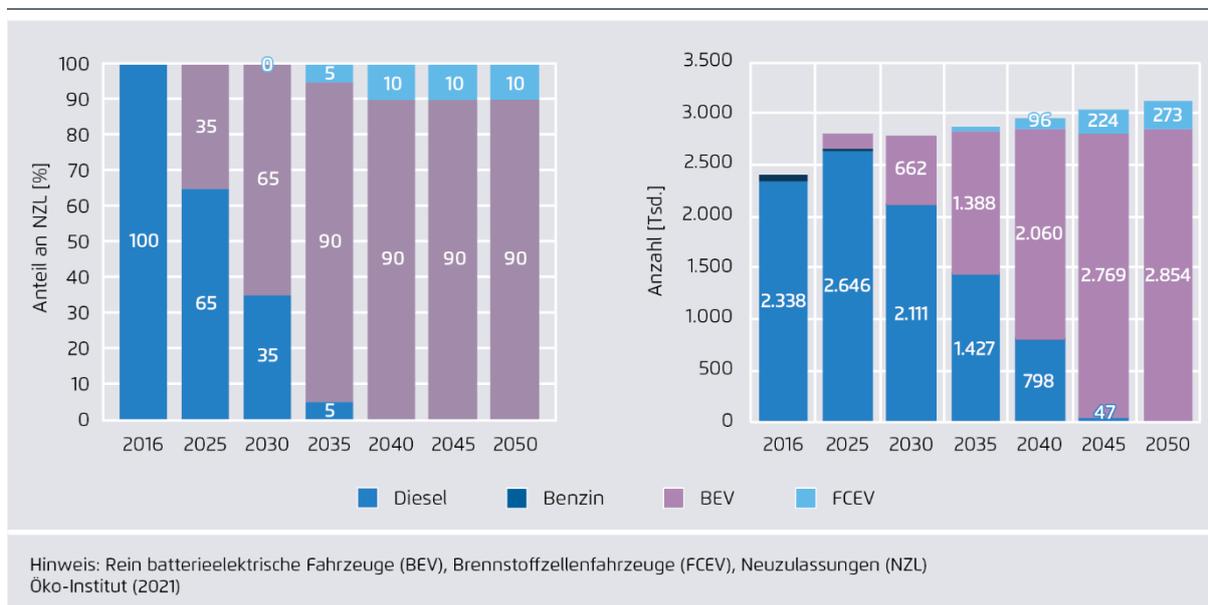


Leichte Nutzfahrzeuge

Bei den leichten Nutzfahrzeugen findet der Hochlauf der batterieelektrischen Antriebe etwas schneller statt als bei Lkw und in 2030 machen BEV bereits 65 Prozent der Neuzulassungen aus. Grund für den früheren Hochlauf ist die technologische Nähe zu Pkw und damit eine durch Skaleneffekte früherer Wirtschaftlichkeit. Ab 2035 werden keine nennenswerten Mengen an Verbrennern mehr neu zugelassen.

Im Jahr 2030 sind 0,7 Millionen BEV-Fahrzeuge im Bestand. Bis zum Jahr 2045 steigt die Anzahl bis auf 2,8 Millionen sowie rund 0,2 Millionen Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Der Bestand an Verbrennern beträgt im Szenario KN2045 dann noch rund drei Prozent, im Jahr 2050 dann null, während im Szenario KN2050 im Jahr 2050 noch rund 200.000 leichte Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor im Bestand sind.

Abbildung 47: Entwicklung Neuzulassungen und Bestand der leichten Nutzfahrzeuge im Szenario KN2045



3.4.4 Endenergiebedarf und THG-Emissionen

Nationaler Verkehr

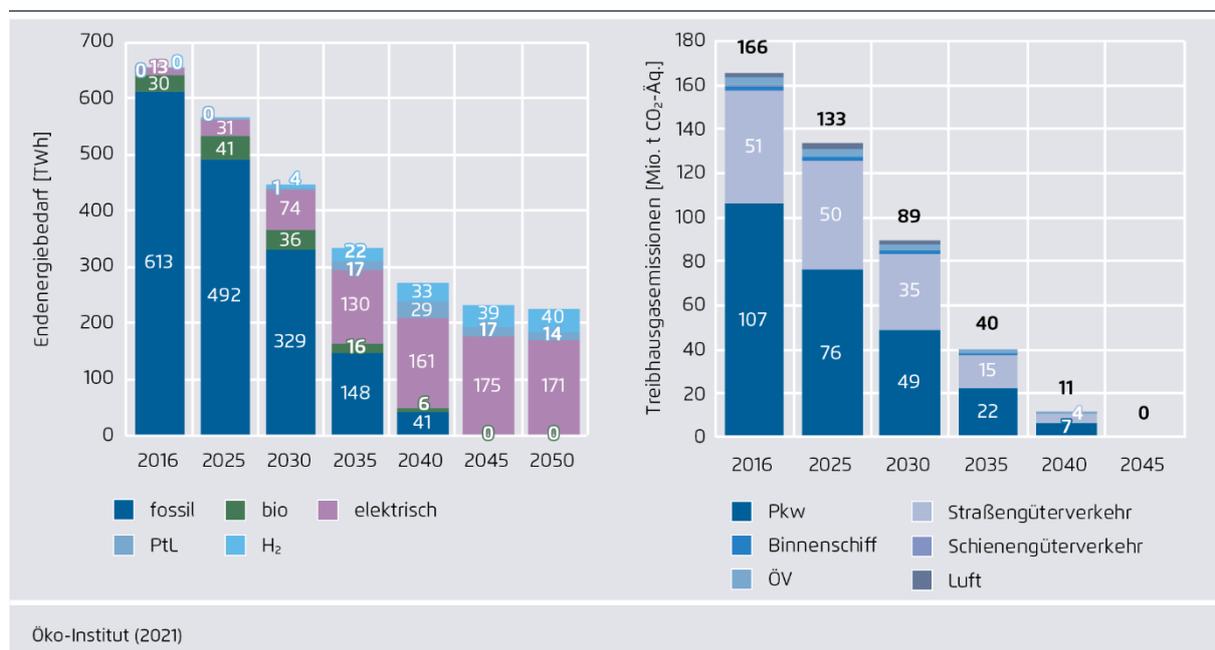
Durch die oben beschriebenen Veränderungen im Verkehrssektor – sowohl technologisch als auch durch Nachfrageveränderungen – sinkt der Endenergiebedarf für den nationalen Verkehr stetig von rund 655 Terawattstunden im Jahr 2016 über 331 Terawattstunden im Jahr 2045 bis 2050 auf 225 Terawattstunden. Gleichzeitig reduziert sich der Anteil fossiler Energieträger. Machte er im Jahr 2016 noch fast den gesamten Energiebedarf aus, werden im Jahr 2045 keine fossilen Energieträger mehr im Verkehrssektor eingesetzt.

Bedingt durch die weitgehende Elektrifizierung des Fahrzeugbestands werden die fossilen Kraftstoffe zum Großteil durch direkte Stromnutzung (175 Terawattstunden im Jahr 2045) ersetzt. Der Strombedarf für den Verkehr liegt im Szenario KN2045 ab 2035 leicht über dem im Szenario KN2050, bedingt durch eine etwas schnellere Elektrifizierung der Fahrzeuge. Die Brennstoffzellenfahrzeuge und der Restbestand an verbrennungsmotorischen Fahrzeugen im nationalen Verkehr werden im Jahr 2045 mit strombasierten Kraftstoffen (39 Terawattstunden Wasserstoff und 17 Terawattstunden Flüssigkraftstoffe) versorgt. Bis zum Jahr 2030 benötigen die Brennstoffzellenfahrzeuge (Last- und Sattelzüge) 4 Terawattstunden Wasserstoff. Erste Produktionsanlagen für strombasierte Kohlenwasserstoffe fokussieren von Beginn an auf die Produktion von synthetischem Kerosin. Damit wird frühzeitig ein Anlagendesign sichergestellt, welches ohne weitere Anpassungen auf den langfristigen Bedarf eines klimagerechten Verkehrssystems ausgerichtet ist. Im Jahr 2030 kommen im nationalen Luftverkehr bereits knapp 1,5 Terawattstunden an strombasiertem Kerosin zum Einsatz. Der Anteil im nationalen Luftverkehr steigt bis 2035 auf 100 Prozent. Hinzu kommt der Bedarf an strombasiertem Kerosin für den internationalen Luftverkehr ab 2035, der im Jahr 2045 100 Prozent erreicht. Im Szenario KN2050 werden diese erst ab 2040 mit einem Hochlauf hin zu 100 Prozent im Jahr 2050 eingesetzt. Mögliche Koppelprodukte der

nachhaltigen Kerosinproduktion (z. B. Benzin und Diesel) werden für die Restbestände an verbrennungsmotorischen Fahrzeugen benötigt.

Aufgrund der Vorgaben der RED II ist davon auszugehen, dass bis 2030 die konventionellen Biokraftstoffe in etwa auf heutigem Niveau verbleiben und 1,75 Prozent fortschrittliche Biokraftstoffe zusätzlich eingesetzt werden. Das verfügbare Biomassepotenzial wird danach sukzessive in den Sektoren eingesetzt, in denen es effizienter genutzt werden kann bzw. in denen keine Alternativen zur Verfügung stehen, vor allem in der Industrie. Zudem wird die Biomasse zentral in großen Anlagen benötigt, damit die CO₂-Ströme der Biomasse später für BECCS zur Verfügung zu stehen.

Abbildung 48: Entwicklung Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen national nach Verkehrsträgern im Szenario KN2045



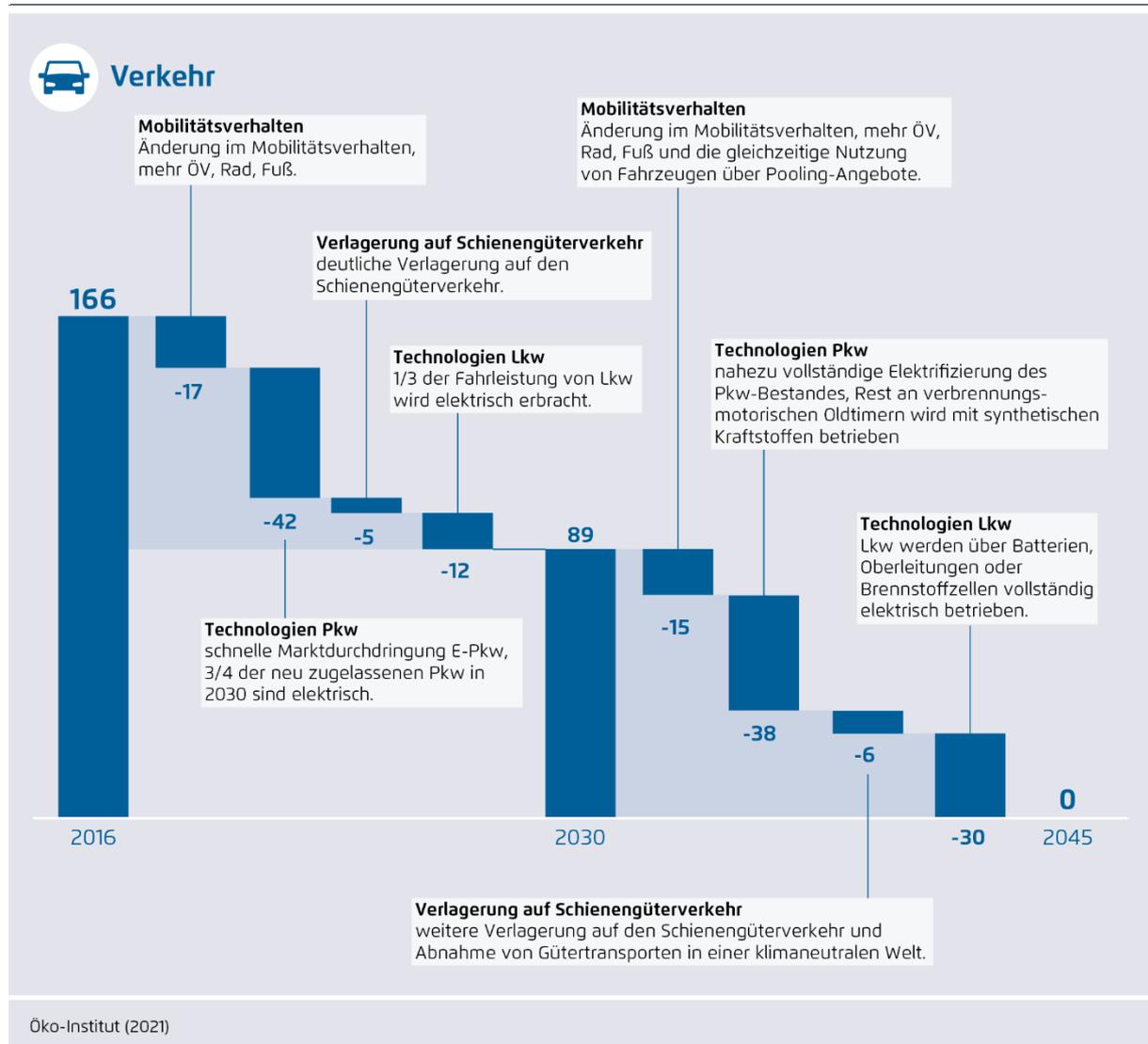
Der deutliche Rückgang des Einsatzes fossiler Kraftstoffe führt zu einem ebenso deutlichen Rückgang der THG-Emissionen auf 89 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030. Nach 2030 setzt sich der Trend fort, sodass im Jahr 2045 der gesamte Verkehrssektor als klimaneutral gilt. Die kumulierten Emissionen zwischen 2021 und 2045 betragen 1,69 Mrd. t CO₂-Äq. Es treten durch die Elektrifizierung Mehremissionen im Stromsektor auf, die hier nicht mit dargestellt sind und im Stromsektor bilanziert werden.

Die verschiedenen CO₂-Vermeidungsstrategien tragen im Szenario KN2045 unterschiedlich stark zur Treibhausgasminde rung im Verkehrssektor bei. Die Minderung im Jahr 2030 beträgt gegenüber 2016 insgesamt 77 Mio. t CO₂-Äq. 22 Prozent davon werden über eine frühzeitige Mobilitätswende im Personenverkehr erbracht. Auch die Verlagerung von Gütern auf die Schiene trägt mit rund 7 Prozent zu Minderung bei. 55 Prozent der Minderung werden durch die schnelle Elektrifizierung (und Effizienzverbesserung) des Pkw-Bestandes erreicht. Ein Drittel elektrischer Fahrleistung von Lkw bringt dann weitere 16 Prozent. Dieses Bild setzt sich von 2030 bis zum Jahr 2045 fort. Gut 40 Prozent der notwendigen Treibhausgasminde rung hin zur Klimaneutralität des Verkehrssektors im Jahr 2045 trägt in diesem Zeitraum die Elektrifizierung des Pkw-Bestandes

bei. Das sind 3 Millionen Tonnen mehr als im Szenario KN2050 im Jahr 2050, da die Mobilitätswende im Jahr 2045 noch nicht so weit umgesetzt ist und daher mehr E-Pkw für die Klimaneutralität benötigt werden. Für einen geringen Restbestand an verbrennungsmotorisch betriebenen Pkw werden synthetische Kraftstoffe genutzt. Durch eine weitere Verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsträger im Personenverkehr, aber auch durch eine Steigerung der Auslastung von Fahrzeugen, unter anderem durch Pooling-Angebote, können weitere 16 Millionen Tonnen reduziert werden. Der Beitrag einer weiteren Verlagerung auf den Schienengüterverkehr liegt bei 6 Mio. t CO₂-Äq. Ein Drittel der notwendigen THG-Minderung auf dem Weg zur Klimaneutralität erbringt die vollständige Elektrifizierung des Lkw-Bestandes über Oberleitungen, Batterien bzw. Brennstoffzellen.

Abbildung 49: Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehr im Szenario KN2045

Angaben in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente

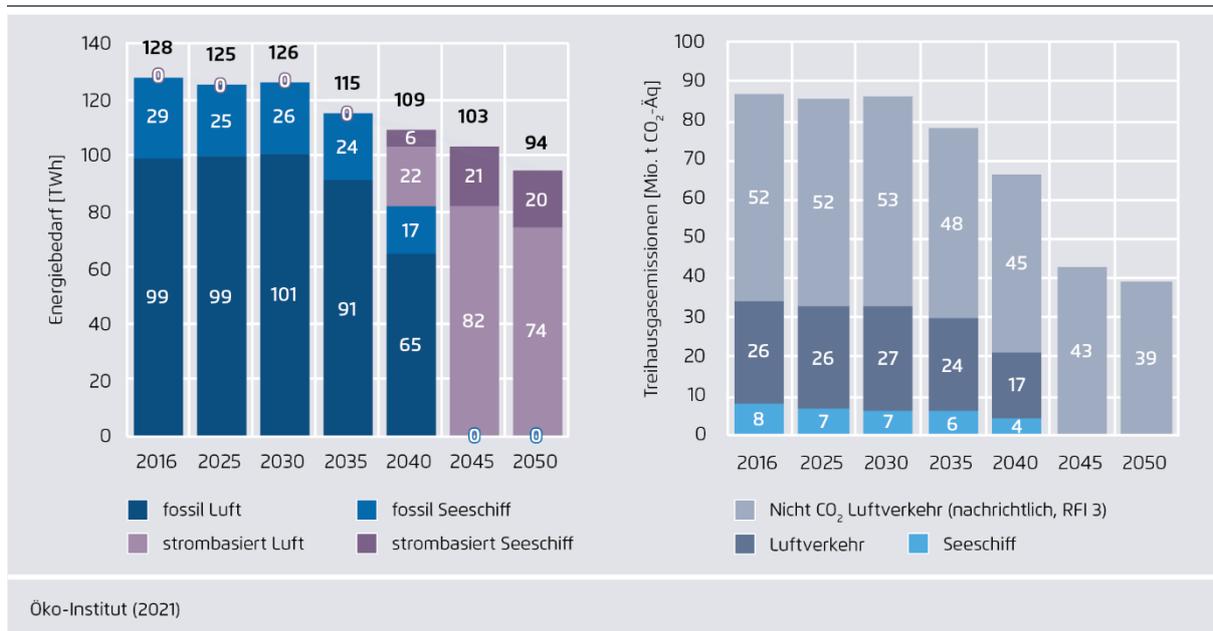


Internationaler Verkehr

Da sowohl der Luftverkehr als auch der Transport von Gütern per Seeschifffahrt bis 2045 trotz einer leichten Dämpfung aufgrund steigender Energiepreise zunächst weiter stark zunehmen, führen Effizienzsteigerungen bis 2030 zu einem konstanten Energiebedarf. Danach wird ein langsamer Rückgang des Energiebedarfs erreicht, aus einer Kombination der steigenden Energieeffizienz und der Dämpfung des Luftverkehrs, im Personenverkehr durch eine Kombination aus einem steigenden Anteil an strombasierten Kraftstoffen, durch den höhere Preise induziert werden, sowie weiteren preispolitischen Maßnahmen. Es werden ab 2035 zunehmend strombasierte Kraftstoffe eingesetzt. Das bedeutet, dass der Markthochlauf früher und deutlich dynamischer erfolgen muss als im Szenario KN2050, in dem große Mengen strombasierter Kraftstoffe erst für 2040 angenommen wurden. 2040 machen strombasierte Kraftstoffe rund ein Viertel der eingesetzten Energiemenge aus, und ab dem Jahr 2045 wird der Einsatz fossiler Kraftstoffe dann vollständig vermieden.

Die CO₂-Emissionen gehen durch den Einsatz strombasierter Kraftstoffe bis zum Jahr 2045 auf null. Es verbleiben jedoch auch bei dem Einsatz CO₂-freier Kraftstoffe die Nicht-CO₂-Effekte. Denn über die Treibhausgasemissionen und ihre Klimawirkung hinaus gibt es noch weitere Effekte, die in großer Flughöhe wirksam werden und das Klima negativ belasten. Dazu zählen die Emissionen von Stickoxiden, Rußpartikeln und Wasserdampf ebenso wie die teilweise damit verbundene verstärkte Zirruswolken- und Kondensstreifenbildung. Der Strahlungsantriebsindex (*Radiative Forcing Index*, RFI), mit dem die Klimawirksamkeit dargestellt werden kann und der die aus dem Flugverkehr entstehenden CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte aus der Verbrennung der Kraftstoffe in großer Höhe gegenüber dem CO₂-Effekt am Boden gewichtet, liegt zwischen 1,9 und 4,7 (IPCC 2007). Mehrere Organisationen haben diesen Multiplikator von 3 für die Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Wirkungen des Luftverkehrs festgelegt oder empfohlen (atmosfair 2020; UBA 2019b). Hervorzuheben ist, dass auch wenn CO₂-freie Kraftstoffe eingesetzt werden, dieser Klimaeffekt bestehen bleibt. Im Rahmen eines zukünftigen, umfassenderen internationalen Klimaschutzregimes müsste Deutschland entsprechend weitere negative Emissionen erreichen, um die Nicht-CO₂-Effekte seines internationalen Luftverkehrs auszugleichen. Bei einem RFI von 3 wären das 2045 43 Mio. t.

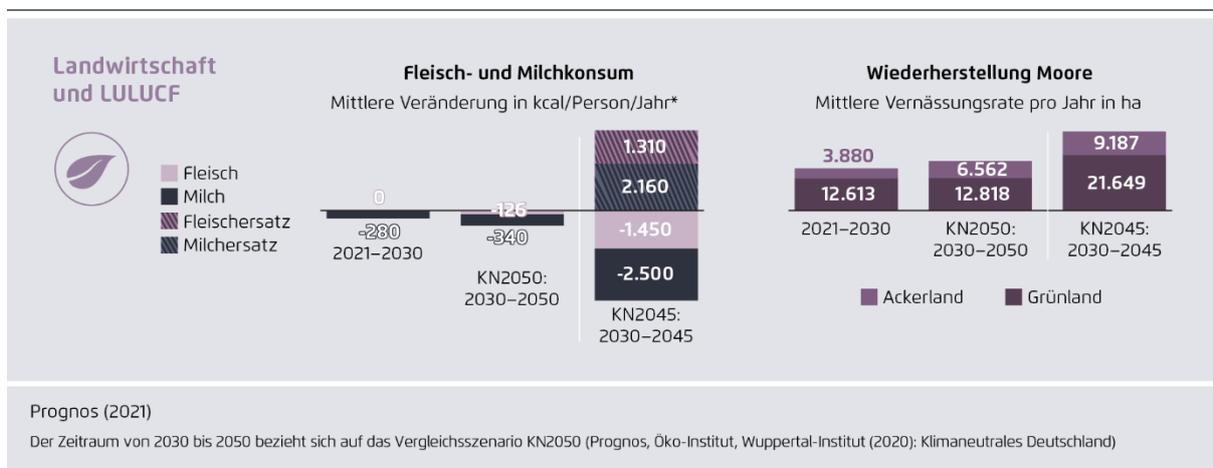
Abbildung 50: Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen inklusive der Nicht-CO₂-Effekte, internationaler Verkehr im Szenario KN2045



3.5 Landwirtschaft, Abfall und LULUCF

Auch in der Landwirtschaft und im Bereich LULUCF werden im Szenario KN2045 Maßnahmen beschleunigt umgesetzt. Dies führt gegenüber dem Szenario KN2050 zu einer früheren Reduzierung der Treibhausgasemissionen.

Abbildung 51: Umsetzungsgeschwindigkeit in der Landwirtschaft und bei LULUCF in den Szenarien KN2050 und KN2045



Zielbild und Ausgangslage

Im Jahr 2018 lagen die Emissionen aus dem Landwirtschaftssektor inklusive der energiebedingten Emissionen bei 69,8 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent. Die Hälfte der Emissionen entsteht durch die Verdauung der Wiederkäuer und die Lagerung des anfallenden Wirtschaftsdüngers. Etwas mehr als ein Drittel der Emissionen entsteht durch den Stickstoffeintrag in die Böden für den Anbau von Tierfutter, Marktfrüchten und Energiepflanzen. Die restlichen 15 Prozent der Emissionen lassen sich auf die Vergärung von Energiepflanzen, sonstige Düngenanwendung (z.B. Kalkung) und den Energieeinsatz (Erdgas, Mineralöleinsatz etc.) der Landwirtschaft zurückführen.²⁴

Bis zum Jahr 2030 sollen die Emissionen nach dem Entwurf des novellierten Klimaschutzgesetzes auf 56 Mio. t CO₂-Äq sinken (das vorherige Sektorziel lag bei 58 Mio. t CO₂-Äq). Im Landwirtschaftssektor überwiegen die Methan- und Lachgasemissionen, welche durch biologische Prozesse in den Böden und in der Tierhaltung entstehen. Technische Optionen zur Reduktion der Treibhausgase sind in diesem Sektor daher begrenzt und eine vollständige Klimaneutralität der Landwirtschaft ist letztlich nicht möglich. Den mengenmäßig wichtigsten Emissionsminderungshebel bildet die Entwicklung der Nutztierbestände. In Verbindung mit einer Reduktion des Konsums tierischer Produkte ist dieser bis zum Jahr 2045 für die Emissionsentwicklung des Sektors entscheidend. Im Rahmen des KN2045-Szenarios werden gesellschaftliche Trends im Bereich der Ernährung aufgegriffen und fortgeschrieben. Bereits heute ist ein moderater Rückgang des Milchkonsums und eine Verschiebung des Fleischkonsums hin zu mehr Geflügel abzusehen. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass zusätzlich zu diesem Trend ein Teil des Konsums tierischer Lebensmittel durch Fleisch- und Milchalternativen (siehe Infobox ‚Was sind Fleisch- und Milchalternativen?‘ weiter unten) ersetzt wird. Um bis 2045 dennoch Klimaneutralität für Deutschland zu erreichen, müssen die verbliebenen Restemissionen mit vergleichsweise kostenintensiven Negativ-Emissionen ausgeglichen werden. Daher sind Änderungen in der landwirtschaftlichen Produktion und Produktionsweise aus heutiger Sicht sowohl aus Klimaschutz- wie auch aus volkswirtschaftlichen Gründen unvermeidbar.

Die Reduktion der Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft lassen sich in drei Minderungsmechanismen einteilen:

- 1.** Optimierung: Hierzu gehören technische Vermeidungsoptionen wie Effizienzverbesserungen und der Einsatz von technischen Emissionsminderungstechnologien. Die Strukturen in der landwirtschaftlichen Produktion bleiben davon zunächst unberührt.
- 2.** Minimierung von Emissionen: Hierzu zählen die Veränderungen durch die Extensivierung der landwirtschaftlichen Produktion sowie strukturelle Veränderungen der Produktionsweise. Diese Maßnahmen verändern die landwirtschaftliche Produktionsstrukturen (Produkte und Erträge) und die entsprechenden Emissionen. In deren Folge sinkt auch der Betriebsmitteleinsatz, da weniger Stickstoff, aber auch Kraftstoff etc. benötigt wird.

²⁴ Nach dem Sektorziel des Klimaschutzgesetzes fallen die Emissionen aus dem Wärmeverbrauch in Gewächshäusern, Stallungen, und Trocknungen unter den Landwirtschaftssektor. Ebenso werden die Emissionen aus dem Kraftstoffeinsatz in landwirtschaftlichen Nutzmanmaschinen für Ernte etc. bilanziert.

3. Eliminierung von Emissionen: Zu diesem Emissionsminderungshebel zählen alle Maßnahmen, die auf eine Rückführung der Produktion und die damit verbundenen Emissionsvermeidungen abzielen.²⁵

Im Kontext des Klimaneutralitätsziels für die gesamte Volkswirtschaft werden bis zum Jahr 2045 Maßnahmen aus allen genannten Minderungsoptionen für die Landwirtschaft notwendig. Nur so können die Emissionen des Sektors deutlich bzw. im notwendigen Umfang reduziert werden.

Szenario Annahmen

Die Treiber im Landwirtschaftssektor bilden die Entwicklung der Tierbestände, die Flächenentwicklung von Grünland und Ackerland in Rückkopplung mit der Landnutzung, die angebauten Kulturarten als Folge der Nachfrage nach Tierfutter, Bioenergie und Marktfrüchten sowie die Deckung des Stickstoffbedarfs der angebauten Kulturen.

Im Bereich der Emissionen aus der Tierhaltung bildet die Nachfrageentwicklung des Konsums den Startpunkt. Kerngedanke ist die Fortschreibung der aktuellen Konsumtrends nach Milchprodukten und den verschiedenen Fleischsorten. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass jeweils ein Teil von 15 Prozent bis 2045 (und 20 Prozent bis 2050) der inländischen Nachfrage durch pflanzliche und synthetische Alternativprodukte gedeckt wird (siehe auch Infobox ‚Was sind Fleisch- und Milchalternativen?‘ weiter unten). Es wird in diesem Szenario auch unterstellt, dass über längere Sicht weltweit die Ersatzprodukte zu geringeren Marktpreisen als die natürlichen Produkte angeboten werden. Diese Entwicklung hat einen Einfluss auf den Außenhandel für Fleisch und Milch aus Deutschland. Durch den Nachfragerückgang im In- und Ausland gehen die Tierbestände aller Nutztiere und die Emissionen aus der Tierhaltung gegenüber dem Szenario KN2050 noch einmal deutlich zurück. Dabei steigt der Anteil der ökologischen Tierhaltung, was sich im Fall von Rindern und Kühen positiv auf die Grünlandnutzung auswirkt, gegenüber dem Szenario KN2050 aber die Milchleistung leicht reduziert.



Was sind Fleisch- und Milchalternativen?

Bei Fleisch- und Milchalternativen handelt es sich sowohl um vegetarische Produkte wie Pflanzenmilch und Fleischersatz aus Hülsenfrüchten oder Getreide als auch um neuartige synthetische Produkte. Letztere sind derzeit noch nicht marktverfügbar, aber bereits als Zukunftstechnologien in der Entwicklung.

Die steigende Nachfrage nach Alternativen für Milch und Fleisch in diesem Szenario kann mit einem Set an Argumenten begründet werden:

- Als Grundvoraussetzung für den Markterfolg gilt zuallererst der **Geschmack**: Mit fortschreitender Weiterentwicklung werden die Produkte in Bezug auf Geschmack und Haptik Fleisch- und Milchprodukten näherkommen.

²⁵ Eine strikte Trennung zwischen den beiden letztgenannten Hebeln der Minimierung und der Eliminierung ist dabei nicht immer möglich bzw. nötig. Hierbei handelt es sich vor allem um solche Maßnahmen, die vorrangig aus Klimaschutzgründen umgesetzt werden.

- Ebenso wichtig ist aber auch die **Produktqualität**: Das Nährwertspektrum kann den Bedürfnissen angepasst werden und so den natürlichen Produkten entsprechen oder in Bezug auf einzelne Nährstoffe (Fette, Protein etc.) explizit anders gestaltet werden – etwa gemäß aktueller Ernährungstrends. Gesetzliche Auflagen und Regelungen werden die Qualität und Sicherheit dieser neuen Lebensmittelgruppe garantieren.
- Im Massenmarkt werden die Produkte ihren Platz finden, wenn sie in beschriebener Qualität zu einem vergleichbaren oder günstigeren **Preis** als herkömmliches Fleisch und herkömmliche Milch angeboten werden können. Angesichts technischer Entwicklungen, zunehmender Konkurrenz und größer werdender Produktionseinheiten sinken die Verbraucherpreise langfristig wahrscheinlich unter die Preise von Milch und Fleisch.

Der Anteil an Vegetariern und Veganern in der Bevölkerung steigt²⁶. Aber auch die Gruppe der sog. Flexitarier, also Menschen, die nur wenig bzw. selten Fleisch essen, wird größer.²⁷ Die Gründe für den Verzicht oder den reduzierten Verzehr von Fleisch und Milch liegen oft im **Tierwohl bzw. Tierschutz sowie im Klima- und Umweltschutz** begründet. Diese Personengruppen können Alternativprodukte in besonderem Maße nachfragen. In Bezug auf den Klimaschutz weisen Fleischersatzprodukte einen Vorteil gegenüber Fleisch auf, auch wenn die Beurteilung synthetischer Ersatzprodukte noch Unsicherheiten birgt (Antony 2020). Heute noch hohe Energieaufwendungen in der Herstellung können demnach noch verringert werden bzw. sind sie durch die Verwendung erneuerbarer Energien mit weniger Treibhausgasen pro Kilogramm Endprodukt verbunden als für Fleisch. Bei der Produktion pflanzenbasierter Milch entstehen weniger Treibhausgase als bei Kuhmilch (Poore und Nemecek 2018 und weitere Berechnungen nach Poore²⁸). Für das Zukunftsprodukt der synthetischen Milch²⁹ konnten keine Studien zugrunde gelegt werden.

Im Bereich der Pflanzenproduktion wird ausgehend vom Nutztierbestand der Futterbedarf ermittelt. Den zweiten Nachfragestrom bildet die Nachfrage der Sektoren nach Bioenergie: Die danach verbleibende Fläche kann dann dem Marktfruchtanbau zugeordnet werden oder auch für Extensivierungen zur Schaffung ökologischer Vorrangflächen oder der Ausweitung extensiver Grünlandflächen verwendet werden. Durch die Extensivierung und die rückläufige Fläche in Folge von Infrastrukturmaßnahmen und die angepasste Nutzung von Moorstandorten (Paludikulturen³⁰ etc.), nimmt auch die Marktfruchtfläche ab. In Kombination mit den Annahmen zur Ertragsentwicklung wird am Ende für alle Anbauflächen der Stickstoffbedarf für die Düngung ermittelt.

²⁶ Angaben von Statista auf Basis einer Umfrage des IfD Allensbach: <https://de.statista.com/infografik/24000/anzahl-der-vegetarier-und-veganer-in-deutschland/> (zuletzt am 06.04.2021)

²⁷ Vergleiche: <https://www.dge.de/wissenschaft/weitere-publikationen/fachinformationen/flexitarier-die-flexiblen-vegetarier/> (zuletzt am 06.04.2021)

²⁸ Vergleiche: <https://www.foodunfolded.com/article/plant-based-milk-alternatives-environmental-footprints> (zuletzt am 06.04.2021)

²⁹ Hierbei wird die Milch durch einen Fermentationsprozess in gentechnisch veränderten Mikroorganismen (z. B. Hefen) erzeugt.

³⁰ Paludikultur bezeichnet die land- und forstwirtschaftliche Nutzung nasser Hoch- und Niedermoore, dabei werden neue Produkte wie Röhrichte oder Schilf geerntet, die für die Stoff- oder Energienutzung verwendet werden können.

Die nachfolgende Tabelle 3 beschreibt die detaillierten Szenario-Annahmen und ordnet sie in den drei oben genannten Emissionsminderungshebeln zu:

Tabelle 3: Beschreibung der Annahmen für die Landwirtschaft

Minderungsmechanismus	Szenarioannahmen
Optimierung (technische Vermeidungsoptionen)	<p>Strengere Umweltaanforderungen führen zu verbesserter Lagerung und Ausbringungstechnik von Gülle und Gärresten und die Stickstoffausbringung verringert sich. Insgesamt erhöht sich die Effizienz der Stickstoffnutzung.</p> <p>Steigerung der Wirtschaftsdüngervergärung von heute ca. 20 Prozent auf 50 Prozent in 2030 und 70 Prozent bzw. 90 Prozent (je nach Tierart) bis 2045</p> <p>Gasdichte Lagerung der anfallenden Wirtschaftsdünger und Gärreste</p> <p>Erhöhung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft und im Gartenbau</p>
Minimierung	<p>Ausweitung des Ökolandbaus auf 20 Prozent der Fläche 2030 und 25 Prozent der Fläche 2045</p> <p>Ausweitung des Anbaus von Kulturarten mit geringerem bzw. keinem Stickstoffbedarf:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ausweitung des Anbaus stickstoffbindender Pflanzen (Leguminosen) ■ Verschiebung zu Kurzumtriebsplantagen statt Mais bei Energiepflanzen ■ Nutzung wiedervernässter Moorflächen für Paludikulturen <p>Stickstoffoptimierte Fütterung in der Rinder-, Schweine und Geflügelhaltung</p> <p>Umstieg auf erneuerbare Energien in der Landwirtschaft und im Gartenbau</p>
Eliminierung (Reduktion des Produktionsniveaus)	<p>Wiedervernässung der organischen Böden (Moore) unter Acker- und Grünland, Ausweitung der unproduktiven Flächen (Brachen)</p> <p>Rückgang und Umbau der Tierbestände auf der Basis der verringerten Nachfrage im Szenario KN2045 – wobei auf den Ackerfutterflächen weiterhin eine pflanzenbauliche Nutzung unterstellt wird.</p> <p>Zusätzlich wirkt der Ausbau von Flächen für Infrastruktur und Siedlungen. Hierdurch nimmt die landwirtschaftlich genutzte und damit auch die gedüngte Fläche ab.</p>

Ergebnisse

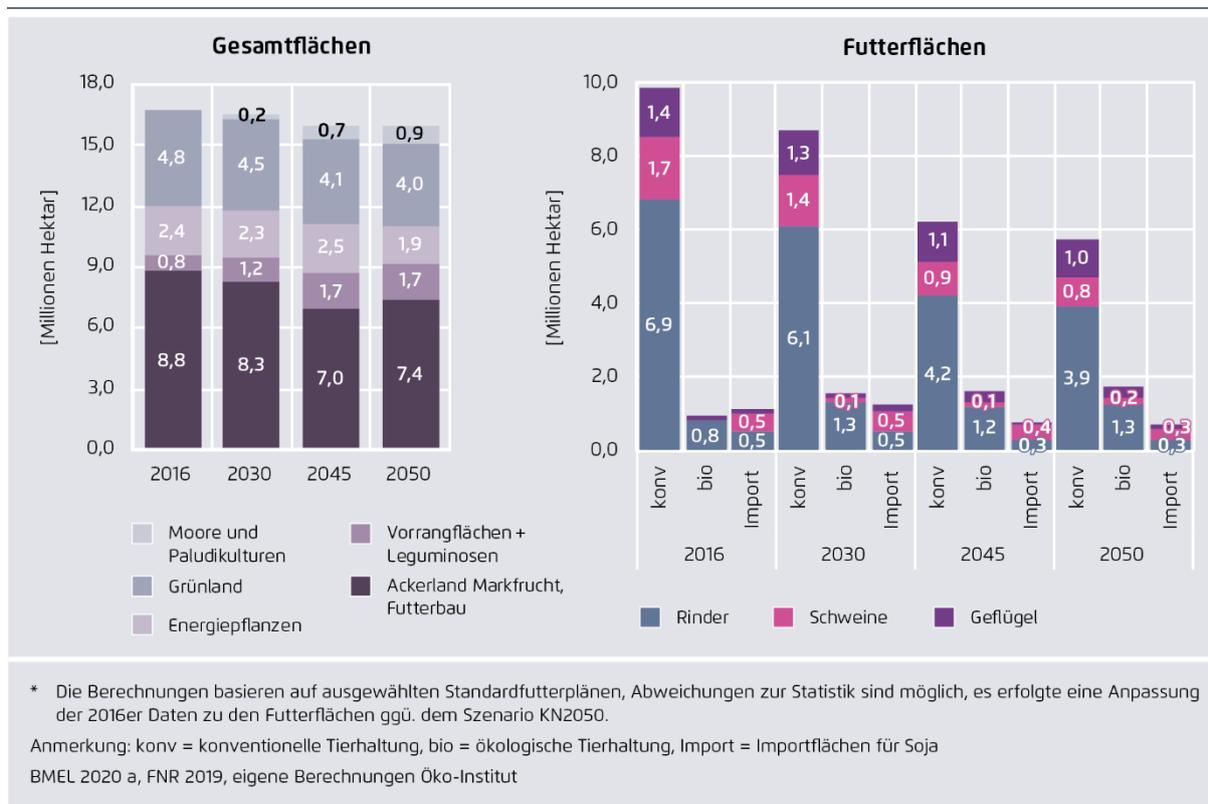
Ein Großteil der Minderungsoptionen führt zu einem wachsenden Flächenbedarf. Dies gilt sowohl für die Erhöhung der Ökolandbaufläche als auch für die Wiedervernässung der Moore. Gleichzeitig sinkt die verfügbare landwirtschaftliche Nutzfläche durch eine Ausweitung der Flächen für Infrastrukturmaßnahmen, wie den Bau von Bahntrassen und die Ausweitung von Siedlungen. Ohne eine geänderte Nachfrage nach Futterflächen, Marktfrüchten und Bioenergie würde die Umsetzung der Maßnahmen im KNDE-Szenario nicht vollständig möglich sein. Erst durch den Rückgang der Tierbestände und die damit freiwerdende Futterfläche entstehen die nötigen Spielräume für neue Flächennutzungen. Dadurch können Klimaschutzmaßnahmen früher und auch

umfangreicher umgesetzt werden als dies im Szenario KN2050 der Fall ist. Dazu zählt insbesondere die schnellere Wiedervernässung der landwirtschaftlich genutzten Moore, aber auch die Erhöhung der ökologischen Vorrangflächen und die Ausweitung des Ökolandbaus auf einen Flächenanteil von 25 Prozent bis 2045. Die Ausweitung des Ökolandbaus erfolgt durch die Umstellung bestehender konventioneller Betriebe bzw. Flächen. Sie orientiert sich an den politischen Zielstellungen des Klimaschutzprogramms 2030 und des European Green Deals.

Abbildung 52 zeigt die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche für die Jahre 2030, 2045 und 2050. Durch Infrastrukturmaßnahmen und eine Wiedervernässung der organischen Böden sinkt bis zum Jahr 2045 die reine Acker- und Grünlandfläche um 9 Prozent (circa 1,4 Millionen Hektar) im Vergleich zum Jahr 2016. Ein Teil der wiedervernässten Böden wird aber weiterhin als Paludikultur zum Anbau von Energiepflanzen (Schilf, Erle) genutzt und bleibt damit in der landwirtschaftlichen Nutzung. Ohne Einbezug der Paludikulturen steigt die Anbaufläche für Energiepflanzen um knapp 0,1 Millionen Hektar gegenüber 2016, während sie bis 2050 wieder abnimmt und 0,5 Millionen Hektar geringer ist als im Referenzjahr 2016. Die Fläche der wiedervernässten Moore inklusive der genutzten Paludikulturen steigt bis zum Jahr 2045 auf 0,7 Millionen Hektar an (etwa 4 Prozent der heutigen landwirtschaftlichen Nutzfläche), bis zum Jahr 2050 werden ca. 0,9 Millionen Hektar wiedervernässt bzw. als Paludikultur bewirtschaftet. Gleichzeitig finden eine Ausweitung der ökologischen Vorrangflächen und eine Ausweitung des Leguminosenanbaus statt.

Durch den Rückgang der Tierbestände sinken die Futterflächen im konventionellen Landbau und die benötigten Anbauflächen im Ausland, die zur Deckung der Sojabedarfs in der inländischen Tierhaltung benötigt werden. Durch die Ausweitung des Ökolandbaus auch in Tierhaltungsbetrieben, steigt aber die genutzte Fläche für ökologisch erzeugte Futtermittel an. Bis zum Jahr 2045 werden ca. 3 Millionen Hektar Futterfläche (davon 0,9 Millionen Hektar Grünland und 2,1 Millionen Hektar Ackerland) in andere Nutzungsformen überführt und werden zur Ausweitung der ökologischen Vorrangflächen, zur Wiedervernässung von Mooren oder zum Marktfruchtanbau genutzt. Bis zum Jahr 2050 erhöht sich die umgenutzte Fläche auf 3,4 Millionen Hektar (davon 1,0 Millionen Hektar Grünland und 2,4 Millionen Hektar Ackerland) (siehe Abbildung 52). Das entspricht ca. 20 Prozent unserer heutigen Ackerfläche (11,7 Mio. Hektar) und 21 Prozent der aktuellen Grünlandfläche.

Abbildung 52: Entwicklung der gesamten Flächen und Entwicklung der Futterflächen*

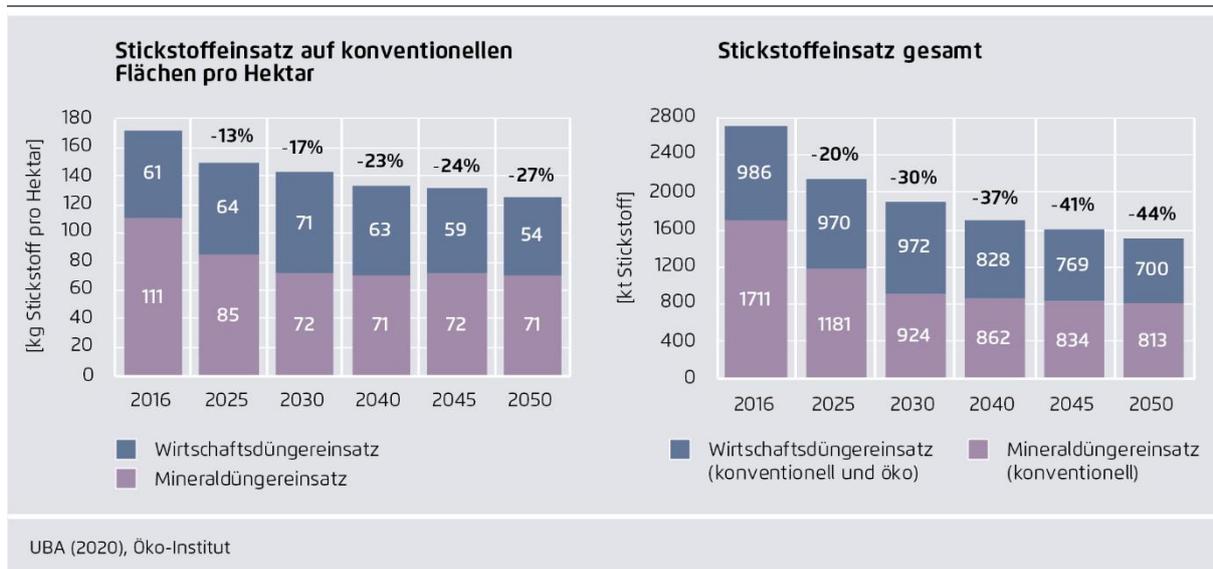


Im Bereich der Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden lassen sich wesentliche Minderungen über eine Reduktion der Stickstoffeinträge aus Wirtschaftsdünger und Mineraldünger erreichen.³¹ Abbildung 53 zeigt die Entwicklung der Stickstoffeinträge in den Boden, differenziert in Mineral- und Wirtschaftsdünger. Links ist der Stickstoffeintrag aus Wirtschaftsdüngern und Mineraldüngern in Kilogramm pro Hektar für die konventionellen Flächen dargestellt, rechts die Summe über die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche. Mineraldünger kommt nur in der konventionellen Landwirtschaft zum Einsatz, da der ökologische Landbau diese Düngemittel nicht verwenden darf.

Bis zum Jahr 2045 lassen sich gegenüber 2016 etwa 41 Prozent des Stickstoffeintrages aus Mineraldünger und Wirtschaftsdünger reduzieren, bis zum Jahr 2050 sinkt der Stickstoffeintrag um 44 Prozent gegenüber 2016. Die Minderungen gehen auf den effizienteren Wirtschaftsdüngereinsatz, die Ausweitung der Kulturen mit geringerem Stickstoffbedarf aber auch auf die Reduktion der gesamten gedüngten Flächen und die Ausweitung des Ökolandbaus zurück. Pro Hektar fällt die Minderung des Stickstoffeintrages auf der konventionellen Fläche mit ca. 24 Prozent bis 2045 und 27 Prozent bis 2050 geringer aus. Durch den Rückgang des Stickstoffeintrags sinken die Stickstoffüberschüsse bis zum Jahr 2045 von 93 Kilogramm Stickstoff (Mittel der Jahre 2016 bis 2018) auf 48 Kilogramm Stickstoffüberschuss pro Hektar und können bis 2050 auf 41 Kilogramm Stickstoffüberschuss reduziert werden. Dies ist u. a. das Ergebnis einer verbesserten Stickstoffnutzung (reduzierter Düngemiteleintrag v.a. durch optimale Nutzung des Wirtschaftsdüngers bei gleichzeitig moderater Steigerung der Erträge).

³¹ Weitere Stickstoffeinträge gelangen über Erntereste, Weidegang und den Anbau von Leguminosen in die Böden.

Abbildung 53: Stickstoffeinträge in die Böden



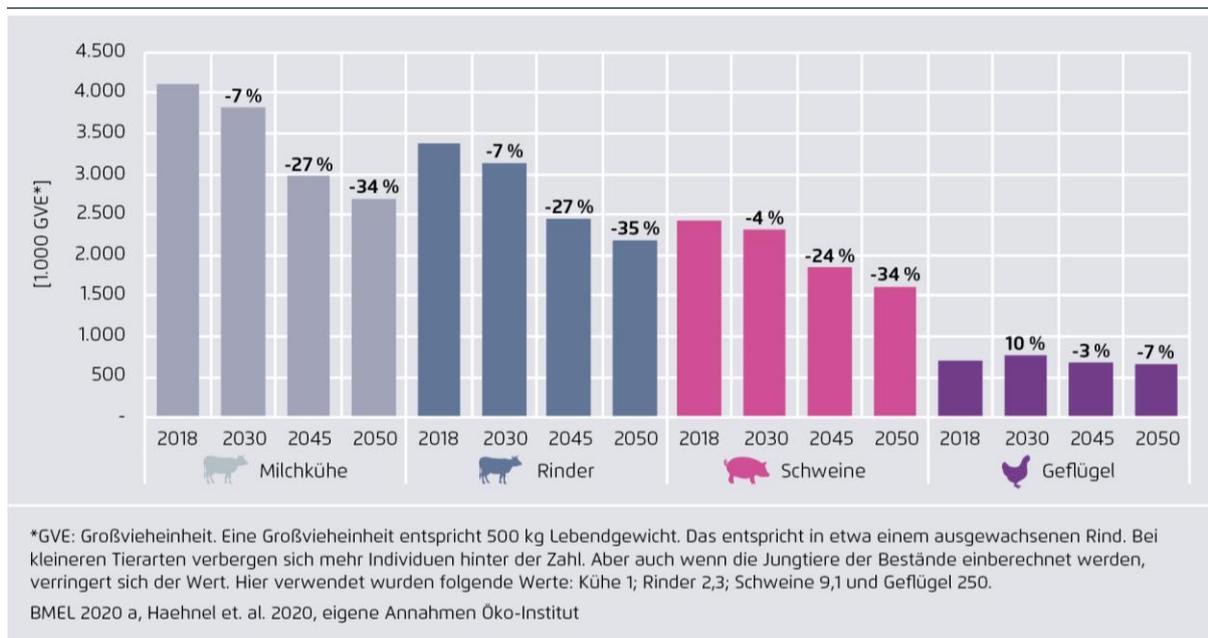
Die Entwicklung des Tierbestandes folgt der eingangs skizzierten Nachfrageentwicklung für den Konsum der tierischen Produkte bis ins Jahr 2045. Vor allem die geringere Zahl der Milchkühe und Rinder führt zu einer Emissionsreduktion. Dies liegt daran, dass Rinder als Wiederkäuer bei der Pansenverdauung das Treibhausgas Methan in großer Menge ausstoßen. Aus diesem Grund sind vor allem die produzierten Mengen an Milch und Rindfleisch für die Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft eine maßgebliche Größe. Der Austausch von Rindfleisch durch Schweine- oder Geflügelfleisch wäre als Klimaschutzmaßnahme jedoch zu kurz gegriffen da Rindfleisch und Milch im heutigen Produktionssystem gekoppelte Produkte sind (eine Kuh gibt nur Milch, wenn ein Kalb geboren wird).

Der Rückgang der Milchkuhbestände erfolgt durch den Rückgang des Konsums von Milchprodukten³², in Verbindung mit einer Milchleistungssteigerung. In der Folge reduzieren sich auch die sonstigen Rinderbestände, da weniger Kälber geboren werden, die zu Kühen aufgezogen bzw. zu Schlachtrindern ausgemästet werden.

Die Milchkuh, Rinder und Schweinebestände gehen bis zum Jahr 2045 um circa ein Viertel zurück, während bis 2050 rund ein Drittel der genannten Tierbestände reduziert werden. Der Geflügelbestand sinkt auf Grund der Trendentwicklung im Szenario KN2050 bis 2045 nur um 3 Prozent und geht bis 2050 um 7 Prozent zurück.

³² Hier wirkt sich besonders ein geringerer Verzehr von Butter, Käse und Sahne aus, da für die Herstellung eines Kilogramms dieser Produkte besonders viele Liter gemolkener Milch notwendig sind.

Abbildung 54: Entwicklung der Tierbestände

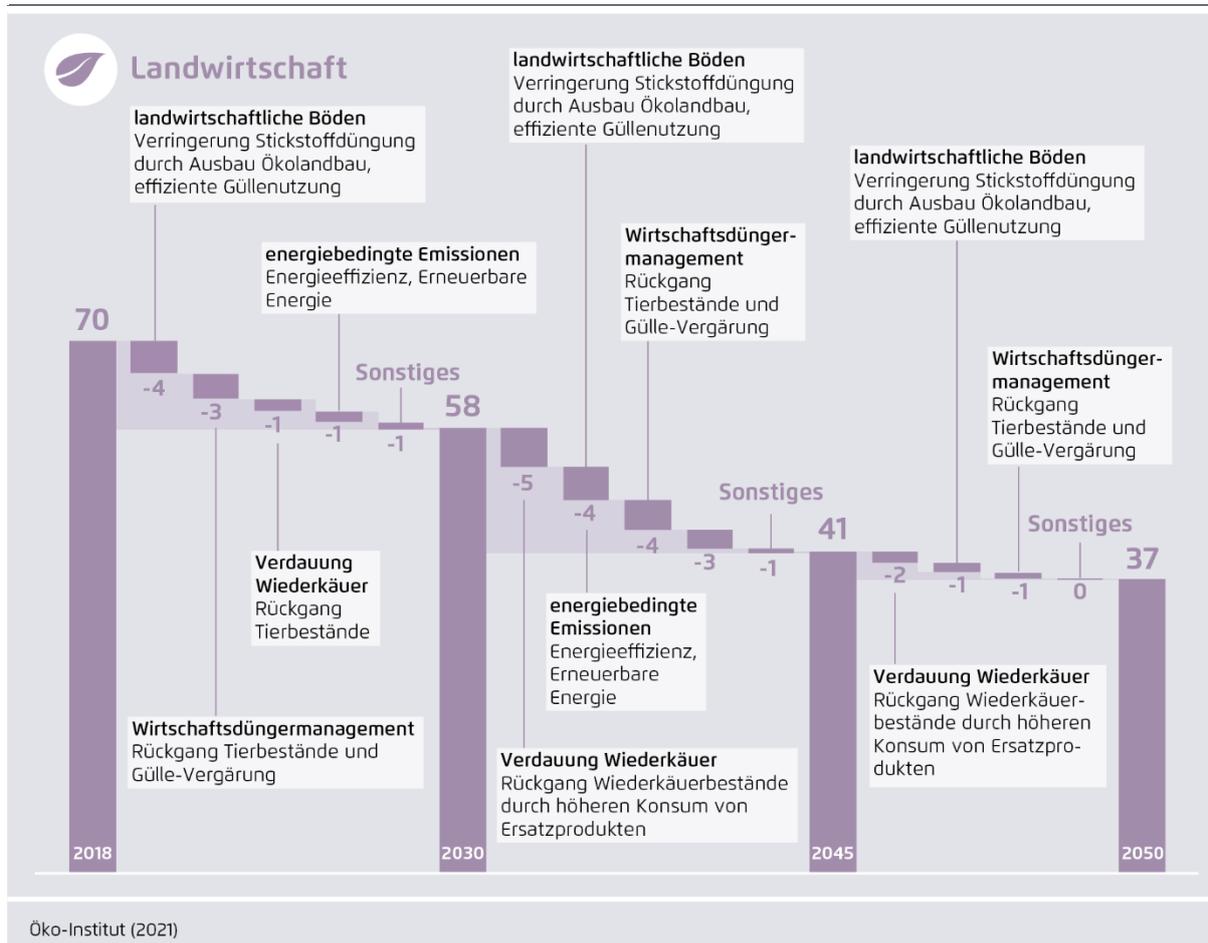


Bis zum Jahr 2045 sinken in diesem Szenario die Emissionen aus dem Landwirtschaftssektor inklusive der energiebedingten Emissionen gegenüber 2018 um 29 Mio. t CO₂-Äq (siehe Abbildung 55). Die größten Minderungen gegenüber 2018 ergeben sich im Bereich der landwirtschaftlichen Böden durch eine Reduktion der Stickstoffeinträge (rund 8 Mio. t CO₂-Äq.). Der Umbau der Tierbestände (Rückgang der Rinder- und Schweinebestände, leichter Rückgang der Geflügelbestände) führt gegenüber 2018 zu einer Minderung von knapp 7 Mio. t CO₂-Äq. Ein Minderungseffekt von jeweils 6 Mio. t CO₂-Äq lässt sich zum einen durch eine Reduktion der energiebedingten Emissionen durch die Steigerung der Energieeffizienz und den Brennstoffwechsel und zum anderen im Bereich des Wirtschaftsdüngermanagements in Folge einer verbesserten Lagerung und Ausweitung der Vergärung aber auch den Rückgang der Tierbestände erzielen.

Im Jahr 2045 liegen die Emissionen des Landwirtschaftssektors bei 41 Mio. t CO₂-Äq. Damit sinken die Emissionen gegenüber 2018 um 42 Prozent. Im Szenario KN2050 sinken die Emissionen aus dem Landwirtschaftssektor auf 44 Mio. t CO₂-Äq bis zum Jahr 2050, während im Szenario KN2045 die Emissionen im Jahr 2050 bei 37 Mio. t CO₂-Äq. liegen. Die zusätzlichen Minderungen werden vor allem durch die weitere Reduktion der Tierbestände, in Kombination mit einer Nachfrageänderung des Konsums tierscher Produkte (siehe Abbildung 51) erzielt. In Kombination mit der Wirtschaftsdüngervergärung können bis zum Jahr 2045 12,8 Mio. t CO₂-Äq. durch den Rückgang der Tierbestände reduziert werden, bis zum Jahr 2050 sogar 15,4 Mio. t CO₂-Äq. Im Szenario KN2050 liegt die Minderung durch den Rückgang der Tierbestände inklusive der Wirtschaftsdüngervergärung bis zum Jahr 2050 bei 9,5 Mio. t CO₂-Äq. Die weiteren Minderungen werden vor allem im Bereich der landwirtschaftlichen Böden, in Folge einer geänderten Flächennutzung durch die Reduktion der Futterflächen erzielt.

Abbildung 55: Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft

Angaben in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente



3.5.2 Abfallsektor

Zielbild und Ausgangslage

Im Jahr 2018 lagen die Emissionen des Abfallsektors bei 9,7 Mio. t CO₂-Äq. Die Emissionen des Abfallsektors werden von den Methanemissionen aus der Deponierung dominiert (78 Prozent). Auch bei der biologischen Abfallbehandlung und bei der Abwasserbehandlung dominieren die Methanemissionen, allerdings treten bei diesen Prozessen auch Lachgasemissionen auf. CO₂-Emissionen bei der Abfallbehandlung stammen hauptsächlich aus dem organischen Abfall und werden daher als biogene CO₂-Emissionen im Inventar nicht berücksichtigt.

Nach dem novellierten Klimaschutzgesetz (2021) sollen die Emissionen des Abfallsektors bis zum Jahr 2030 auf 4 Mio. t CO₂-Äq reduziert werden und damit um 1 Mio. t CO₂-Äq. stärker als im Szenario KN2045. Für die Erreichung der Klimaziele des Klimaschutzgesetzes und des Klimaschutzplans 2050 sind auch im Abfallsektor weitere Treibhausgasminderungen notwendig, die bereits im Maßnahmenprogramm 2030 angelegt sind. Vor allem durch die Ausweitung der

Deponiebelüftung kann weiteres Minderungspotenzial in diesem Sektor erschlossen werden.³³ Für die biologische Abfallbehandlung wird neben steigenden Abfallmengen pro Person durch die Ausweitung der getrennten Erfassung auch technisches Potenzial zur Reduktion der Emissionen berücksichtigt. Dazu zählen unter anderem die Reduktion von CH₄-Leckage-Raten, aber auch die aktive Belüftung bei der Kompostierung. Bis zum Jahr 2050 reduzieren sich die getrennt erfassten biologischen Abfälle pro Person infolge einer Reduktion der Lebensmittelabfälle. Im Abwasserbereich gibt es noch ein geringes Minderungspotenzial durch den Anschluss an die öffentliche Kanalisation und eine Optimierung der Kläranlagen und der Faulschlammbehandlung.

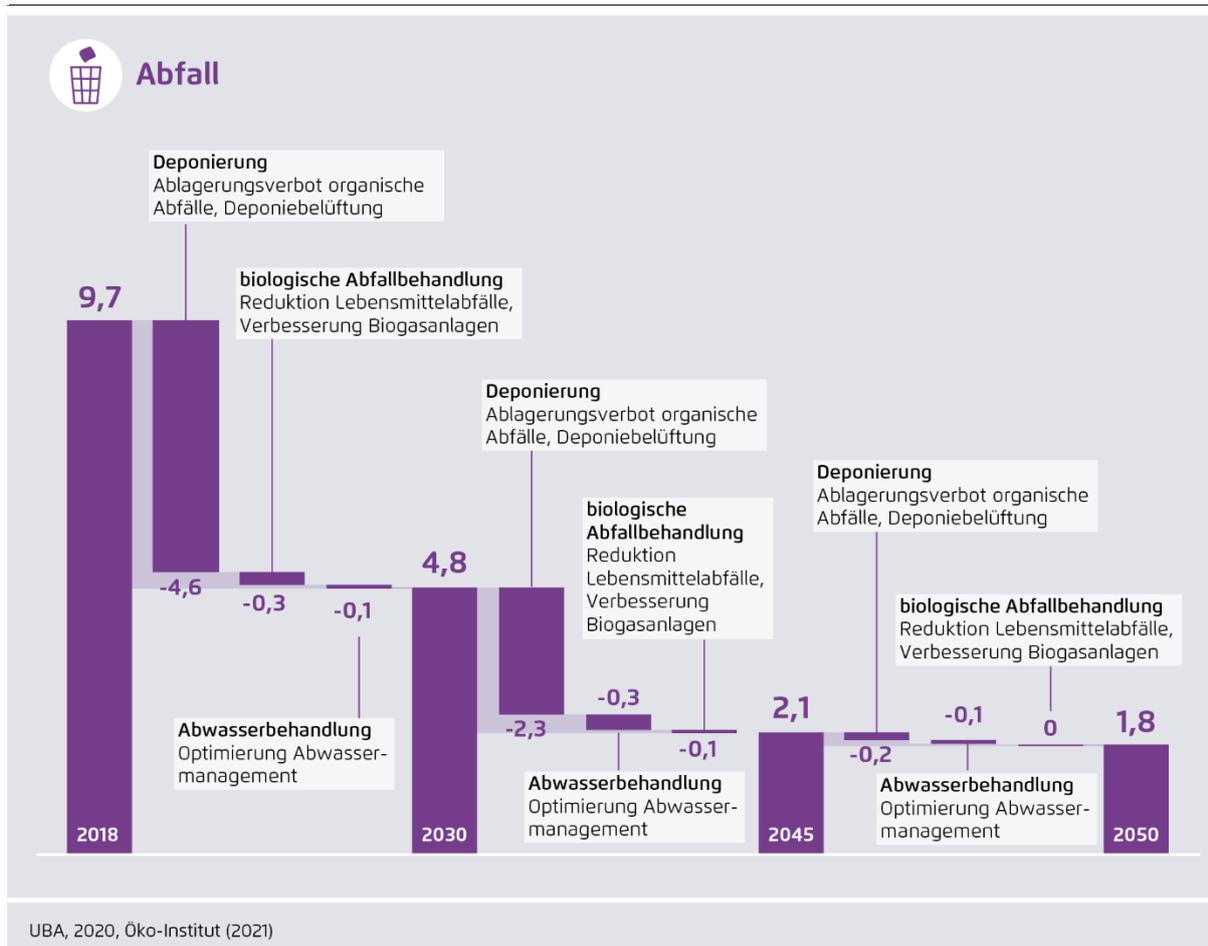
Ergebnisse

Bis zum Jahr 2045 sinken die Emissionen aus dem Abfallsektor von 9,7 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2018 auf 2,1 Mio. t CO₂-Äq. Im Jahr 2050 liegen sie bei 1,8 Mio. t CO₂-Äq (siehe Abbildung 56). Der Großteil der Minderungen entfällt auf den Bereich der Deponierung. Durch das Deponierungsverbot für organische Abfälle seit dem Jahr 2005 sinken die Emissionen aus der Deponierung seit Jahren. Zudem führt die Ausweitung der Deponiebelüftung zu einer schnelleren Reduktion der Methanemissionen. Insgesamt sinken die Emissionen aus der Deponierung zwischen 2018 und 2045 um 6,9 Mio. t CO₂-Äq und bis 2050 um weitere 0,2 Mio. t CO₂-Äq. Gegenüber dem KN2050 führt eine zusätzliche Ausweitung der Deponiebelüftung in den 2030er Jahren zu reduzierten Emissionen. Im Bereich der biologischen Abfallbehandlung führen der Bevölkerungsrückgang, die Reduktion der Lebensmittelabfälle und eine Verbesserung der Biogas- und Kompostierungsanlagen zu einer Reduktion der Emissionen gegenüber 2018 von 0,3 Mio. t CO₂-Äq bis 2045. Im Bereich der Abwasserbehandlung führen der Bevölkerungsrückgang und die Optimierung des Abwassermanagements ebenfalls zu einem Emissionsrückgang.

³³ Die Berechnung der Minderungswirkung der Deponiebelüftung erfolgt nach einer Methodik des UBAs zur Berechnung der aeroben In-Situ-Stabilisierung von Deponien.

Abbildung 56: Reduktion der Treibhausgasemissionen im Abfallsektor

Angaben in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente



3.5.3 LULUCF

Zielbild und Ausgangslage

Im Sektor „Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft“ (LULUCF) werden flächenbezogene Emissionen für die Kategorien Wald, Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen bilanziert. Wird auf einer Fläche CO₂ eingelagert, so spricht man von einer Senke. Im Jahr 2018 wurden große Mengen an CO₂ in Wäldern gespeichert, da der Zuwachs der Bäume höher war als die Holzernte (Abbildung 57). Auch in Holzprodukten wurde mehr CO₂ gespeichert als emittiert. Auf Flächen können aber auch Treibhausgase freigesetzt werden. Als wichtige Quelle sind landwirtschaftlich genutzte Flächen auf Moorböden³⁴ zu nennen, auf denen Torf im Boden zersetzt wird und so heute etwa 2/3 der Emissionen im LULUCF-Sektor entstehen. Auch durch Torfabbau wird CO₂ freigesetzt. Emissionen auf Siedlungsflächen entstehen vor allem durch die Bebauung von Wald und Grünland. Der Saldo aus Quellen und Senken im LULUCF-Sektor betrug in 2018 -27 Mt CO₂-Äq (Abbildung 57) und lag in der Größenordnung von 1990 (-29 Mt CO₂-Äq). Nach dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung soll der LULUCF-Sektor auch langfristig

³⁴ In diesem Bericht werden Moorböden synonym zu organischen Böden (Moore, Moorfolgeböden, Anmoore) verwendet.

eine Senke bleiben. Laut dem aktuellen Gesetzentwurf zum Klimaschutzgesetz soll der LULUCF-Sektor deutlich ambitioniertere Ziele erreichen: -25 Mt CO₂-Äq in 2030, -35 Mt CO₂-Äq in 2040 und -40 Mt CO₂-Äq in 2050.

In Deutschland werden gut 1,3 Millionen Hektar an Moorböden landwirtschaftlich genutzt. Hinzu kommen 18.000 Hektar Torfabbauf Flächen. Bis 2030 werden knapp 20 Prozent und bis 2045 gut 50 Prozent dieser Flächen wiedervernässt. Sie werden einer Torf-schonenden Nutzung zugeführt oder aus der Nutzung genommen. Die Waldbewirtschaftung wird verstärkt an naturschutzfachlichen Anforderungen ausgerichtet. So wird gegenüber der aktuell üblichen Waldbewirtschaftung weniger stark geerntet und durchforstet, um alte Bäume und Totholz als Lebensraum zu fördern. Zudem werden Laubbäume stärker gefördert. Die Flächeninanspruchnahme für Siedlungsflächen wird bis zum Jahr 2030 auf 30 Hektar pro Tag und bis zum Jahr 2050 auf 20 Hektar pro Tag reduziert.³⁵

Ergebnisse

Die Emissionen im LULUCF-Sektor werden stark durch die Senkenleistung der Waldfläche beeinflusst. Die Senkenleistung der Waldfläche nimmt, dem WEHAM-Naturschutzpräferenzszenario³⁵ folgend, in den 2020er Jahren deutlich ab, vor allem aufgrund der Altersstruktur der Wälder und der angenommenen Nutzungsintensität. In 2045 werden -36 Mt CO₂-Äq und in 2050 -35 Mt CO₂-Äq auf der Waldfläche gespeichert (Abbildung 57).

Abbildung 57: Emissionen im LULUCF-Sektor



³⁵ Organische Böden: Ackerland und Grünland bis 2030 20 Prozent und bis 2045 52 Prozent wiedervernässt, verbliebenes Ackerland bis 2050 als Grünland genutzt; Torfabbau: bis 2030 eingestellt und Flächen wiedervernässt; Nutzung vernässter Flächen: 2030 40 Prozent extensive Weide/Mahd, 30 Prozent Paludikultur und 30 Prozent nicht genutzt, 2045 50 Prozent Paludikultur und 50 Prozent nicht genutzt; Erhalt von Dauergrünland fortgeschrieben; Waldbewirtschaftung und Holzprodukte: Ergebnisse aus dem WEHAM-Naturschutzpräferenzszenario (Oehmichen et al. 2018); Flächeninanspruchnahme für Siedlungsflächen: Abnahme bis 2030 auf 30 Hektar/Tag und bis Jahr 2050 auf 20 Hektar/Tag.

Deutliche THG-Minderungen werden auf Acker- und Grünlandflächen auf Moorböden durch Wiedervernässung hin zu Feuchtgebieten erzielt. Als Saldo aus Quellen und Senken wird der LULUCF-Sektor unter Maßgabe der modellierten Maßnahmen bis 2040 zu einer leichten Quelle. Im Jahr 2045 erreicht der LULUCF-Sektor eine Senkenleistung von -11 Mt CO₂-Äq und in 2050 von -16 Mt CO₂-Äq (Abbildung 57). Im Szenario KN2050 sinken die Emissionen im LULUCF-Sektor auf -10 Mio. t CO₂-Äq bis zum Jahr 2050. Die zusätzlichen Minderungen von -6 Mt CO₂-Äq im Szenario KN2045 werden durch eine ambitionierter Wiedervernässung von Acker- und Grünlandflächen auf Moorböden erreicht (Abbildung 51).

Die Ergebnisse im LULUCF-Sektor stehen im Einklang mit den Anforderungen im Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung. Die deutlich höheren Ambitionen zur Senkenleistung im Entwurf zum Klimaschutzgesetz werden aber bei Weitem nicht erreicht. Dies liegt vor allem an der Abnahme der Senkenleistung im gewählten Waldszenario. Durch eine extensivere Waldbewirtschaftung ist ein Erhalt und sogar eine Steigerung der Senkenleistung auf der Waldfläche möglich (Böttcher et al. 2018). Es bestehen aber auch deutliche Unsicherheiten. So können z.B. Niederschlagsveränderungen durch Klimawandel verstärkt Baume, vor allem Fichte und Kiefer, absterben (BMEL 2021) und so die Senkenleistung der Waldfläche mindern.

3.6 Bioenergie

Der Biomasseeinsatz trägt entscheidend zur Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 bei: Um im Jahr 2045 negative Emissionen zur Kompensation der nicht-vermeidbaren Treibhausgase zu generieren, wird auch der Einsatz von Biomasse über BECCS genutzt. Hierfür wird die Biomasse als Brennstoff vor allem in der Industrie in zentralen Anlagen genutzt. Auf diese Weise kann der CO₂-reiche Abgasstrom aufgefangen werden und bildet die Basis für dessen Speicherung.

Das nachhaltig zur Verfügung stehende Biomasseangebot ist ohne zusätzliche Importe sehr deutlich begrenzt. Die Szenarioannahmen in den Sektoren Landwirtschaft, LULUCF und Abfall bilden den Rahmen für die modellgestützte Analyse des nachhaltigen Biomassepotenzial. Dieses umfasst Abfall- und Reststoffe, den Energiepflanzenanbau und die Forstwirtschaft. Für die Modellierung wurde ein mehrstufiger Abgleich mit der Nachfrageseite durchgeführt. Dabei wurde die Nachfrage der Sektoren nach fester, flüssiger und gasförmiger Bioenergie gegenübergestellt und es wurden Alternativen zur Biomasse geprüft, um am Ende die begrenzte, aber begehrte Ressource möglichst optimal zu verteilen. Für die Nachfrageentwicklung der Biomasse spielten folgende Vorüberlegungen eine Rolle:

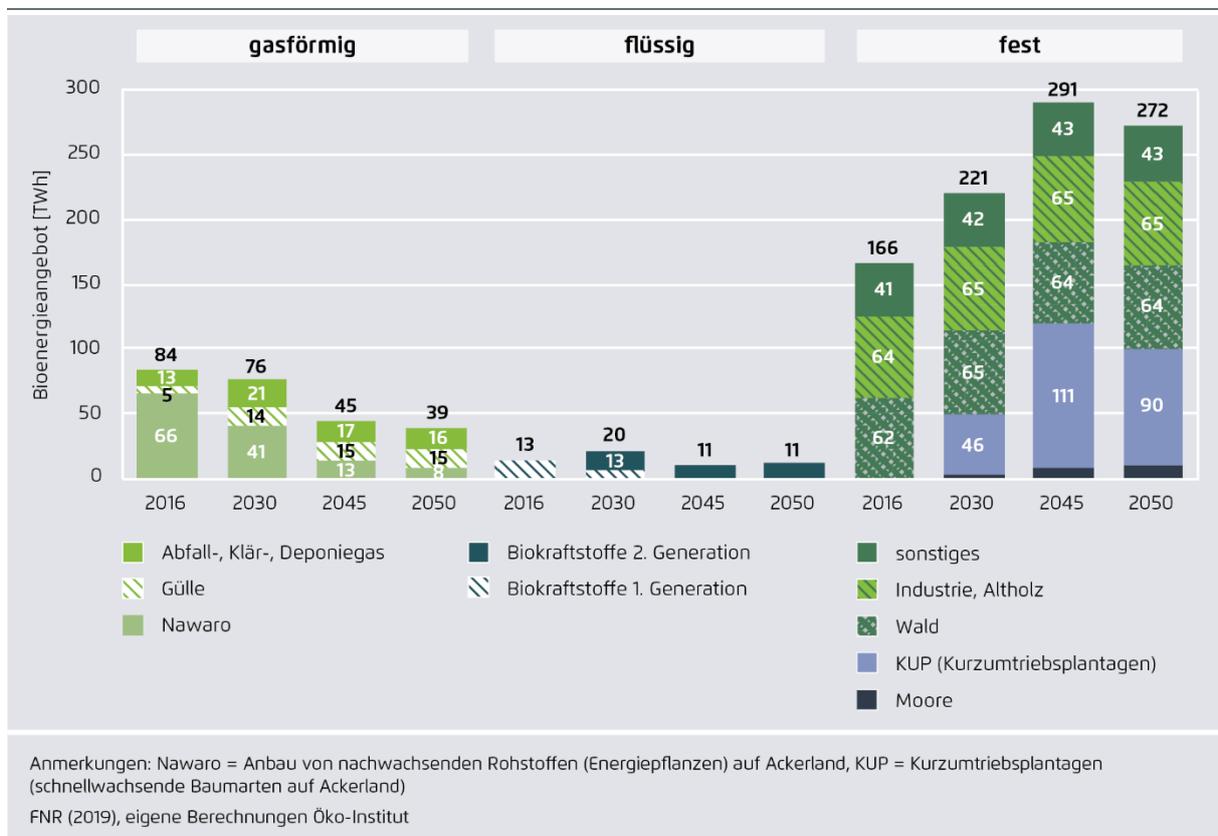
- Die Rolle der dezentralen Biogasanlagen nimmt für die Stromerzeugung zukünftig ab. Stattdessen wird das Biogas zukünftig in einzelnen Regionen zentral zur Deckung der Nachfrage der Industrie für Hochtemperaturwärme und ansonsten dezentral für die Wärmeversorgung der Landwirtschaft und für kleine Nahwärmenetze benötigt. Eine Netzeinspeisung findet nicht mehr statt, da die infrastrukturellen Voraussetzungen dafür zunehmend fehlen werden (rapider Abbau der Erdgasnutzungen).
- Für den Einsatz von Biomasse für BECCS muss die verfügbare Biomasse zentral zur Verfügung stehen. Dazu eignet sich überwiegend feste Biomasse, da hier die Transportwürdigkeit höher ist. Bei Bedarf kann für punktuelle, größere Nachfrageströme nach gasförmiger Biomasse auch eine Feststoffvergasung erfolgen (ergänzend zur Vergärung aus dem vorherigen Punkt).
- In Folge der verstärkten Nachfrage nach fester Biomasse sinkt die Anbaufläche von Biogas-Ko-Substrat (wie beispielsweise Mais). Diese Flächen werden für die Deckung des Bedarfs an fester Biomasse durch die Umstellung auf Agroforstsysteme, Hecken- bzw.

Kurzumtriebsplantagen verwendet. Dadurch entsteht keine zusätzliche Gefährdung der Waldsenke und auch aus Sicht der Landwirtschaft hat die Umstellung von Mais auf holzige Anbaubiomasse aus Klimasicht Vorteile. Hier sind insbesondere die Reduktion des Düngemittelseinsatzes, ein zusätzlicher Humusaufbau und einer besseren Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel als Vorteile zu nennen.

Angebot

Die getroffenen Vorüberlegungen spiegeln sich in der Verfügbarkeit des inländischen Biomasseangebotes wider. Während sich das Angebot an gasförmiger Biomasse bis zum Jahr 2045 gegenüber 2016 in etwa halbiert, steigt der Anteil der festen Biomasse kontinuierlich an. Bis zum Jahr 2045 wird Biogas überwiegend aus Reststoffen wie Gülle, vergorenen Bioabfällen und nur noch zu einem kleinen Anteil aus Energiepflanzen zur Verfügung gestellt. Im Bereich der festen Biomasse trägt vor allem der Anbau von fester Biomasse in Agroforstsystemen, Hecken bzw. Kurzumtriebsplantagen zur Ausweitung des inländischen Angebots bei. Bis zum Jahr 2045 wird zusätzlich ein weiterer Anteil an fester Biomasse aus Paludikulturen auf den wiedervernässten Mooren gewonnen. Im Bereich der Biokraftstoffe übersteigt die Nachfrage im Jahr 2030 noch das inländische Angebot und ein Anteil an Biokraftstoffimporten bleibt weiterhin bestehen. Im Jahr 2045 kann die Biokraftstoffnachfrage, die zum großen Teil aus den schweren landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen stammt aus Reststoffen (v.a. Stroh) gedeckt werden.

Abbildung 58: Inländisches Biomasse-Angebot für die energetische Nutzung



Nachfrage

Im Jahr 2016 betrug die energetische Biomassenutzung 296 Terawattstunden. Bis zum Jahr 2045 steigt die Nachfrage nach Biomasse an. Gegenüber 2016 werden im Jahr 2030 38 Terawattstunden (+13 Prozent) mehr Biomasse für die energetische Nutzung nachgefragt, während im Jahr 2045 49 Terawattstunden (+16 Prozent) mehr Energie aus der Biomasse gewonnen werden. Bis zum Jahr 2050 geht die Biomasse Nachfrage wieder auf 322 Terawattstunden zurück und liegt damit unter der Nachfrage von 2030.

Auf Grund der Nutzungskonkurrenz zwischen den Sektoren und den unterschiedlichen Möglichkeiten von alternativen Nutzungen verschiebt sich die Biomassennachfrage. Während im Jahr 2016 gut die Hälfte der Biomassennachfrage aus dem Energiesektor kam, reduziert sich die Nachfrage des Energiesektor im Jahr 2045 auf 14 Prozent der gesamten Bioenergie und macht im Jahr 2050 nur noch 10 Prozent der Bioenergienachfrage aus. Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien stehen dem Energiesektor geeignete Alternativen zur Verfügung. Dagegen steigt vor allem die Nachfrage nach Bioenergie aus dem Industriesektor, in dem für einige Anwendungen keine adäquaten Alternativen zur Verfügung stehen. Von 11 Prozent im Jahr 2016 steigt die Nachfrage auf 50 Prozent des gesamten Bioenergieangebots im Jahr 2045. Im Gebäudesektor ist die Nachfrage nach Bioenergie im Jahr 2045 gegenüber 2016 in etwa konstant und sinkt bis ins Jahr 2050 weiter ab, während im Jahr 2030 etwas mehr Biomasse benötigt wird. Der GHD Sektor verdoppelt bis ins Jahr 2045 seinen Biomasseeinsatz, vor allem bedingt durch die Ausweitung der Bioenergienachfrage des Landwirtschaftssektors, der bis ins Jahr 2045 auf hofeigene Lösungen setzt und beispielsweise Biogas aus Gülle zur Deckung des eigenen Wärmebedarfs nutzt. Im Verkehrssektor sinkt die Nachfrage nach Bioenergie bis zum Jahr 2045 auf null, da hier geeignete Alternativen zur Verfügung stehen. Bis zum Jahr 2030 kommt es weiterhin zu Importen von Biokraftstoffen, die aber in den Jahren nach 2030 auf Grund der Nachfragerückgänge aus dem Verkehrssektor auf null reduziert werden können.

Im Szenario KN2045 liegt die Biomassennachfrage im Jahr 2045 ca. 2 Terawattstunden höher als im Szenario KN2050 im Jahr 2050. Die bereits 2045 hohe Biomassennachfrage aus dem Industriesektor in Kombination mit den Nachfragen aus dem Energiesektor und dem Sektor der Privaten Haushalte, die im Jahr 2045 noch mehr Biomasse benötigen als im Szenario KN2050 im Jahr 2050, führt zu dem Anstieg der energetischen Biomassenutzung im Jahr 2045. Im Jahr 2050 sinkt die Biomassennachfrage wieder und liegt unter den Werten des Szenarios KN2050.

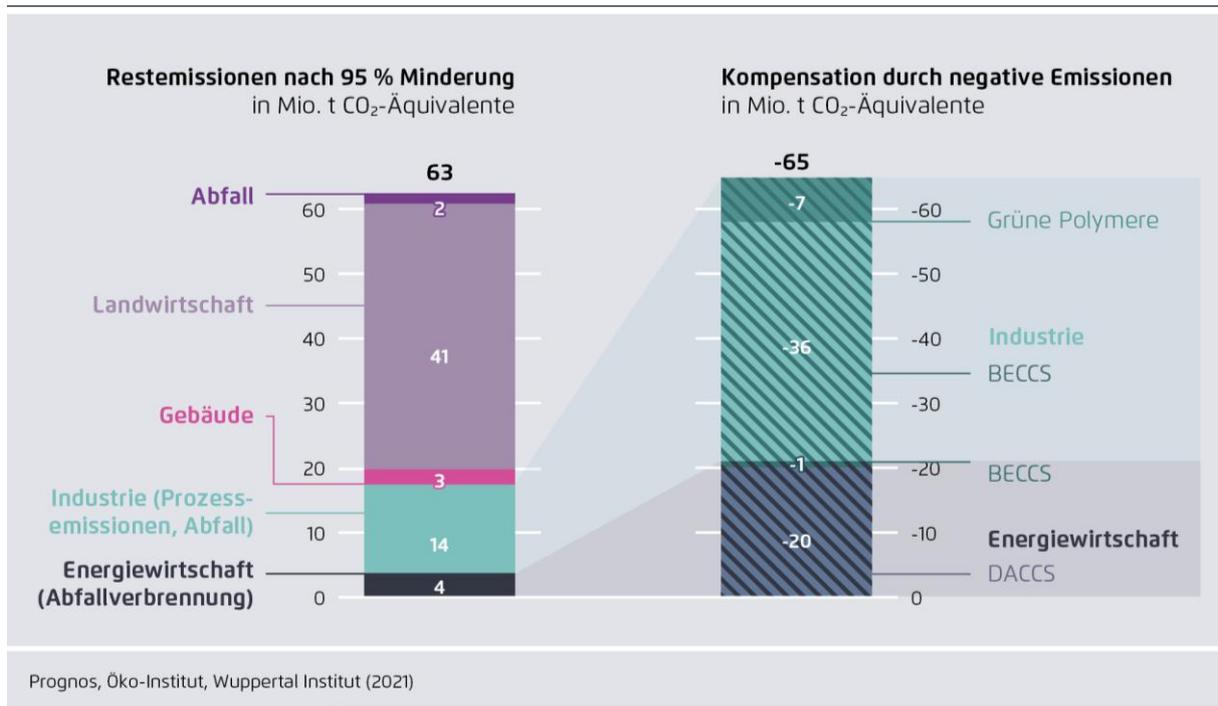
Abbildung 59: Energetischer Biomasseeinsatz in den einzelnen Sektoren



3.7 Negative CO₂-Emissionen und CCS

Im Szenario KN2045 verbleiben im Jahr 2045 insgesamt 63 Mio. t CO₂-Äq als residuale, nicht anderweitig vermeidbare Emissionen. Diese werden mit negativen CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Methoden zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre kompensiert (vgl. Abbildung 60). Durch Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂ aus der Nutzung biogener Energieträger (BECCS) werden negative Emissionen im Umfang von 37 Mio. t CO₂-Äq erreicht, davon 36 Mio. t CO₂-Äq in der Industrie und 1 Mio. t CO₂-Äq im Energiesektor. Weitere 20 Mio. t CO₂-Äq werden durch Abscheidung von CO₂ direkt aus der Umgebungsluft und dessen permanenter geologischer Speicherung (DACCS) aus der Atmosphäre entfernt. Zudem werden durch die Bindung von zuvor aus der Atmosphäre entnommenem Kohlenstoff in Kunststoffen („grüne Polymere“) negative Emissionen in Höhe von 7 Mio. t CO₂-Äq erzielt.

Abbildung 60: Residuale Treibhausgas-Emissionen und deren Kompensation im Jahr 2045



Von den genannten CO₂-Mengen werden im Jahr 2045 57 Mio. t CO₂ geologisch gespeichert. Zusätzlich werden im Szenario 16 Mio. t CO₂ aus prozessbedingten Emissionen, bei der thermischen Verwertung von Abfällen (ohne biogene Anteile) und Restchemikalien sowie an den Steamcrackern der chemischen Industrie abgeschieden und geologisch gespeichert. Insgesamt werden somit im Jahr 2045 73 Mio. t CO₂ abgeschieden und einer geologischen Einspeicherung zugeführt.

3.7.1 CO₂-Abscheidung

CO₂-Abscheidung aus Punktquellen

Aus energiewirtschaftlichen oder industriellen Punktquellen (zum Beispiel Zementklinkerofen) kann Kohlendioxid mithilfe verschiedener Technologien wie Absorption, Adsorption, chemischem Looping, Membran-Gastrennung oder mittels Gashydrat-Technologien abgeschieden werden. Die Kosten für eine CO₂-Abscheidung sind prinzipiell am niedrigsten bei Prozessen oder Anlagen, die Gasströme mit relativ hoher CO₂-Konzentration und hohen CO₂-Emissionsraten aufweisen und die mit hohen Auslastungsfaktoren arbeiten (Bui et al. 2018). Von daher liegt im Szenario KN2045 (ebenso wie im Szenario KN2050) der Fokus bei der CO₂-Abscheidung auf Punktquellen mit möglichst reinen CO₂-Strömen sowie hohen CO₂-Emissionsmengen pro Jahr.

Aufgrund seiner breiten Anwendbarkeit wird im Szenario KN2045 einerseits das Post-Combustion-Verfahren (Aminwäsche) angenommen und zum anderen für die Zementindustrie und die Biomassefernhelzwerke aus dem Energiesektor auf das energieeffiziente Oxyfuelverfahren gesetzt. Beide Verfahren erlauben hohe Abscheideraten von (mindestens) 90 Prozent.

CO₂-Abscheidung direkt aus der Umgebungsluft

CO₂ kann mithilfe des sogenannten Direct Air Carbon Capture (DAC) auch direkt aus der Umgebungsluft abgeschieden werden. Im Szenario KN2045 wird Kohlendioxid mittels adsorptionsbasierter DAC-Anlagen aus der Atmosphäre entfernt. Dieses Verfahren hat den Vorteil eines geringeren Temperaturniveaus und somit eines im Vergleich zu absorbierenden Verfahren geringeren Strom- und Wärmebedarfs (Fasihi et al. 2019). Außerdem entsteht Wasser als Nebenprodukt und muss nicht wie beim absorptionsbasierten Verfahren kontinuierlich dem Prozess hinzugefügt werden.

3.7.2 CO₂-Infrastruktur

Kohlendioxid kann per Pipeline, Schiff, Güterzug oder Lkw transportiert werden. Für den Transport kleiner Mengen im niedrigen einstelligen Millionen-Tonnen-Bereich bietet sich in der Frühphase der Errichtung einer CO₂-Infrastruktur für Punktquellen in der Nähe von Wasserstraßen der Transport per Binnenschiff an. Der Transport per Lkw oder Bahn wird hingegen, für die an den oben genannten Punktquellen anfallenden CO₂-Mengen sowie die bis zu den Speicherorten in der Nordsee (siehe unten) zu überwindenden Entfernungen, als zu teuer betrachtet. Langfristig und für die gesamten oben genannten Mengen ist jedoch die Errichtung einer europäischen CO₂-Pipeline-Infrastruktur unumgänglich.

Für die im Szenario KN2045 unverändert anvisierten geologischen Speicherstätten in der Nordsee könnte es eine Ausrichtung der zu errichtenden CO₂-Pipeline-Infrastruktur in Richtung Antwerpen, Rotterdam und Amsterdam sowie Hamburg als zentrale Seehäfen für eine Offshore-CO₂-Infrastruktur geben. Die im Szenario hinterlegte CO₂-Pipeline-Infrastruktur stellt dabei eine effiziente Verbindung von großen CO₂-Punktquellen mit den Speicherstätten beziehungsweise CO₂-Offshore-Hubs her. Unter Berücksichtigung der mit der Errichtung einer CO₂-Pipeline zu erwartenden Kosten sowie möglicher Akzeptanzprobleme erstreckt sich die CO₂-Infrastruktur dabei jedoch nicht bis zu von den Speicherstätten weit entfernten, nur vereinzelt auftretenden, großen Punktquellen, die im Süden Deutschlands abseits der Rheinschiene und südlich des Mains liegen.

Wie bereits im Szenario KN2050 dargelegt, wäre auch im Szenario KN2045 eine Einschränkung der Infrastruktur und CO₂-Abscheidung auf eine kleinere Auswahl von CO₂-Punktquellen denkbar. Die dann nicht abgeschiedenen CO₂-Mengen aus industriellen und energiewirtschaftlichen CO₂-Quellen müssten jedoch für das Erreichen der Klimaneutralität über einen verstärkten Einsatz von DAC mit anschließender dauerhafter Speicherung des CO₂ kompensiert werden. Hierbei gilt es zwischen den mit einem Pipelinebau verbundenen Kosten und Herausforderungen einerseits sowie dem Energiebedarf und Flächenverbrauch von DAC-Anlagen andererseits abzuwägen.

3.7.3 Dauerhafte Speicherung von abgeschiedenem CO₂

Die abgeschiedenen CO₂-Mengen müssen dauerhaft gebunden beziehungsweise gespeichert werden, um eine Emission in die Atmosphäre auch langfristig zu vermeiden. Hierfür gibt es die Möglichkeit, CO₂ in geeigneten geologischen Formationen zu speichern. Zudem kann CO₂ langfristig auch in langlebigen industriellen Produkten gebunden werden.

Geologische Speicherung

Als CO₂-Speicher kommen in Deutschland prinzipiell aufgrund der geologischen Gegebenheiten insbesondere entleerte Erdgaslagerstätten und saline Aquifere im Norddeutschen Becken infrage. Laut KSpG³⁶ ist eine geologische Speicherung von CO₂ in Deutschland auf Demonstrationsanlagen beschränkt, wobei die Antragsfrist für solche Anlagen abgelaufen ist, und somit eine geologische Speicherung in Deutschland de facto aus rechtlicher Sicht derzeit nicht möglich ist. Aus europäischer Perspektive von Interesse sind insbesondere große Speicher in Form von salinen Aquiferen und entleerten Erdgas- und Erdölfeldern unterhalb der Nordsee und der norwegischen See. Sie verfügen über eine theoretische Gesamtspeicherkapazität von circa 200 Gigatonnen CO₂ (GCCSI, 2019). Sowohl die Niederlande (Port of Rotterdam) als auch Norwegen (Northern Lights) unterstützen Vorhaben zur Erschließung dieser Speicher für die Verbringung von CO₂.

Bindung von CO₂ in Produkten der chemischen Industrie

Im Szenario KN2045 verwendet die chemische Industrie im Jahr 2045 in Deutschland 14 Millionen Tonnen Kohlenwasserstoffe, die als Feedstock in verschiedene Prozesse zur Weiterverarbeitung eingehen. Es handelt sich hierbei zum einen um importiertes „grünes“ Naphtha, importiertes „grünes“ Methanol und importierte Pyrolyseprodukte. Zum anderen sind es Produkte aus der inländischen Pyrolyse von Kunststoffabfällen (Naphtha, Ethan und Gasöl) sowie Methanol, das der Gasifizierung von Kunststoffabfällen entstammt und in den Methanol-to-Olefine (MtO) -Prozess eingeht (vgl. Abbildung 27).

Während es sich beim chemischen Recycling (Pyrolyse, Gasifizierung) von Kunststoffabfällen um ein Recycling von Kohlenstoff handelt, gelangt durch die Verwendung von „grünem“ Naphtha und Methanol, die mittels Power-to-Liquid-Verfahren hergestellt werden, auch Kohlendioxid aus der Atmosphäre (in reduzierter Form als Kohlenstoff) in die Produkte der chemischen Industrie. Der in die Produkte übergegangene Kohlenstoff bleibt je nach Produktlebensdauer unterschiedlich lange in den Produkten (zwischen-)gespeichert. Diese Bindung wird im Szenario als Brutto-Negativ-Emission verbucht. Die Emissionen aus Kunststoffabfällen werden im Szenario entsprechend stets wie Emissionen aus fossilen Brennstoffen bewertet (auch wenn der Kunststoff aus einem „grünen“ Feedstock hergestellt wurde). Daher erfolgt keine Doppelbilanzierung mit der angenommenen Anrechnung der Speicherung von Kohlenstoff in Kunststoffprodukten als negative Emission. Netto-Negativ-Emissionen ergeben sich gegebenenfalls durch eine Zufuhr von Kunststoffen in den Bestand, die aus „grünem“ Feedstock hergestellt wurden (negative Emission), in Kombination mit CCS bei der Verbrennung von Kunststoffabfällen (Null-Emission).

CO₂-Mineralisierung im Betonbau

Bei der CO₂-Mineralisierung (oder auch CO₂-Karbonatisierung) reagiert CO₂ mit Mineralien und bildet Karbonate, die CO₂ dauerhaft speichern. Im Betonbau gibt es basierend auf diesem prinzipiellen chemischen Vorgang verschiedene Ansätze zur dauerhaften Speicherung von CO₂ durch dessen Bindung im Beton. Die Verfahren befinden sich jedoch zu großen Teilen noch in der Entwicklung und das Marktpotenzial aller Verfahren sowie ihre mögliche Einbettung in (regionale) CO₂-Kreisläufe sind noch weitgehend unklar. Aufgrund dieser Unsicherheiten werden im Szenario die möglichen Potenziale der CO₂-Mineralisierung als CO₂-Senke nicht quantifiziert.

³⁶ Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz). Zulassungsentscheidungen nach dem KSpG werden in den Landesbehörden getroffen.

3.7.4 Negative Emissionen

Um die für das Erreichen der Klimaneutralität erforderlichen negativen CO₂-Emissionen zu erzielen, wird auf geeignete Weise die Abscheidung von CO₂ mit dessen dauerhaften Speicherung kombiniert.

BECCS: Abscheidung und Speicherung von biogenem CO₂

Im Szenario KN2045 werden in gleicher Weise wie im Szenario KN2050 verschiedene biogene Brennstoffe – Biomethan, Biogas sowie feste Biomasse in Form von Holzhackschnitzeln – je nach ihrer Eignung in den verschiedenen energiewirtschaftlichen und industriellen Anlagen sowie je nach ihrer regionalen Verfügbarkeit an den industriellen Standorten verwendet (siehe Kapitel 3.6 Bioenergie). Die an mit CO₂-Abscheidetechnologie ausgestatteten Standorten abgeschiedenen (biogenen) CO₂-Mengen werden anschließend einer geologischen Speicherung zugeführt.

Zentrale Pfeiler für die Erzielung von negativen Emissionen sind der Einsatz fester Biomasse und die CO₂-Abscheidung an Heizkesseln für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme in der Stahlindustrie (minus 13 Mio. t CO₂ im Jahr 2045) sowie für die Dampfbereitstellung in der chemischen Industrie (minus 20 Mio. t CO₂ im Jahr 2045). Durch Einsatz von biogenen Brennstoffen und Alternativbrennstoffen mit biogenen Kohlenstoffanteilen in mit CO₂-Abscheidetechnologien ausgestatteten Anlagen der Zement-, Kalk- und Glasindustrie werden weitere negative Emissionen (minus 2 Mio. t CO₂ im Jahr 2045) erzielt. Zusätzlich werden in Biomassefernhelzwerken zur Wärmeproduktion weitere 1 Mio. t negative CO₂-Emissionen erzeugt. In Summe werden im Szenario KN2045 negative Emissionen mittels BECCS in ähnlicher Höhe wie im Szenario KN2050 erzielt, jedoch wird dies fünf Jahre früher erreicht.

DACCS: Abscheidung und Speicherung von CO₂ aus der Umgebungsluft

Im Vergleich zum Szenario KN2050 findet ein beschleunigter Hochlaufpfad für adsorptionsbasierte DAC-Anlagen statt. Im Szenario KN2045 werden mittels adsorptionsbasierter DAC-Anlagen schon im Jahr 2045 20 Millionen Tonnen CO₂ aus der Atmosphäre entfernt und der permanenten geologischen Speicherung zugeführt. Für die CO₂-Abscheidung aus der Umgebungsluft im Jahr 2045 wird ein Energiebedarf von rund 0,4 Terawattstunden elektrischer und 1,6 Terawattstunden thermischer Energie pro abgeschiedene Million Tonnen CO₂ angenommen. Im Vergleich zum Jahr 2050 im Szenario KN2050 ergibt sich aufgrund der leicht höheren CO₂-Abscheidemenge für 2045 auch ein höherer Gesamtenergiebedarf für DAC von rund 40 Terawattstunden, wobei der Energiebedarf für den CO₂-Transport und für die CO₂-Speicherung noch nicht miteinberechnet wurde. Der thermische Energiebedarf für die CO₂-Abscheidung wird durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen gedeckt, die die benötigten Temperaturen für den Abscheidungsprozess von rund 100 Grad Celsius erreichen. Um den hohen Strombedarf zu decken, bieten sich für die Errichtung von DAC-Anlagen küstennahe Standorte an, an denen einerseits große Mengen an erneuerbarem Strom vorhanden sind und andererseits die Nähe zu potenziellen CO₂-Hubs an der Nordseeküste und zu geologischen CO₂-Speicherstätten in der Nordsee gegeben ist.

Grüne Polymere: Bindung von CO₂ in Produkten der chemischen Industrie

In der chemischen Industrie werden im Jahr 2045 noch etwa 3,3 Millionen Tonnen Naphtha und Methanol über Pipelines importiert (vgl. Abbildung 27). Dieser Feedstock wird im Jahr 2045 synthetisch hergestellt. Der darin enthaltene Kohlenstoff stammt aus biogenen Quellen oder aus einer CO₂-Abscheidung aus der Umgebungsluft (DAC). Bei Weiterverarbeitung dieses „grünen“ Feedstocks zu Kunststoffen in Deutschland wird der darin gebundene Kohlenstoff je nach

Verwendungszweck der Kunststoffe über einen Zeitraum von wenigen Wochen (bei Verpackungen) bis zu mehreren Jahrzehnten (im Baubereich) gespeichert. Für eine dauerhafte Entnahme des in den Kunststoffen gebundenen Kohlenstoffs aus der Atmosphäre ist sein Verbleib nach der Nutzungsphase (inklusive einer möglichen Wiederverwertung durch mechanisches oder chemisches Recycling) entscheidend. Bei einer thermischen Verwertung in mit CO₂-Abscheideanlagen ausgestatteten energiewirtschaftlichen oder industriellen Feuerungsanlagen mit anschließender geologischer Speicherung des bei der Verbrennung dieser Kunststoffe anfallenden CO₂ wird dieses der Atmosphäre dauerhaft entzogen. Durch den Einsatz von „grünem“ Feedstock und dessen Bindung in Kunststoffen werden im Szenario negative Emissionen in Höhe von knapp 9 Mio. t CO₂ erzielt. Der Minderungsbeitrag grüner Polymere entspricht damit in etwa demjenigen in KN2050.

Weitere Optionen für negative Emissionen

Ein Teil der residualen Emissionen von 63 Mio. t CO₂-Äq könnte auch durch weitere CO₂-Entnahme-Methoden kompensiert werden, die in der Studie zum Szenario KN2050 kurz dargestellt wurden, aber in dieser Studie ebenso wenig wie im Szenario KN2050 berücksichtigt, beziehungsweise quantifiziert werden. Dazu zählen Aufforstung und Wiederaufforstung, eine stoffliche Nutzung von Holz in langlebigen Produkten, die Verteilung von Pflanzenkohle auf und in Böden, die beschleunigte Verwitterung oder das „Düngen“ des Ozeans.

3.8 Wasserstoff

Bisher wird Wasserstoff aus fossilen Quellen vor allem in Raffinerien und zur Herstellung von Ammoniak und Methanol eingesetzt. Zukünftig wird Wasserstoff auch in anderen Bereichen vielseitig eingesetzt werden. Gleichzeitig wird die Wasserstoffherzeugung zukünftig treibhausgasfrei beziehungsweise treibhausgasarm erfolgen.

Für die weitere Entwicklung der Wasserstoffnutzung, der Wasserstoffherzeugung und den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur orientieren sich die Szenarien KN2045 und KN2050 an den gleichen strukturellen Rahmenbedingungen. Sie werden in dieser Studie noch einmal gekürzt aufgeführt, um die erwartete Entwicklung in den Kontext einzuordnen.

Grundsätzlich erfolgt der Auf- und Ausbau der Infrastruktur und der inländischen Erzeugung im Szenario KN2045 schneller als im Szenario KN2050, um den früher steigenden Bedarf – auch über moderat steigende Importe – sicher abzudecken.

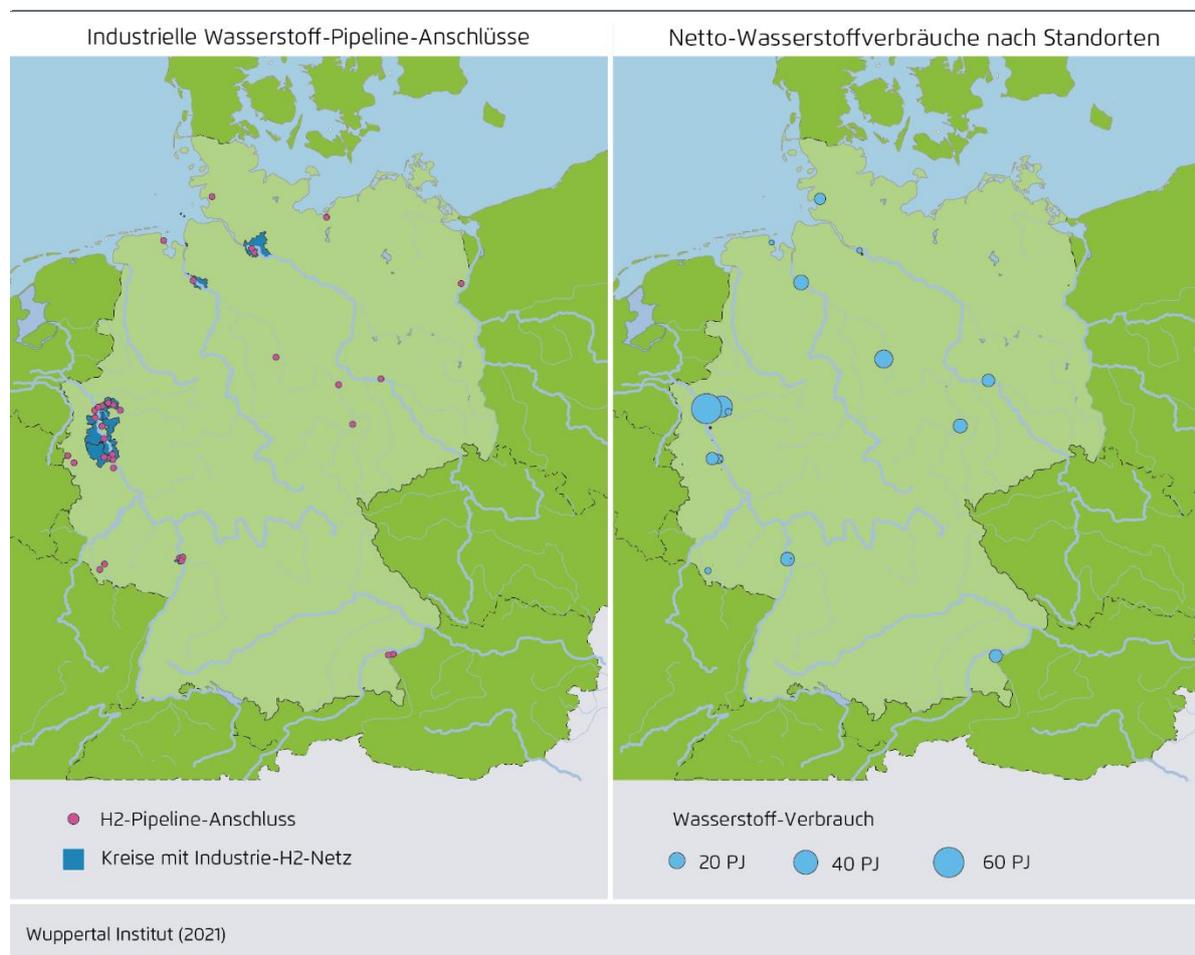
Wasserstoffbedarf und -Infrastruktur

Der Verwendung von treibhausgasfrei (oder mittelfristig auch treibhausgasarm) erzeugtem Wasserstoff kommt eine zentrale Rolle zu. Um eine THG-Minderung um 65 Prozent gegenüber 1990 zu erreichen, wird Wasserstoff in den Szenarien KN2045 und KN2050 bereits 2030 in den drei Sektoren Verkehr, Industrie und Energiewirtschaft (Kraftwerke und Raffinerien) eingesetzt.

Entsprechend den derzeit geplanten Aktivitäten an den Hafenstandorten wird angenommen, dass fossil erzeugter Wasserstoff mit Kohlenstoffabscheidung (wie auch erneuerbar erzeugter Wasserstoff) zwischen 2025 und 2040 an Küstenstandorten (oder an geeigneten Schnittstellen zwischen Strom- und Gasnetz im Binnenland) produziert wird und der Wasserstoff per Pipeline in das Binnenland gelangt.

Bis 2045 dringt das Wasserstoff-Netz weiter nach Süden und in die Fläche vor. Dadurch wird dieses Netz langfristig auch zur Versorgung des Verkehrs wertvoll, dessen Bedarf für den Straßengüterverkehr bis auf 40 Terawattstunden ansteigt. Die Netto-Wasserstoffabnahme der Industrie (inkl. Raffinerien) steigt bis 2040 auf 87 Terawattstunden an, und sinkt bis 2045 wieder auf 72 Terawattstunden. Um die Wasserstoffcluster der energieintensiven Industrie herum werden im Einzelfall Teile der bestehenden Gasverteilnetze auf Wasserstoff umgestellt, um besonders räumlich konzentrierte mittelständische energieintensive Industrie wie etwa Gießereien oder Glashütten auf diesen Energieträger umstellen zu können. Wir gehen jedoch davon aus, dass dies ein regionales Phänomen bleibt und dass Wasserstoff nicht bis in die Ebene der Gebäudeversorgung vordringen wird. Die folgende Karte zeigt, dass zumindest die industrielle Wasserstoffversorgung auch langfristig (zur Mitte des Jahrhunderts) auf wenige große Senken und einige wenige räumliche Cluster mit hoher Dichte an energieintensiven Betrieben beschränkt bleibt.

Abbildung 61: Übersicht über den Endausbau der industriellen Wasserstoff-Versorgung in Deutschland*



* ohne Tankstellen, ohne Kraftwerke zur Rückverstromung von Wasserstoff

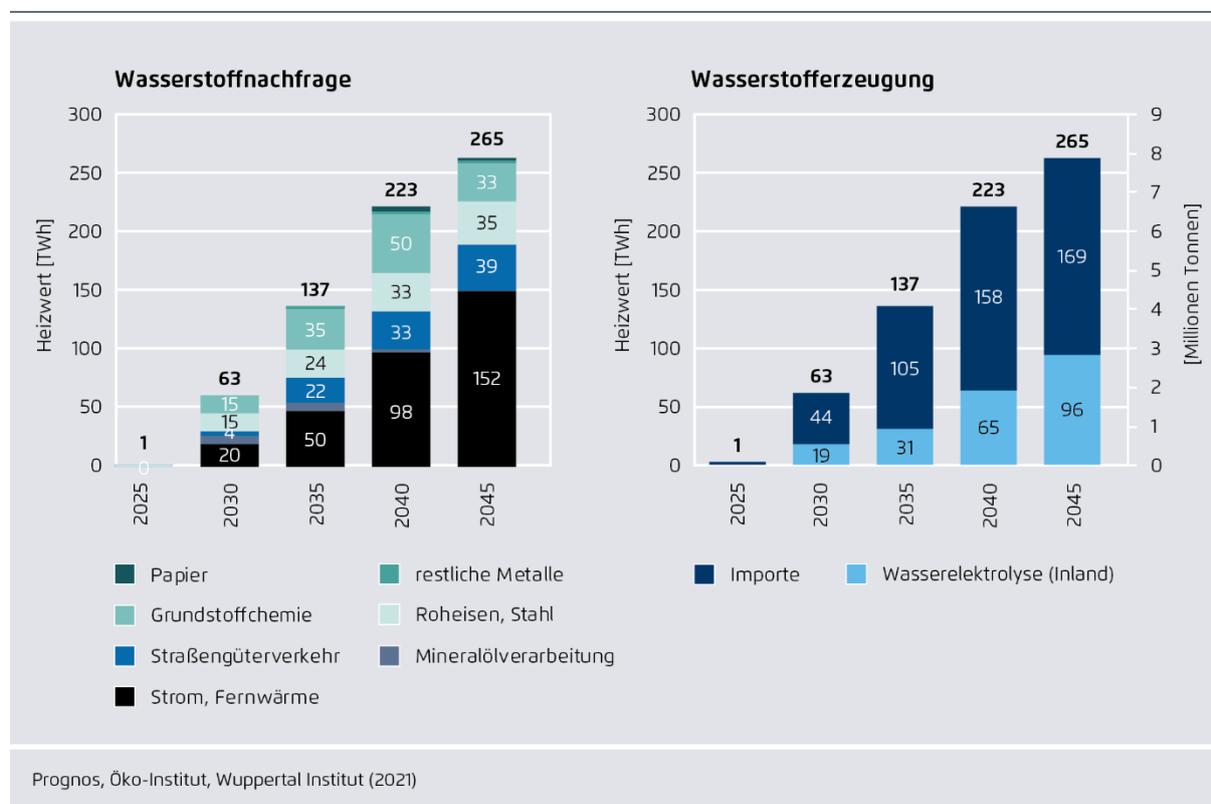
Während das Wasserstoffnetz also wächst und neue Verbraucher hinzukommen, fallen zwischen 2040 und 2045 einzelne Verbraucher aus der Versorgung wieder heraus: Dies sind in erster Linie die Raffinerien. An den Standorten der chemischen Industrie wird die 2030 teilweise auf Wasserstoff umgestellte Dampferzeugung bis 2045 sehr weitgehend auf Biomasse umgestellt. Die entsprechenden Netzanschlüsse müssen sich also in relativ kurzer Zeit amortisieren bzw. umgenutzt

werden. So wird ein Teil des Wegfalls des Wasserstoffeinsatzes für die Dampfbereitstellung (15 Terawattstunden in der Spitze im Jahr 2040) teilweise kompensiert durch einen Anstieg des stofflichen Bedarfs für Wasserstoff im Rahmen des chemischen Recyclings von Kunststoffabfällen.

Wasserstofferzeugung

Abbildung 62 stellt die Wasserstoffnachfrage der Erzeugung gegenüber. Im Jahr 2030 liegt die Nachfrage nach treibhausgasfreiem Wasserstoff in Summe bei 63 Terawattstunden Heizwert (1,9 Millionen Tonnen). Bis 2045 wird sie auf 265 Terawattstunden (8 Millionen Tonnen) gesteigert. Es wird angenommen, dass 36 Prozent dieser Menge im Inland aus erneuerbarem Strom mittels Wasserelektrolyse erzeugt werden kann.

Abbildung 62: Treibhausgasfreie Wasserstoffnachfrage und Wasserstofferzeugung



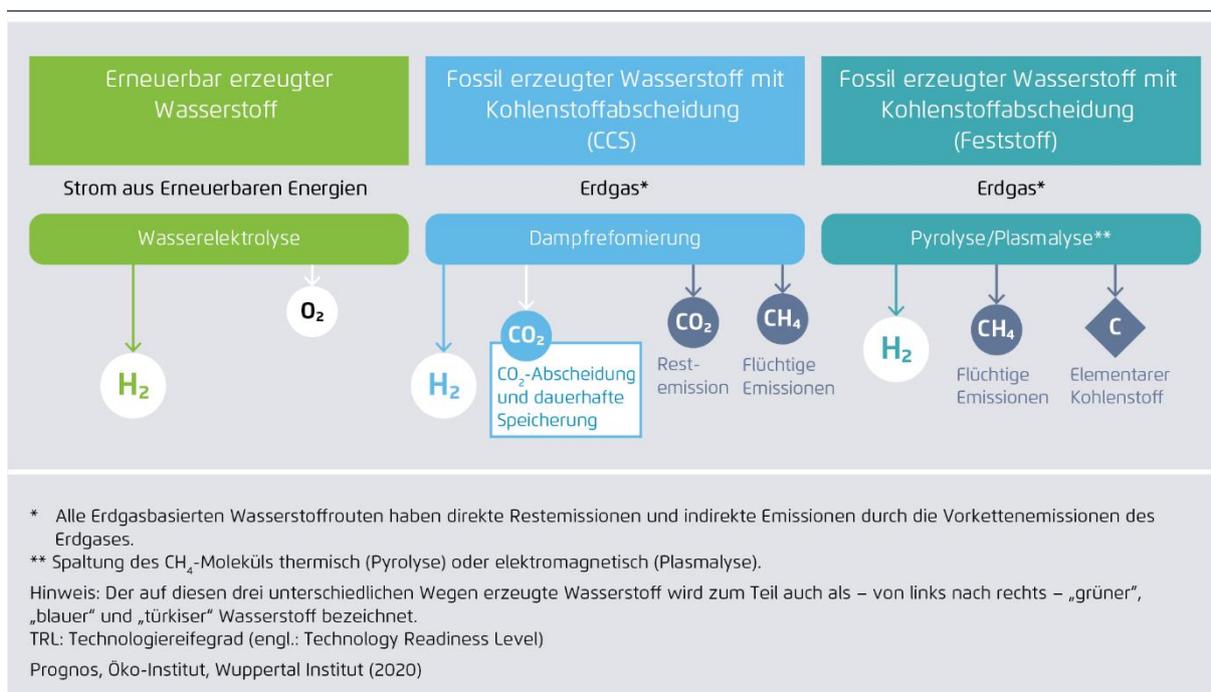
In Nachbarländern wie den Niederlanden und Dänemark lassen Projekte und Machbarkeitsstudien eine gewisse Menge an Importen aus dem EU-Ausland erwarten, beispielsweise über umgewidmete L-Gas-Leitungen wie es der Vorschlag eines Wasserstoff-Backbone-Netzes der deutschen Gas-Fernleitungsnetzbetreiber vorsieht. Ein weiterer Teil der Importe müsste über Pipelines oder die Schifffahrtswege aus Weltregionen mit günstigen Voraussetzungen für die Produktion von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff beziehungsweise fossil erzeugtem Wasserstoff mit Kohlenstoffabscheidung eingeführt werden.

Aus heutiger Sicht kommen zwei Optionen als treibhausgasarme Optionen zur Wasserstofferzeugung (vgl. Abbildung 63) in Frage: Wasserelektrolyse mit erneuerbar erzeugtem Strom und

Wasserstoff aus fossilem Erdgas, bei dem die entstehenden Emissionen abgeschieden und dauerhaft endgelagert werden.

Der mit Dampfreformierung und CCS erzeugte Wasserstoff wird jedoch aufgrund begrenzter CO₂-Abscheideraten und der Vorkettenemissionen von Erdgas im Gegensatz zu erneuerbar erzeugtem Wasserstoff nicht 100 Prozent treibhausgasneutral sein können. Dennoch könnte der fossil erzeugte Wasserstoff mit Kohlenstoffabscheidung, etwa aus Norwegen, für eine Übergangszeit bis zum Aufbau entsprechender Kapazitäten für die erneuerbare Stromerzeugung und flexible Elektrolyse, eine entscheidende Rolle spielen. Eine inländische Produktion solchen Wasserstoffs wird nicht erwartet.

Abbildung 63: Treibhausgasfreie und -arme Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff



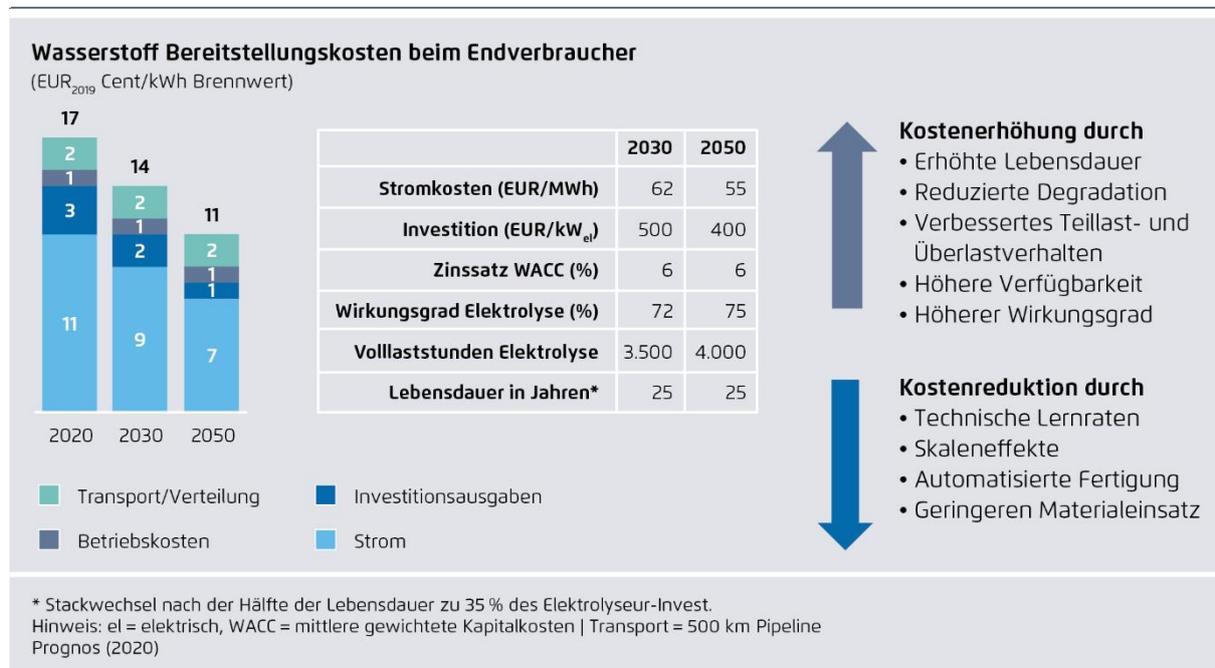
Eine weitere Option zur Wasserstoffgewinnung aus fossilem Erdgas ist die Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) in seine molekularen Bestandteile Wasserstoff und Kohlenstoff. Diese ist jedoch technisch noch nicht ausgereift und weder großskalig noch für den Einsatz mit Erdgas verfügbar. Vorteilhaft ist hier die Abspaltung von elementarem (festem) Kohlenstoff (Industrieruß, Carbon Black), der viel leichter zu deponieren ist als abgeschiedenes CO₂.

Wasserstoffkosten

Die Energiekosten für die Elektrolyse sind der entscheidende Faktor für die Kosten erneuerbar erzeugten Wasserstoffs. Möglichst niedrige Kosten des Strombezuges und gleichzeitig hohe Vollbenutzungsstunden der Elektrolyse sind jedoch zwei gegenläufige Parameter. Weitere wichtige Kostenfaktoren sind die Investitionsausgaben für Elektrolyseanlagen sowie der Wirkungsgrad und die Lebensdauer der Anlagen. Je nach Erzeugungsregion kommen auch noch relevante Kostenanteile für den Transport hinzu.

Abbildung 64 zeigt die in den Szenarien KN2045 und KN2050 hinterlegten Kostenannahmen für die Kostenentwicklung von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff: Diese Annahmen führen zu Bereitstellungskosten beim Endverbraucher (ohne Steuern/ Marge) im Jahr 2020 in Höhe von rund 17,0 Cent/kWh Brennwert (6,6 Euro/kg) und gehen im Verlauf bis zum Jahr 2050 auf 11,0 Cent/kWh (4,3 Euro/kg) zurück. In diesem Beispiel hinterlegt ist eine Halbierung der Kosten der Elektrolyse von 800 Euro/kW (elektrisch) zwischen 2020 und 2050. Einzelne Veröffentlichungen zu möglichen zukünftigen Kostenentwicklungen bei Elektrolyseuren liegen heute bereits darunter. Dieser stärkeren Kostenreduktion, die durch technische Lernraten, Skaleneffekte und automatisierte Fertigung für die heutigen Anlagenkonzepte erreicht werden kann, stehen jedoch kostenerhöhende Anforderungen an Elektrolyseure für den Einsatz mit fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung entgegen, die in dieser Studie berücksichtigt werden. Hierzu zählen der zusätzliche Aufwand für ein weiter verbessertes Teil- und Überlastverhalten, die Erreichung höherer Wirkungsgrade sowie eine reduzierte Leistungsdegradation über eine höhere Lebensdauer.

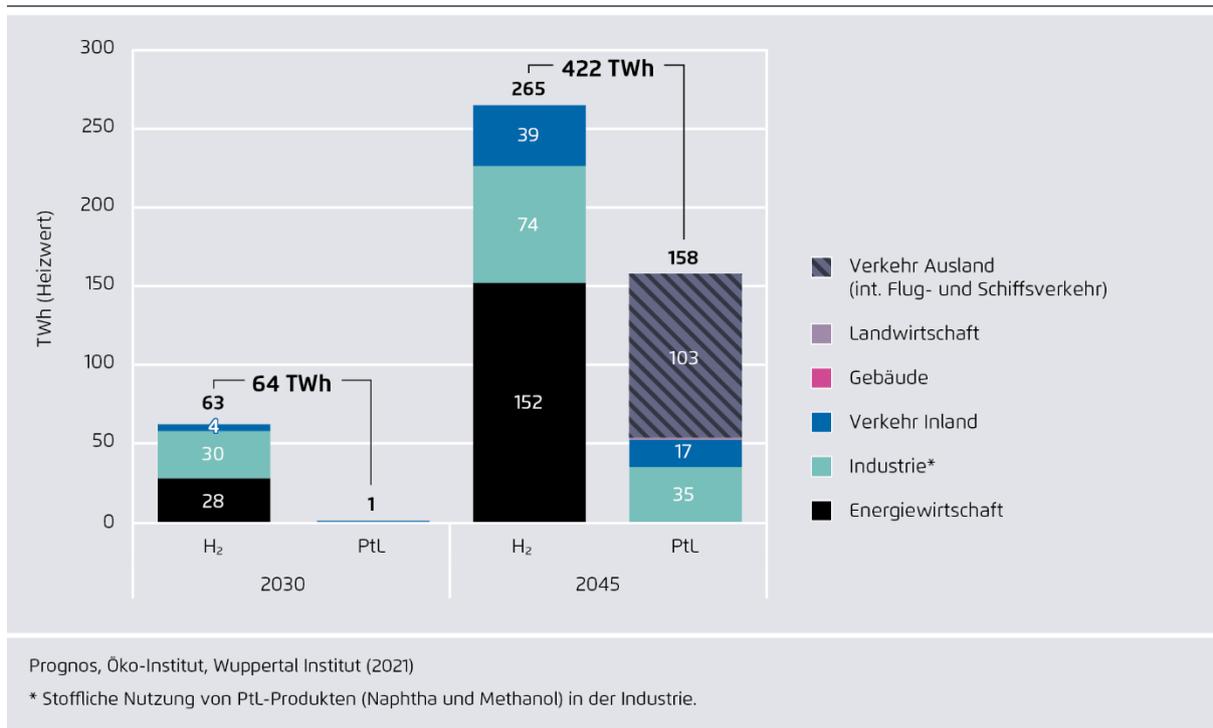
Abbildung 64: Kosten von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff



3.9 Synthetische Energieträger

Zusätzlich zum Wasserstoff werden weitere, auf erneuerbarem Strom basierende Energieträger eingesetzt. Im nationalen und internationalen Schiffs- und Flugverkehr werden hinsichtlich der Herstellung und Verbrennung CO₂-neutrale flüssige Kraftstoffe (PtL) verwendet. Wie in Kapitel 3.4.4 erläutert, ist der Einsatz dieser Brennstoffe im Flugverkehr durch Nicht-CO₂-Effekte (RFI) trotzdem mit einer Klimawirkung verbunden.

Abbildung 65: Einsatz von Wasserstoff und Power-to-Liquid (PtL)



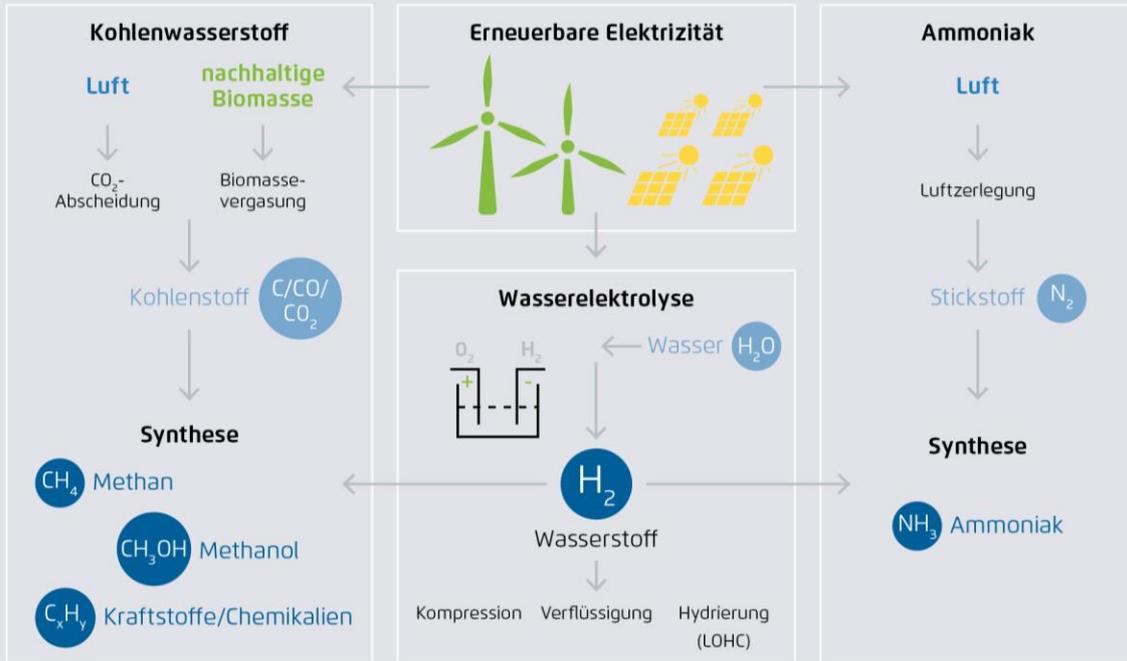
Zudem wird in der Industrie für die stoffliche Nutzung, die nicht durch die verstärkte Kreislaufwirtschaft abgedeckt werden kann, grünes Naphtha eingesetzt. Diese strombasierten Brennstoffe und grünes Naphtha werden nicht in Deutschland hergestellt, sondern importiert; in Summe knapp 160 Terawattstunden.

Insgesamt ergibt sich für 2045 ein Bedarf an Wasserstoff und sonstigen synthetischen Brennstoffen und Feedstocks in Höhe von 422 Terawattstunden, von denen 326 Terawattstunden importiert werden.

Die folgende Abbildung zeigt im Überblick die Produktionsverfahren für strombasierte Energieträger sowie deren Merkmale.

Abbildung 66: Exkurs Power-to-X

Power-to-X (PtX) steht für verschiedene Produktionsverfahren für **strombasierte Brenn-, Kraft- und (chemische) Grundstoffe**. Der elektrische Strom sollte aus erneuerbaren Quellen stammen, um nahezu Treibhausgasneutrale Produkte zu erzeugen. Grundsätzlich können drei PtX-Kategorien unterschieden werden wie die Abbildung verdeutlicht: Wasserstoff (mittig), Kohlenwasserstoffe (links) und Ammoniak (rechts). Als Energiequelle sind zusätzliche EE-Parks mit möglichst hohen Volllaststunden erforderlich.



PtX-Kohlenwasserstoffe benötigen eine treibhausgas-neutrale Kohlenstoffquelle, denn Kohlenstoff ist mit rund 85 Massenprozent Hauptbestandteil. Unter Einsatz von Wasserstoff kann eine große Bandbreite an Kohlenwasserstoffen synthetisiert werden, Methan, Methanol, Kraftstoffe: Benzin, Diesel, Kerosin, Wachse, Naphtha für die Chemieindustrie.

Die Wasserelektrolyse ist der zentrale Schritt von Strom zum chemischen Energieträger. **Wasserstoff** kann direkt als Energieträger oder Chemiebaustein zum Einsatz kommen. Für Transport und Speicherung von Wasserstoff ist allerdings stets ein zusätzlicher Prozess zur Erhöhung der geringen volumenbezogenen Energiedichte notwendig (Verdichtung, Verflüssigung oder Hydrierung von Speicherflüssigkeiten, LOHC).

Für **Ammoniak** wird Stickstoff benötigt, der sehr viel leichter aus der Luft zu extrahieren ist als Kohlenstoff. Dieser wird mit Wasserstoff zu Ammoniak synthetisiert, einem Grundstoff der Düngemittelproduktion. Ammoniak ist bereits bei sehr geringen Drücken flüssig und wird bereits heute als Produkt verschifft.

- ++ Lager- und Transportfähigkeit
- + Anschlussfähigkeit heutige Infrastruktur
- Lange Prozesskette
- Nicht ausgereifte Prozesse (Direct-Air-Capture von CO₂, Synthesen auf CO₂-Basis)
- Kohlenstoffbeschaffung aus Luft aufwendig, biogen begrenzt
- Hohe Verluste
- Teuer

- ++ Lokal emissionsfreie Nutzung als Energieträger möglich
- + im Vergleich niedrigere Kosten als bei Kohlenwasserstoffen
- + Zentraler Stoff zur Dekarbonisierung in Industrie
- Infrastruktur nur teilweise vorhanden
- Geringe volumetrische Energiedichte
- Erhöhter Aufwand für Transport

- ++ Lager- und Transportfähigkeit
- + Bewährte Prozesse (Luftzerlegung, Haber-Bosch-Verfahren)
- + Stickstoffbeschaffung weniger aufwendig
- + günstig im Vergleich zu Kohlenwasserstoffen
- Einsatz als Energieträger im Forschungsstadium

4 Literatur

Acatech et al. (2017): »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Analyse. Energiesystem der Zukunft

Agora (2019). Agora Energiewende: Verteilnetzausbau für die Energiewende Elektromobilität im Fokus – STUDIE
Online verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Netzausbau_Elektromobilitaet/Agora-Verkehrswende_Agora-Energiewende_EV-Grid_WEB.pdf

Agora (2020). Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Technical University of Denmark and Max-Planck-Institute for Biogeochemistry (2020): *Making the Most of Offshore Wind: Re-Evaluating the Potential of Offshore Wind in the German North Sea*

Agora (2020a). How to Raise Europe's Climate Ambitions for 2030; Implementing a -55% Target in EU Policy Architecture – IMPULSE, on behalf of Agora Energiewende, written/in cooperation with Öko-Institut e.V. – Institute for Applied Ecology (Jakob Graichen, Dr. Felix Chr. Matthes, Sabine Gores, Felix Fallasch)
Online available at https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_07_Raising-EU-Ambition/185_A-AW-EU_Ambition_WEB.pdf; last accessed on 10 September 2020

Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019.

atmosfair (2020). The impact of air travel on our climate, atmosfair.
Online available at https://www.atmosfair.de/en/air_travel_and_climate/flugverkehr_und_klima/climate_impact_air_traffic/, last accessed on 22 Apr 2020.

BDI (2018). Klimapfade für Deutschland
Online verfügbar unter: https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/20180118_BDI_Studie_Klimapfade_fuer_Deutschland_01.pdf

Beuth und ifeu (2017) Anlagenpotenzial, Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich, gefördert durch das BMWi

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.) (2021): Ergebnisse der Waldzustands-erhebung 2020. Bonn, 2021, zuletzt geprüft am 19.04.2021.

BMU 2011 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. Berlin, Oktober 2011.

BMU 2019 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): Klimaschutzprogramm 2030. Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030. Berlin, Berlin, Oktober 2019. Online verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzprogramm_2030_bf.pdf

BMVI (o.J.). Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung - Ziele und Maßnahmen für den Ladeinfrastrukturaufbau bis 2030
Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur.pdf?__blob=publicationFile

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

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2020a). Tabellen zur Landwirtschaft. SJT-3070400-0000.xlsx Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Kulturarten. Online verfügbar unter: <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/tabellen-zur-landwirtschaft/>

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2020b). *Der Statistische Monatsbericht des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft. MBT-0111260-0000 Nährstoffbilanz insgesamt von 1990 bis 2018 - in kg N/ha.* Online verfügbar unter: <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/statistischer-monatsbericht-des-bmel-kapitel-a-landwirtschaft/>

Bui et al. (2018) *Carbon capture and storage (CCS): the way forward* Online verfügbar: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/ee/c7ee02342a>

Chadwick Dearing Oliver, Nedal T. Nassar, Bruce R. Lippke & James B. McCarter (2014) *Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation With Wood and Forests*, *Journal of Sustainable Forestry*, 33:3, 248-275, DOI: 10.1080/10549811.2013.839386

Churkina et al. (2020): Buildings as global carbon sink. *Nature Sustainability*.

DENA (2018). dena-Leitstudie - Integrierte Energiewende Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050 Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena) Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH) Online verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). (2016). *Quantifying Impacts of Consumption Based Charge for Carbon Intensive Materials on Products.* Online available at https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.532381.de/dp1570.pdf

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). (2016). *Quantifying Impacts of Consumption Based Charge for Carbon Intensive Materials on Products.* Online verfügbar unter: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.532381.de/dp1570.pdf

EASAC (2018). European Academies' Science Advisory Council Policy Report 35 - Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? Online verfügbar: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf.

EC (2016): Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2017 Final, 14/06/2016.

EDF (2020). *Impact of COVID-19 on CORSIA.* Presentation by Annie Petsonk, International Counsel; Pedro Piris-Cabezas, Director, Sustainable Int. Transport & Lead Senior Economist; Maggie McCallister, High Meadows Fellow; Environmental Defense Fund 2020 Online available at https://www.edf.org/sites/default/files/documents/COVID_CORSIA_baseline_analysis.pdf; last accessed on 10 September 2020

European Commission (22.10.2014): DIRECTIVE 2014/94/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure. AFID, S. 1–20.

Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (FNR) (2019). Basisdaten Bioenergie Deutschland 2019. Festbrennstoffe, Biokraftstoffe, Biogas.

Online verfügbar unter: https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/basisdaten_bioenergie_2019_web.pdf

Fahisi, M., Efimova, O., Breyer, C. et al. (2019): *Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants*

Online verfügbar: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619307772>

Fh-ISE (2020). Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen.

Fuss et al. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects

Online verfügbar: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f/meta>

FZJ (2019). Forschungszentrum Jülich. Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050

Grewe, V. (2019). *Addressing non-CO₂ effects of aviation. Aviation Decarbonization Forum.* Hosted by: International Coalition for Sustainable Aviation. Montreal, 2019.

Online available at <https://www.icsa-aviation.org/wp-content/uploads/2019/02/Grewe-nonCO2.pdf>, last accessed on 30 Sep 2019.

Hacker et al. (2020). Hacker, Florian; Jöhrens, Julius; Plötz, Patrick (2020): *Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland: Eine Synthese.* Hg. v. Öko-Institut, ifeu und Fraunhofer ISI

Haenel H-D, Rösemann C, Dämmgen U, Döring U, Wulf S, Eurich-Menden B, Freibauer A, Döhler H, Schreiner C, Osterburg B, Fuß R (2020). Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2018: Report on methods and data (RMD) Submission 2020. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 448 p, Thünen Rep 77.

Online verfügbar unter: https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_77.pdf

Hall, Dale; Lutsey, Nic (2019). Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks. Hg. v. ICCT.

IEA (2019). The Future of Hydrogen – Seizing today’s opportunities. Technology report, Juni 2019.

IEAGHG (2019). Towards Zero Emissions CCS in Power Plants Using Higher Capture Rates or Biass.

Online verfügbar: <https://climit.no/wp-content/uploads/sites/4/2019/09/IEAGHG-Report-2019-02-Towards-zero-emissions.pdf>.

ifeu et al. (2018) Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung, im auftrag von Agora Energiewende

IMO (2014). Third IMO GHG Study 2014 Executive Summary and Final Report

Online available at <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>; last accessed on 10 September 2020

Institut der deutschen Wirtschaft (IW Köln). (2019). *Energieintensive Branchen in Europa unter Druck.*

Online verfügbar unter: <https://www.iwkoeln.de/studien/iwkurzberichte/beitrag/hubertusbardtenergiewende-branchenineuropaunterdruck433530.html>

Institut der deutschen Wirtschaft (IW Köln). (2019). *Energieintensive Branchen in Europa unter Druck.*

Online verfügbar unter: <https://www.iwkoeln.de/studien/iwkurzberichte/beitrag/hubertusbardtenergieintensive-brancheneuropaunterdruck433530.html>

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2005). *Carbon Dioxide Capture and Storage.*

Online verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *Climate Change 2007: Synthesis report. Fourth assessment report.* Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2007.

Online available at http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf, last accessed on 3 Sep 2014.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

IWU (2018) Datenerhebung Gebäudebestand 2016, Darmstadt

KBA (2019). Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung (VK)

Online verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_archiv/2019/verkehr_in_kilometern_kurzbericht_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=5

KSPR (2030): Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (Kurzbericht) - Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politiksznarien IX“)“; von Harthan et al.,

Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-05_climate-change_12-2020_treibhausgasminderungswirkungen-klimaschutzprogramm-2030.docx_.pdf

Material Economics (2019). Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.

Matthes et al. 2020 Matthes, Felix Chr.; Arima, Jun; Hennicke, Peter; Löschel, Andreas; Zunker, Gerald (2020): Climate & Energy Policy Targets, Plans and Strategies. The Role of Monitoring and Evaluation Mechanisms. Final Report of a German Japanese Energy Transition Council (GJETC) Working Group. Wuppertal, Tokyo, January 2020. Online verfügbar unter: http://www.gjetc.org/wp-content/uploads/2020/07/GJETC-WG1_Output-Paper_Evaluation-Mechanisms.pdf

MID (2017). *Mobilität in Deutschland – MID – Ergebnisbericht* für eine Studie des SMVI, von Infas, DLR, ivt und infas 360° GmbH

Online verfügbar unter: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf

NPE (2018). Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase

Online verfügbar unter: http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_Fortschrittsbericht_2018_barrierefrei.pdf

NTB (2019) Ausblick auf mögliche Entwicklungen von Wärmepumpen-Anlagen bis 2050, im Auftrag des Bundesamtes für Energie

Oehmichen et al. (2018). Oehmichen, Katja; Klatt, Susanne; Gerber, Kristin; Polley, Heino; Röhling, Stefi; Dunger, Karsten (2018): *Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung.*

Szenarientwicklung, Ergebnisse und Analyse. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Report, 59)

Öko-Institut et al. (2020) *Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (Kurzbericht)* - Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politiksznarien IX“)“; von Harthan et al.,
Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-05_climate-change_12-2020_treibhausgasminderungswirkungen-klimaschutzprogramm-2030.docx_.pdf

Öko-Institut; Agora Energiewende (2020): How to Raise Europe's Climate Ambitions for 2030: Implementing a - 55% Target in EU Policy Architecture. Berlin, September 2020. Online verfügbar unter: https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_07_Raising-EU-Ambition/185_A-AW-EU_Ambition_WEB.pdf

Plötz et al. (2020). Patrick Plötz, Cornelius Moll, Georg Bieker, Peter Mock, Yaoming Li (2020): Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles - Fuel consumption, electric driving and CO2 emissions. ICCT White Paper, September 2020.

Poore, Joseph and Nemecek, Thomas (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 22 Feb 2019: Vol. 363, Issue 6429, eaaw9908. DOI: 10.1126/science.aaw9908

Prognos et al. (2020) Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050, Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030, im Auftrag des BMWi

Prognos/EWI 2010+2011 Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI); Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforshung mbH (GWS) (2010): Studie Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Basel, Köln, Osnabrück, 27. August 2010. Online verfügbar unter: https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/100827_Prognos_Studie__Energieszenarien_fuer_ein_energiekonzept_der_Bundesregierung.pdf

Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI); 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

Reichelt (2015). Reichelt F (2015): Evaluierung des GEST-Modells zur Abschätzung der Treibhausgasemissionen aus Mooren. Masterarbeit. Universität Greifswald.

Rutkowsky (2020). *Geschäftsreise-Einbruch lässt Luftverkehr nach Corona nur langsam wachsen* – Gastbeitrag von Dr. Sven Rutkowsky vom 24. April 2020 in airliners.de
Online verfügbar unter: <https://www.airliners.de/geschaeftsreisen-corona-auswirkungen-gastbeitrag/55011>

Schneider, C. & Saurat, M. (2020). Simulating geographically distributed production networks of a climate neutral European petrochemical industry. Paper accepted for presentation at ECEEE 2020 conference.

Schneider, C. et al. (2019): Klimaneutrale Industrie: Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Analyse im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin, November 2019.

Stripple et al. (2018): CO2 uptake in cement-containing products – Background and calculation models for IPCC implementation. IVL Swedish Environmental Research Institute.

UBA (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. UBA-FB 000969, Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg

UBA (2019a). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE* – Studie, von Porr et al., veröffentlicht als CLIMATE CHANGE 36/2019

Online unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf; last accessed on 22 July 2020

UBA (2019b). *Umweltschonender Luftverkehr, lokal-national-international* (UBA Texte, 130/2019). UBA. Dessau-Roßlau, 2019.

Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltschonender-luftverkehrhttps://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-06_texte-130-2019_umweltschonender_luftverkehr_0.pdf, last accessed on 22 Apr 2020

UBA (2020). Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland

<https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent>

Umweltbundesamt (UBA) (2020): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2018.

Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_22-2020_nir_2020_de_0.pdf

UNFCCC (2020) Reporting Requirements

Online verfügbar: <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/reporting-requirements>

VCI (2019). Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI.

Willett, W.; Rockström, J.; Loken, B. et al. (2019)

Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*. 2019; (published online Jan 16.)

Online available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik (2018): *Erhöhung der stofflichen Nutzung von Holz in Gebäuden im Einklang mit der Rohstoffverfügbarkeit.* Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirates Waldpolitik

World Energy Outlook (2019) World Energy Outlook – Sustainable Development Scenario

Online verfügbar: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>

Zimmer et al. (2016). Zimmer, Wiebke; Blanck, Ruth; Bergmann, Thomas; Mottschall, Moritz; Waldenfels, Rut von; Förster, Hannah et al. (2016): *Endbericht Renewability III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors.* Studie im Auftrag des BMUB 2016. Öko-Institut; DLR; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU); Infrac

Online available at http://www.renewability.de/wp-content/uploads/ Renewability_III_Endbericht.pdf

Impressum

Klimaneutrales Deutschland 2045

Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann

Erstellt im Auftrag von

Stiftung Klimaneutralität
www.stiftung-klima.de
info@stiftung-klima.de
Friedrichstr. 140 | 10117 Berlin
T +49 (0)30 62939 4639

Agora Energiewende
www.agora-energiewende.de
info@agora-energiewende.de

Agora Verkehrswende
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129

Technischer Steuerungskreis:

Stiftung Klimaneutralität
Rainer Baake, Dr. Julia Metz, Simon Müller, Martin Weiß

Agora Energiewende
Dr. Patrick Graichen, Dr. Matthias Deutsch,
Alexandra Langenheld, Frank Peter, Philipp D. Hauser,
Fabian Hein, Mara Marthe Kleiner, Thorsten Lenck,
Georg Thomaßen, Wido K. Witecka

Agora Verkehrswende
Dr. Carl-Friedrich Elmer, Christian Hochfeld,
Dr. Günter Hörmandinger, Dr. Urs Maier

Bearbeitet von

Prognos AG
Goethestr. 85 | 10623 Berlin
Hans Dambeck, Florian Ess, Hanno Falkenberg, Dr.
Andreas Kemmler, Dr. Almut Kirchner, Sven Kreidelmeyer,
Marcus Koepf, Sebastian Lübbers, Dr. Alexander Piégsa,
Sina Scheffer, Dr. Thorsten Spillmann, Nils Thamling, Au-
rel Wunsch, Marco Wunsch, Inka Ziegenhagen

Öko-Institut e. V.
Borkumstraße 2 | 13189 Berlin
Dr. Wiebke Zimmer, Ruth Blanck, Dr. Hannes Böttcher,
Wolf Kristian Görz, Dr. Klaus Hennenberg, Dr. Felix Chr.
Matthes, Margarethe Scheffler, Kirsten Wiegmann

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19 | 42103 Wuppertal
Clemens Schneider, Dr. Georg Holtz, Mathieu Saurat,
Annika Tönjes, Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer

Prognos war in dieser Studie federführend für die über-
greifende Ausgestaltung der Szenarien und die inhaltliche
Gesamtprojektleitung. Darüber hinaus verantwortete
Prognos die Sektoren Gebäude und Energiewirtschaft.
Das Öko-Institut war zuständig für Verkehr, Landwirt-
schaft, Abfall und LULUCF und die Herleitung der Emissi-
onsminderungsziele. Das Wuppertal Institut bearbeitete
den Sektor Industrie.

Projektleitung
Martin Weiß | martin.weiss@stiftung-klima.de
Marco Wunsch | marco.wuensch@prognos.com
Inka Ziegenhagen | inka.ziegenhagen@prognos.com

Satz und Layout: Prognos AG
Grafikdesign: Urs Karcher, Agora Energiewende
Titelbild: iStock - imamember
Stand: Juni 2021 Version 1.0
Copyright: 2021, Prognos AG

Alle Inhalte dieses Werkes, insbesondere Texte, Abbildungen und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei der Prognos AG. Jede Art der Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen Zugänglichmachung oder andere Nutzung bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Zustimmung der Prognos AG.

Zitate im Sinne von § 51 UrhG sollen mit folgender Quellenangabe versehen sein: Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann, Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.