



Stiftung
Klimaneutralität

Agora
Energiewende



Agora
Verkehrswende



Klimaneutrales Deutschland 2045

Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann

ZUSAMMENFASSUNG



IMPRESSUM

ZUSAMMENFASSUNG

Klimaneutrales Deutschland 2045
Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050
erreichen kann

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

ERSTELLT DURCH

Prognos AG

Goethestr. 85 | 10623 Berlin
Hans Dambeck, Florian Ess, Hanno Falkenberg,
Dr. Andreas Kemmler, Dr. Almut Kirchner,
Sven Kreidelmeyer, Marcus Koepp, Sebastian Lübbers,
Dr. Alexander Piégsa, Sina Scheffer, Dr. Thorsten Spillmann,
Nils Thamling, Aurel 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 Lechtenböhmer

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, Landwirtschaft,
Abfall und LULUCF und die Herleitung der Emissionsminder-
ungsziele. Das Wuppertal Institut bearbeitete den Sektor
Industrie.

Satz: RadiCon | Belrin, Kerstin Conradi
Satzkoordination: Ada Rühring | Agora Energiewende
Korrektorat: infotext
Titelbild: cherezoff | Shutterstock

209/01-ES-2021/DE | 57-2021-DE

Version 1.3, Mai 2021

PROJEKMLEITUNG

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

TECHNISCHER STEUERUNGSKREIS

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

Stiftung Klimaneutralität

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

DANKSAGUNG

Erst das Engagement vieler weiterer Kolleginnen und Kollegen
hat diese Studie möglich gemacht. Für die tatkräftige Unterstüt-
zung bedanken möchten wir uns daher bei Nikola Bock, Janne
Görlach, Steffi Niemiok und Dr. Philipp Prein.



Unter diesem QR-Code steht diese
Publikation als PDF zum Download
zur Verfügung.

Bitte zitieren als:

*Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021):
Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele
schon vor 2050 erreichen kann
Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität,
Agora Energiewende und Agora Verkehrswende*

www.agora-energiewende.de

Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

das Rennen ist eröffnet. Mit dem Start der Biden-Administration haben nun die größten Treibhausgasemittenten der Welt – China, USA und die EU – Klimaneutralität im Fokus. Der klare Kurswechsel in den Vereinigten Staaten verdeutlicht die beschleunigte Dynamik. So will die neue US-Regierung schon 2035 ein CO₂-freies Stromsystem. Klimapolitik durchzieht mit einer nie dagewesenen Stringenz das Regierungshandeln der USA.

Gleichzeitig ist klar: Der Weg zur Klimaneutralität ist ein Rennen gegen die Zeit. Inzwischen sind häufige Extremwetterlagen von einer bedrohlichen Prognose zur bedrückenden Realität geworden, die in dramatischem Ausmaß wirtschaftliche Schäden und menschliches Leid hervorrufen.

Daher liegt die Frage auf der Hand, ob wir beim Klimaschutz schneller werden können. Wie können wir Klimaneutralität noch deutlich vor 2050 erreichen? Genau hierauf gibt diese Studie eine Antwort. Die Vorgängerstudie *Klimaneutrales Deutschland 2050* beschreibt, wie das vom Bundestag beschlossene Ziel bis Mitte des Jahrhunderts erreicht werden kann. Mit der nun vorliegenden Studie zeigen wir, dass Klimaneutralität auch schon 2045 möglich ist. Dies reduziert die insgesamt freigesetzten Treibhausgasemissionen noch einmal deutlich.

Die grundsätzlichen Prämissen der 2050-Studie gelten weiterhin: Der Pfad ist realistisch, das Ziel wird innerhalb der üblichen Investitions- und Lebenszyklen sowie unter Wahrung von Wirtschaftlichkeit und gesellschaftlicher Akzeptanz erreicht. Wesentliche Hebel für eine zusätzliche Beschleunigung sind ein schnellerer Ausbau der Erneuerbaren, ein zügigerer Wasserstoff-Hochlauf, eine beschleunigte Elektrifizierung im Verkehr, eine weitere Verstärkung der Gebäudesanierungen sowie größere Marktanteile von pflanzlichen anstelle von tierischen Eiweißprodukten in der Zeit nach 2030.

Die Antwort auf die Frage, ob wir vor 2050 Klimaneutralität erreichen können, ist ein klares „Ja“. Deutschland hätte dadurch erst recht die Chance, in der weltweiten Dynamik hin zur Klimaneutralität zum Leitmarkt und Leitanbieter für Klimaschutztechnologien zu werden. Ob wir bereits 2045 klimaneutral sein werden, ist letztlich eine Frage unseres gemeinsamen politischen Willens und unserer Gestaltungskraft als Gesellschaft.

Wir wünschen eine angenehme Lektüre!

Rainer Baake, *Direktor, Stiftung Klimaneutralität*
Dr. Patrick Graichen, *Direktor, Agora Energiewende*
Christian Hochfeld, *Direktor, Agora Verkehrswende*

Ergebnisse auf einen Blick:

1

Ein klimaneutrales Deutschland ist bereits bis 2045 möglich. Im Vergleich zum Zieljahr 2050 spart das der Atmosphäre knapp eine Milliarde Tonnen CO₂. Mit einem solchen Ziel würde Deutschland wieder zu einem internationalen Vorreiter beim Klimaschutz und zu einem Leitmarkt und Leitanbieter für Klimaschutztechnologien.

2

Ein Minderungsziel von 65 Prozent bis 2030 ist als Meilenstein auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 geeignet und schafft die Voraussetzungen für eine beschleunigte Transformation nach 2030.

3

Klimaneutralität 2045 bedeutet gegenüber einem Zieljahr 2050 mehr Tempo im Strukturwandel. Beim Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE), bei der klimaneutralen Industrie und beim Umstieg auf Wärmepumpen und Elektromobilität wird nach 2030 die Transformation beschleunigt. Zudem werden die Agrarwende und der Einsatz von CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) vorgezogen.

Inhalt

Einleitung	7
1 Zusammenfassung	11
Ambitionierte Klimapolitik bis 2030 ist Voraussetzung für Klimaneutralität bis 2045	11
Bereits 2045 klimaneutral – wie wir schneller 95 Prozent Minderung der Emissionen erreichen	13
Nicht vermeidbare Restemissionen ausgleichen – Kompensation mit CCS und Negativemissionen	19
Drei Hebel der Beschleunigung: Hebel 1 – Energieeffizienz und Senkung des Energiebedarfs	21
Drei Hebel der Beschleunigung: Hebel 2 – erneuerbare Stromerzeugung und Elektrifizierung	22
Drei Hebel der Beschleunigung: Hebel 3 – Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff	25

Einleitung

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 hätte 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. 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-Negativemissionen 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 Milchalternativen 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*

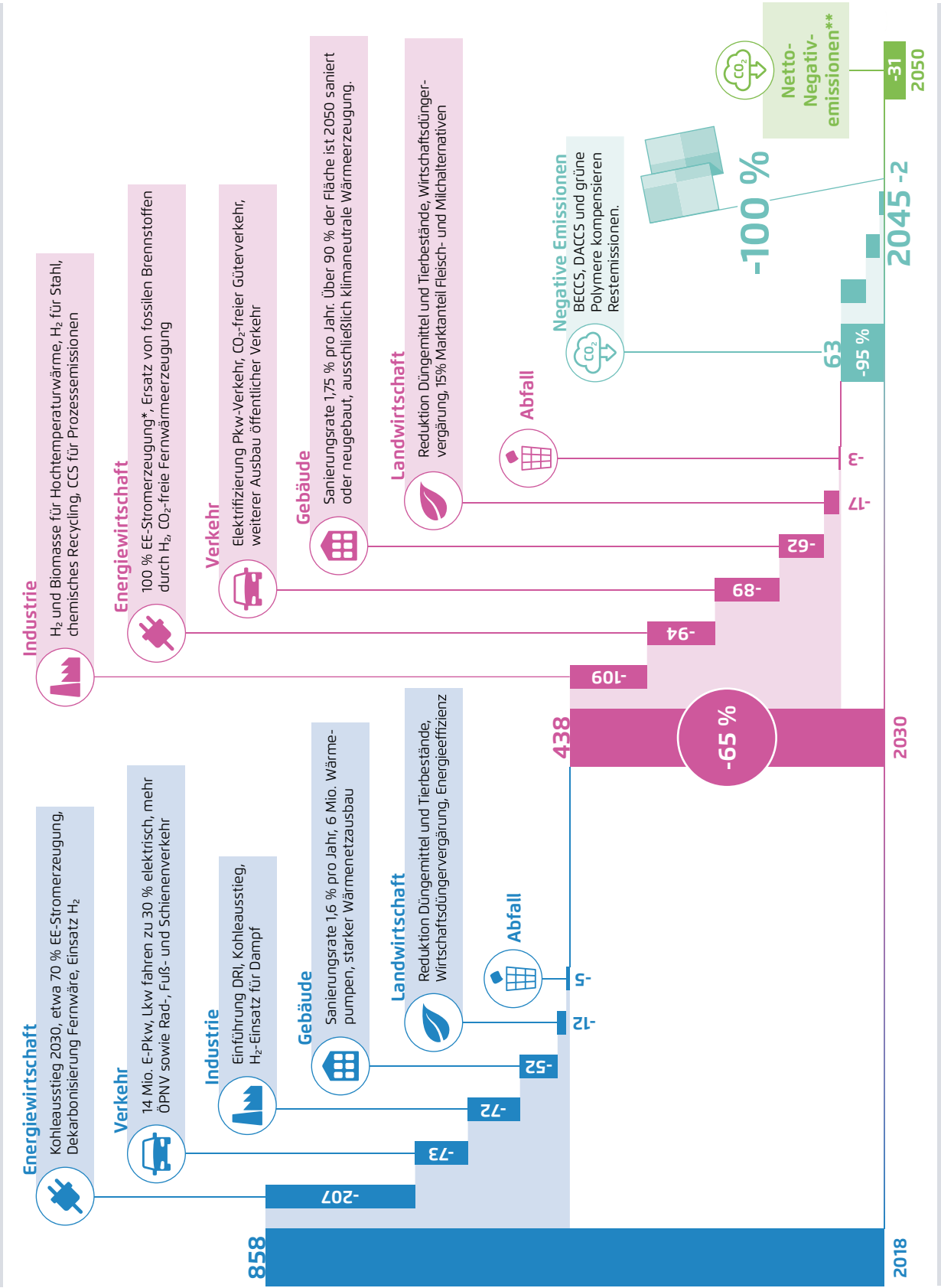
nochmals im Hinblick auf die für den Zeitraum nach 2030 vorgesehene schnellere Umsetzung überprüft und bewertet. Für die Auswahl der notwendigen Maßnahmen zur Zielerreichung im Szenario *Klimaneutrales Deutschland 2045* ist das Hauptkriterium nach wie vor die Wirtschaftlichkeit. Maßnahmen mit geringeren 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 wirt-

schaftlichen 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.

Maßnahmen im Szenario Klimaneutral 2045 (KN2045)
(Treibhausgas-Emissionen in Mio. t CO₂-Äq.)

Abbildung ES



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)

1 Zusammenfassung

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 1990 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.

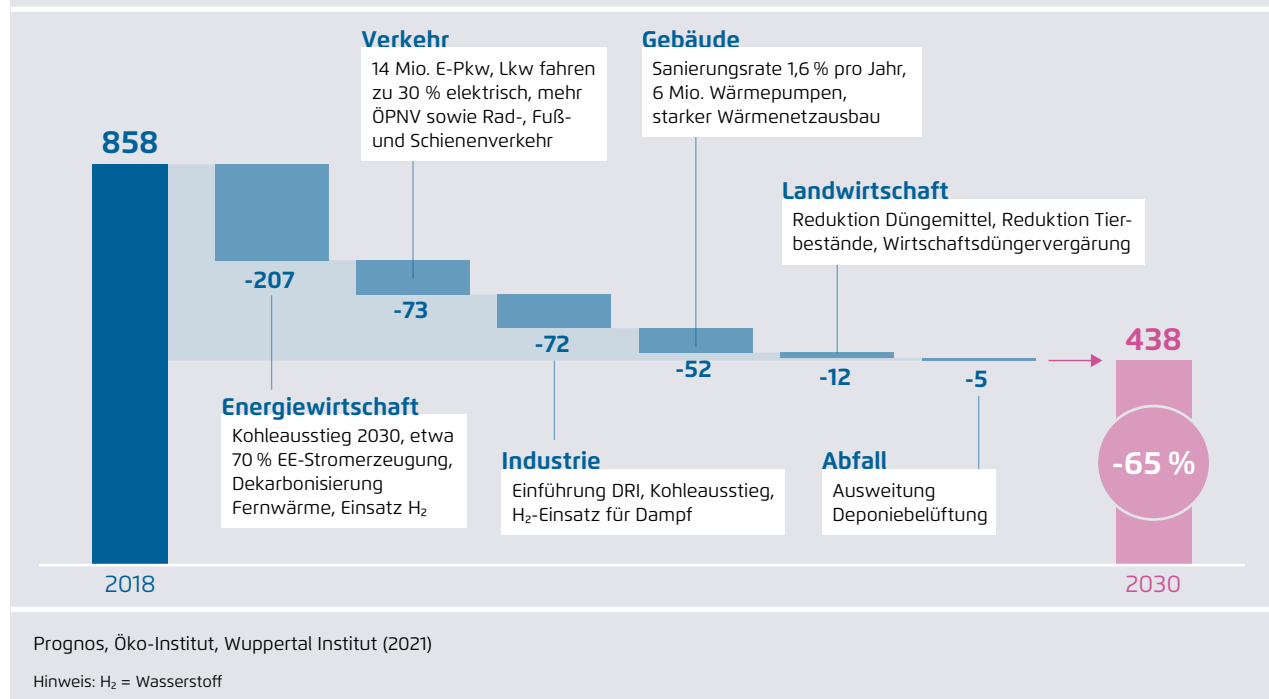
Wie in der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2050* bereits beschrieben, bietet das bestehende Klimaschutzgesetz eine gute Basis für zusätzliche Emissionseinsparungen, es muss allerdings zur Erreichung

des 65-Prozent-Ziels deutlich weiterentwickelt werden. Entsprechend den Berechnungen in der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2050* ist ein zusätzlicher Beitrag in den Bereichen Landwirtschaft und Abfall kaum möglich, auch im Verkehr und Gebäudesektor wurden jeweils lediglich 5 Millionen Tonnen CO₂-Äq (CO₂-Äquivalente) zusätzliche Minderung als möglich erachtet. Größere zusätzliche Einsparungen mit 17 Millionen Tonnen CO₂-Äq beziehungsweise 77 Millionen Tonnen CO₂-Äq sind demnach in der Industrie und der Energiewirtschaft möglich.

Insgesamt können mit den im Folgenden aufgeführten Maßnahmen, die über das bestehende Klimaschutzgesetz hinausgehen, im Zeitraum von 2018 bis 2030 in Deutschland 420 Millionen Tonnen CO₂-Äq vermieden werden.

Drei Schritte zur Klimaneutralität: Schritt 1 – 65 Prozent Minderung bis 2030
(Treibhausgas-Emissionen in Mio. t CO₂-Äq)

Abbildung 1



Bis zum Jahr 2030 können die Emissionen in der **Energiewirtschaft** um 207 Millionen Tonnen CO₂-Äq gesenkt werden. Gegenüber dem Sektorziel des Klimaschutzgesetzes beträgt die zusätzliche Einsparung 77 Millionen Tonnen CO₂-Äq. 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 einer Verschärfung des EU-Minderungsziels auf 55 Prozent und einer Anpassung des EU ETS (EU-Emissionshandel) 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 es 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 (inklusive Plug-in-Hybride) im Bestand sein. Güter werden verstärkt auf der Schiene transportiert und es wird fast ein Drittel der Fahrleistung im Straßen-güterverkehr 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.

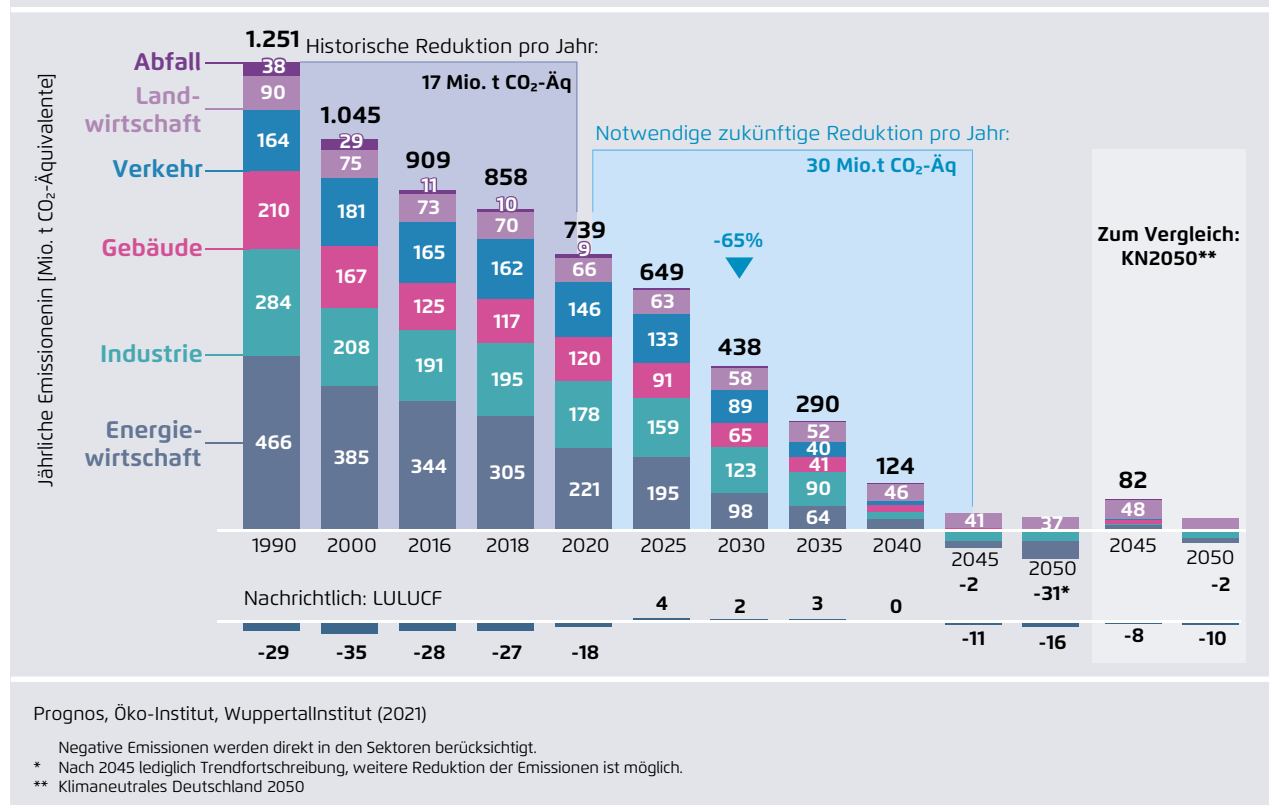
Im **Abfallbereich** sinken zwischen 2018 und 2030 die Methanemissionen aus der Deponierung. Mit der Ausweitung der Maßnahmen zur Deponiebelüftung wird die Reduktion der Methanemissionen weiter beschleunigt. In den anderen Bereichen des Abfallsektors besteht bis 2030 nur ein geringes Reduktionspotenzial.

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-Einsparungen 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.

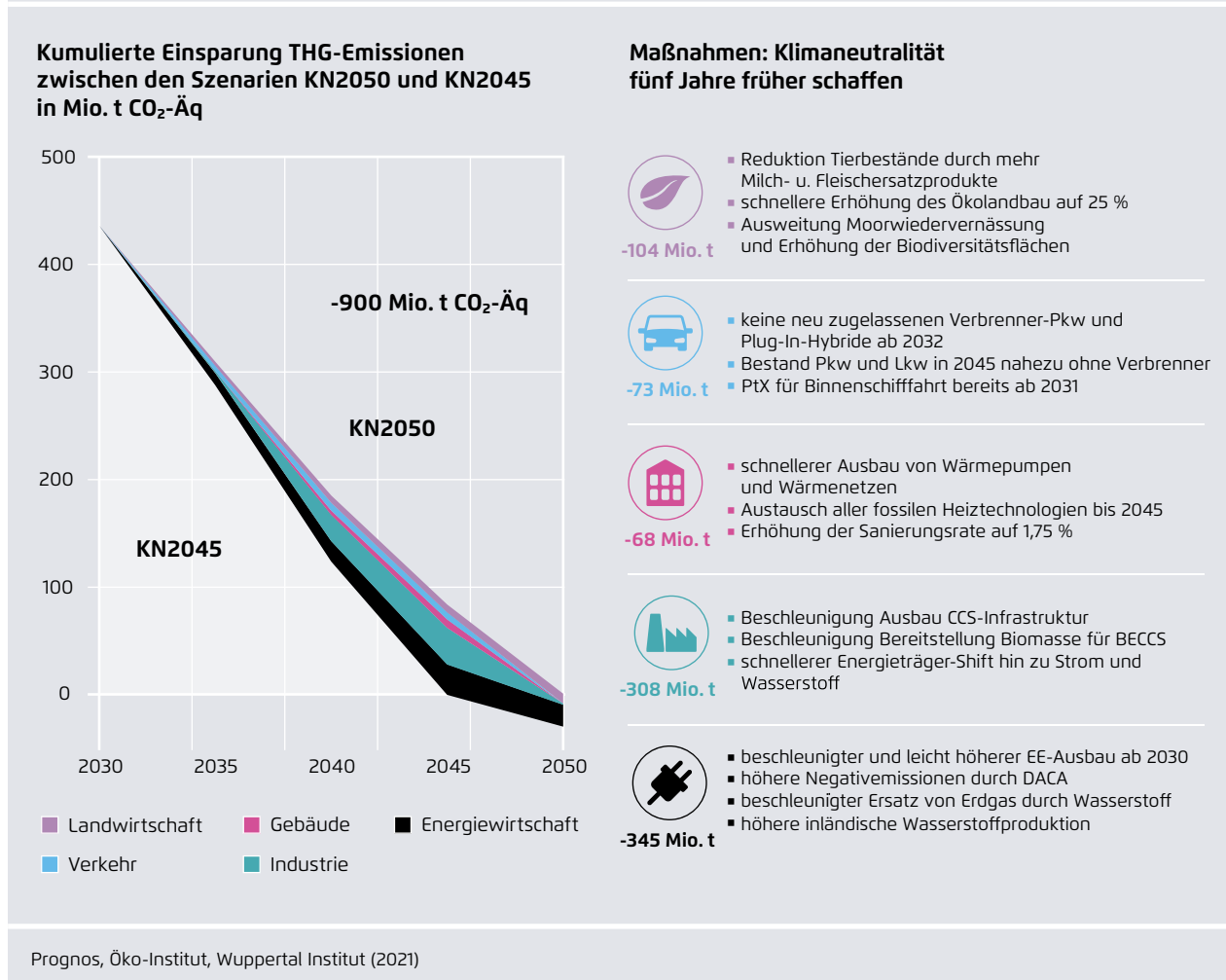
Überblick Entwicklung THG-Emissionen nach Sektoren

Abbildung 2



Zusätzliche Treibhausgaseinsparungen und Maßnahmen nach Sektoren

Abbildung 3



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

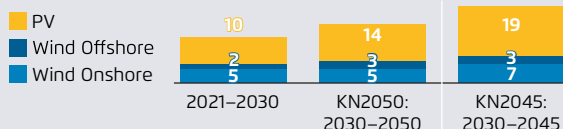
Zeitraum erzeugt auf der anderen Seite zusätzlichen Druck auf die für die Emissionsminderung in allen Bereichen notwendigen Effizienzverbesserungen. Allerdings können Effizienzmaßnahmen nur mit größerem Aufwand beschleunigt werden als angebotsseitige Maßnahmen. Dies führt dazu, dass die Stromnachfrage 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).

Umsetzungsgeschwindigkeit in den Szenarien KN2050 und KN2045

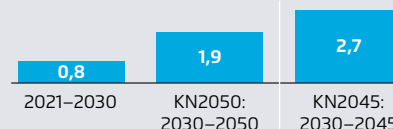
Abbildung 4

Energiewirtschaft**Erneuerbare Energien**

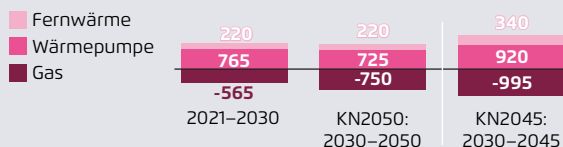
Mittlerer Bruttozubau pro Jahr in GW

**Wasserelektrolyseure**

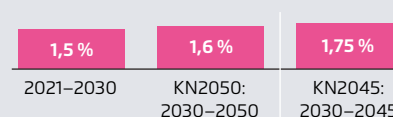
Mittlerer Bruttozubau pro Jahr in GW

**Gebäude****Wärmeversorgung Gebäude**

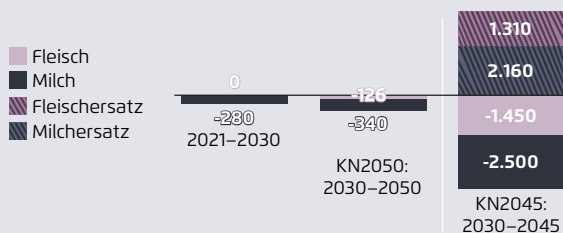
angeschlossene Wohnungen pro Jahr in 1.000 Stück

**Gebäudesanierung**

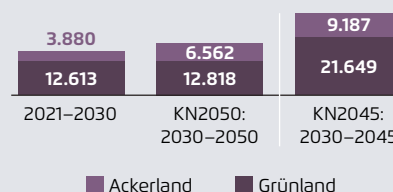
Mittlere Sanierungsrate pro Jahr

**Landwirtschaft und LULUCF****Fleisch- und Milchkonsum**

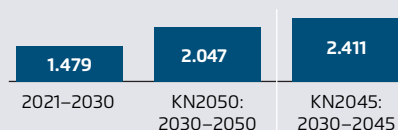
Mittlere Veränderung in kcal/Person/Jahr*

**Wiederherstellung Moore**

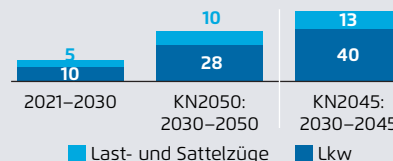
Mittlere Vernässungsrate pro Jahr in ha

**Verkehr****Neuzulassungen E-Pkw**

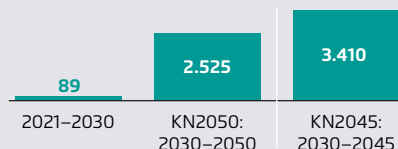
Mittlere Anzahl pro Jahr in 1.000 Fahrzeugen

**Bestand E- und H₂-Nutzfahrzeuge**

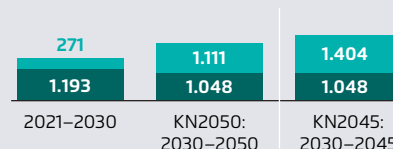
Mittlerer Zuwachs pro Jahr in 1.000 Fahrzeugen

**Industrie****CO₂-Abscheideleistung**

Mittlerer Zuwachs pro Jahr in 1.000 Jahrestonnen

**Zement und Stahl**

Mittlere Umstellung pro Jahr in 1.000 Jahrestonnen Kapazität



Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021)

* Heute werden etwa 900 kcal pro Person und Tag über Fleisch- und Milchprodukte aufgenommen. Im Jahr 2045 liegt der Anteil der Ersatzprodukte bei 15 % des Fleisch- und Milchkonsums.
Der Zeitraum 2030 – 2050 bezieht sich auf das Vergleichsszenario KN2050, Klimaneutrales Deutschland 2050

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 wächst von 2030 bis 2045 vor allem durch die weitere Elektrifizierung sowie die steigende Herstellung von Wasserstoff um 60 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 Windenergie an Land ist im Jahr 2045 eine Erzeugungskapazität von 145 Gigawatt erforderlich, und der Ausbau von Windenergie 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 Windenergie auf See mit ihren langen Planungszeiträumen stellt diese Beschleunigung eine große Herausforderung dar. Bei Windenergie 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 fallen 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. Da 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 Wohnungen, nämlich 920.000, 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 gegenüber dem 2050-Szenario betreffen vor allem die Geschwindigkeit bei der Elektrifizierung.

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 Straßen-güterverkehr 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), sodass 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.

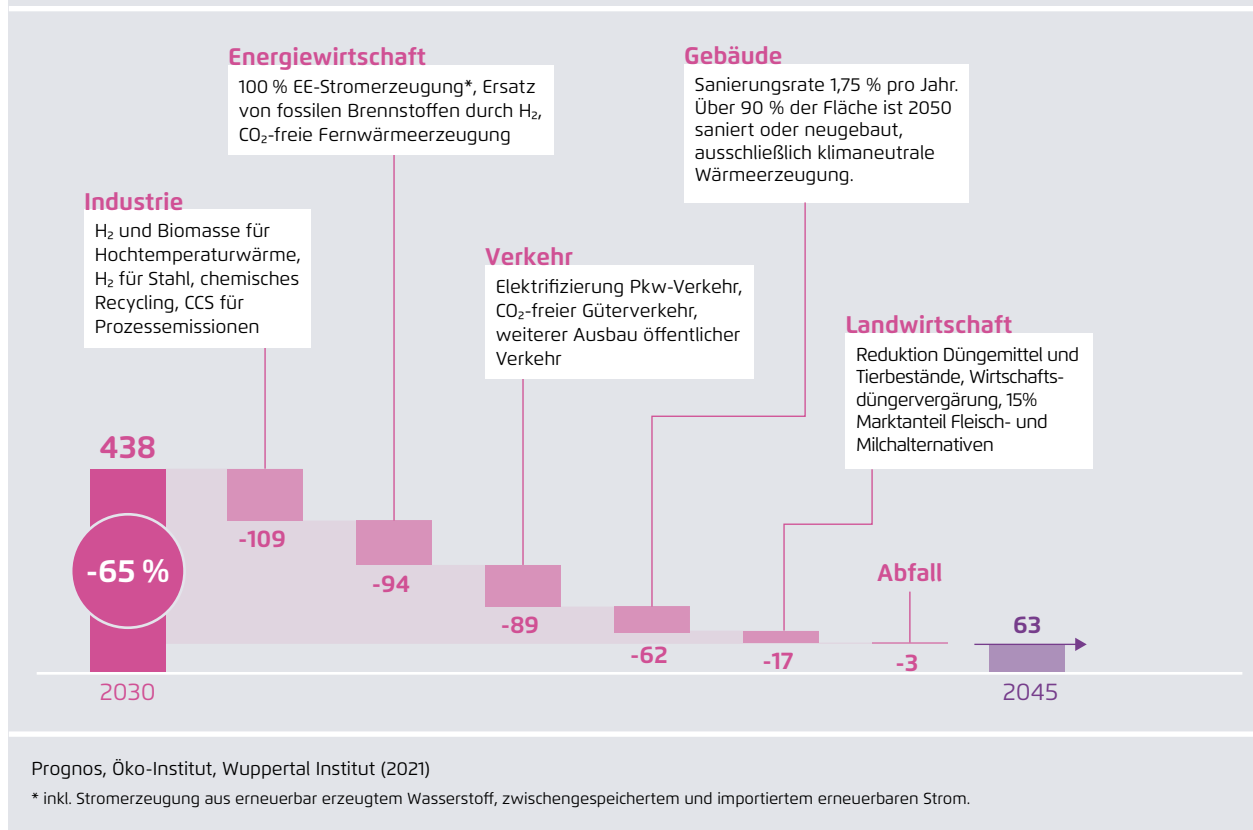
Im Bereich der landwirtschaftlichen Böden ist das wesentliche Reduktionspotenzial bereits bis 2030 erschlossen. Allerdings ergeben sich nach 2030 gegenüber dem Szenario *Klimaneutrales Deutschland 2050* noch weitere Minderungseffekte im Bereich der Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Für die Treibhausgasneutralität bereits im Jahr 2045 müssen die Minderungsmaßnahmen früher beziehungsweise 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.

Schritt 2 – 95 Prozent Minderung ohne Negativemissionen (Treibhausgas-Emissionen in Mio. t CO₂-Äq)

Abbildung 5



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 im Szenario 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: Die Grundstoffe „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

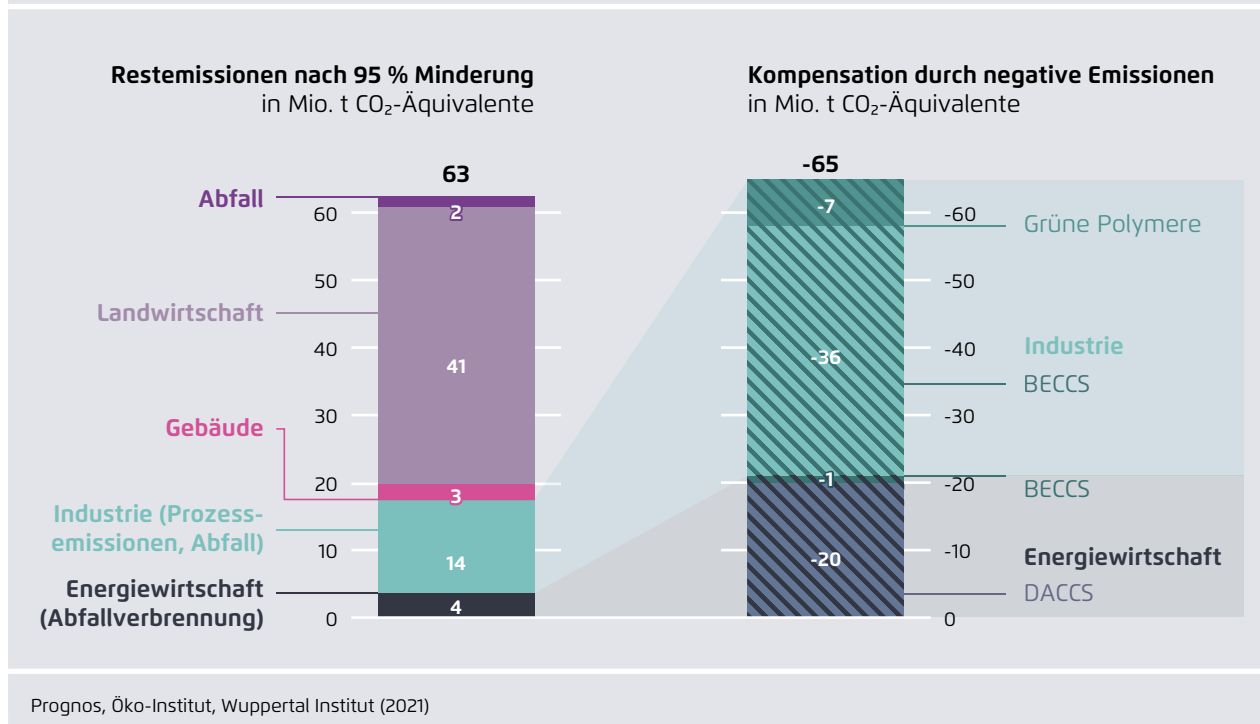
kann so die Emission des vorher aus der Atmosphäre gebundenen Kohlenstoffs vermieden werden.

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, 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 minus 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.

Schritt 3 im Detail – residuale THG-Emissionen und deren Kompensation in 2045

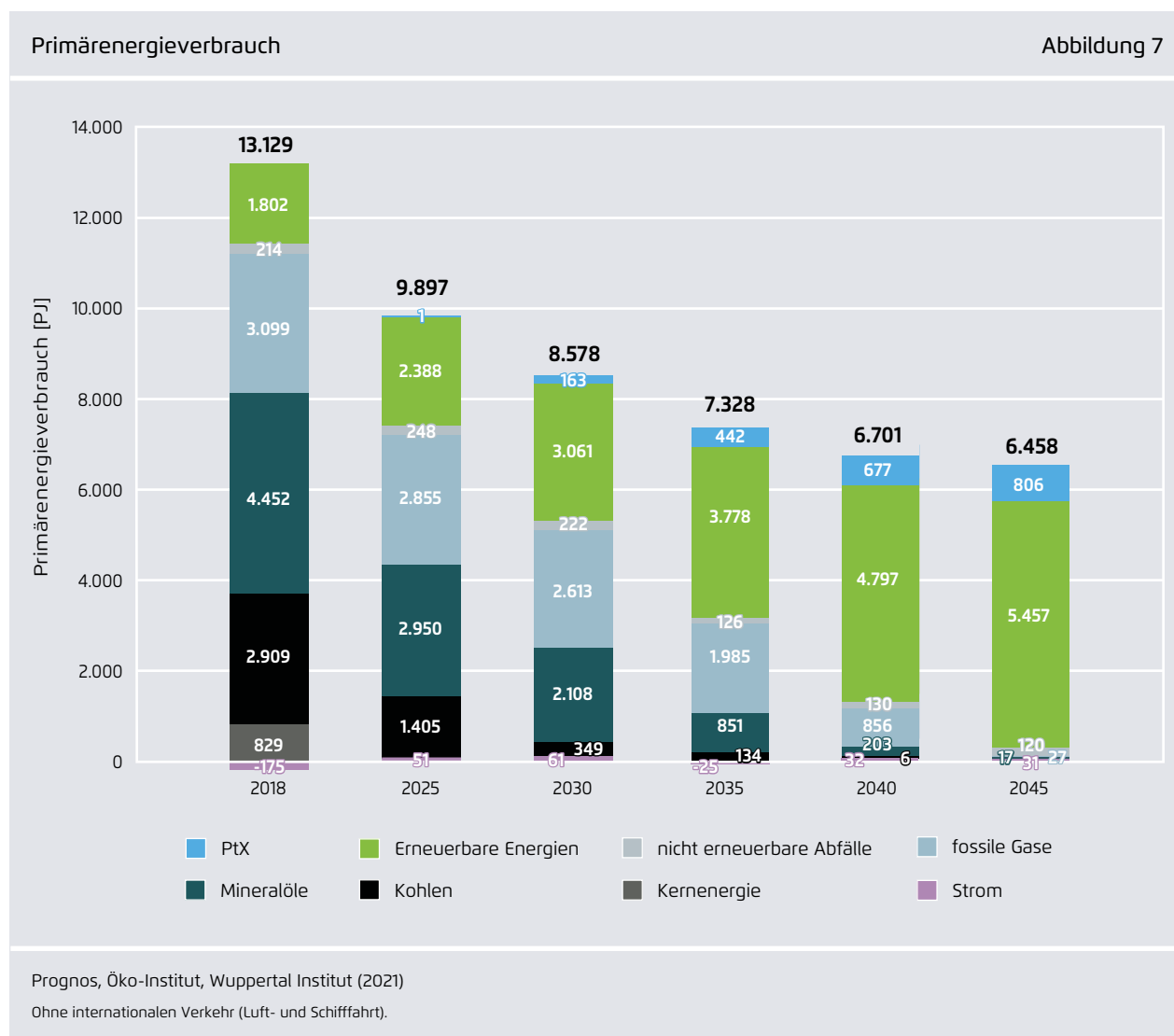
Abbildung 6



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 minus 11 Millionen Tonnen CO₂-Äq erreicht, die sich bis 2050 auf einen Wert von minus 16 Millionen Tonnen CO₂-Äq vergrößert. Allerdings kann das aktuelle Niveau der Senke von minus 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 Petajoule 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 zugrunde gelegt wurde, zeigen sich die entscheidenden Unterschiede erst nach 2030.

Zwischen 2030 und 2045 geht der Endenergieverbrauch in den aktuellen Berechnungen von 7.500 Petajoule um ein weiteres Viertel auf 5.750 Petajoule 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 Wasserstoff und weiteren 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.

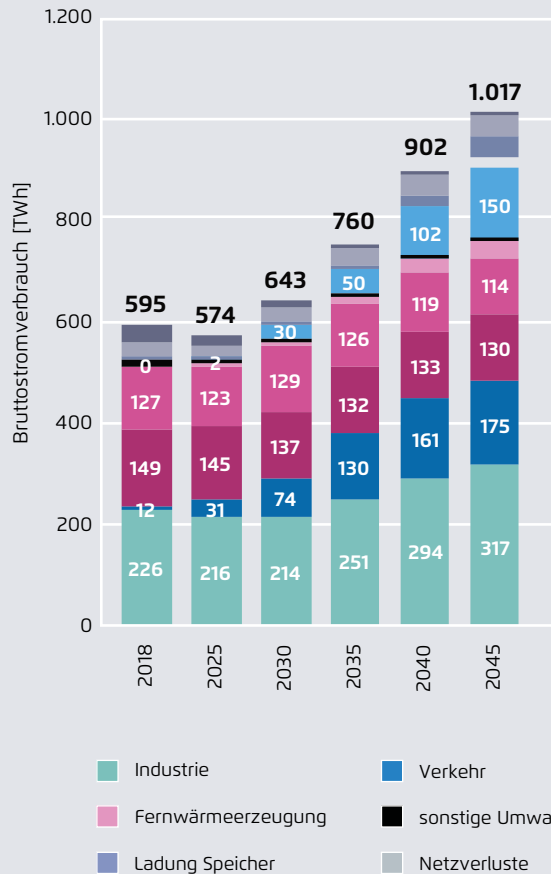
Im Vergleich zum Szenario *Klimaneutrales Deutschland 2050* steigen die Elektrifizierung und die Produktion von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff schneller, fossile Brennstoffe werden früher ersetzt. Elektrifizierung und Wasserstoffproduktion sind auch die Haupttreiber für den deutlicheren Anstieg des 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 Erneuer-

Bruttostromverbrauch

Abbildung 8

H₂/CO₂

2030

Produktion 19 TWh H₂

2045

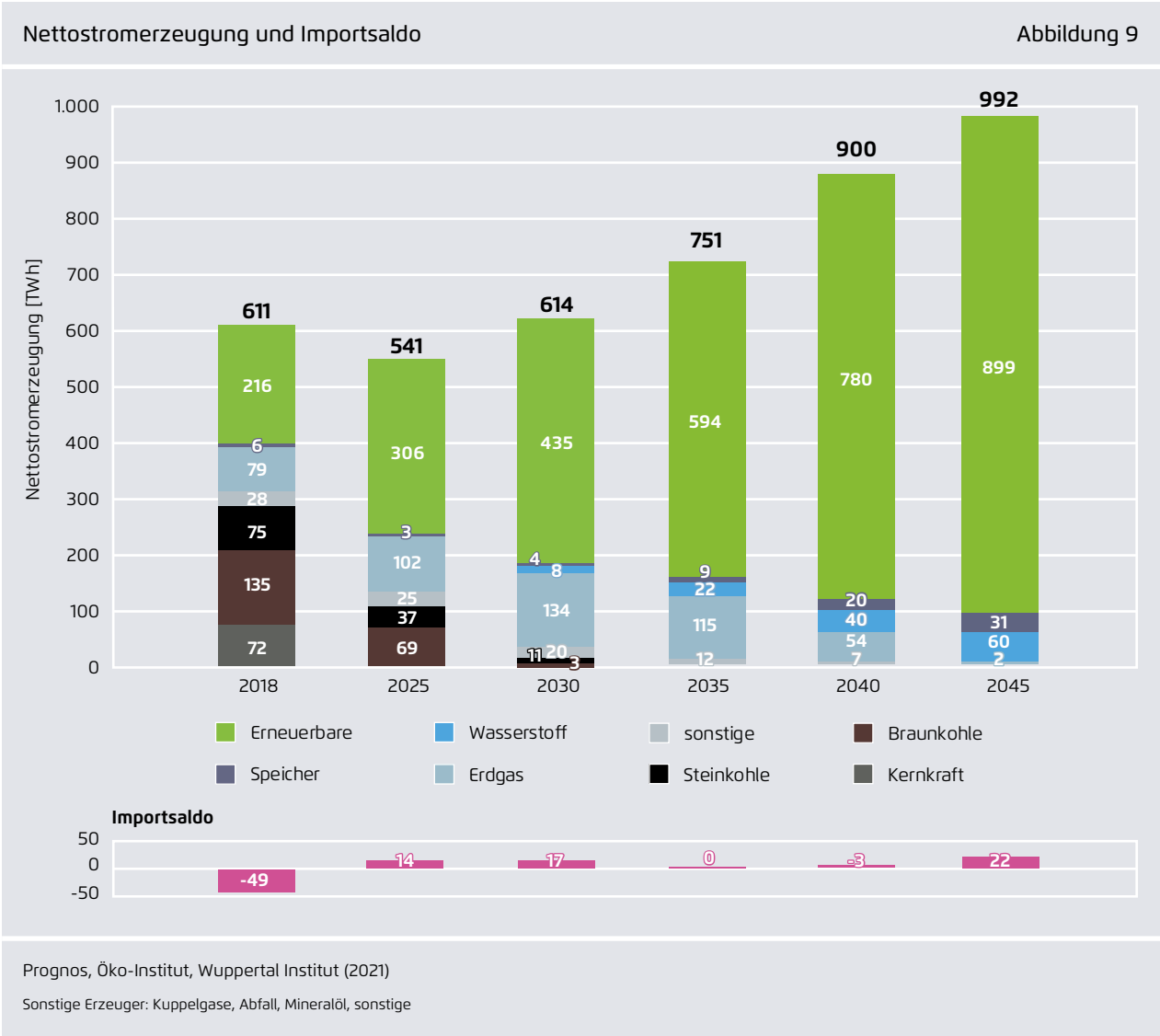
96 TWh H₂,
20 Mio. t CO₂ DAC5,6 Mio. Wärmepumpen,
effiziente Elektrogeräte,
effiziente Beleuchtung,
Rückgang Direktstrom-
heizungen14 Mio. Wärme-
pumpen, Zunahme
bei Kühlen und Lüften,
Effizienz Wärme-
pumpen, Rückgang
Direktstromheizungen,
effiziente ElektrogeräteWärmepumpen,
effiziente BeleuchtungWärmepumpen,
effiziente Beleuchtung25% der Fahrleistung im
Straßengüterverkehr
mit Batterien und Ober-
leitungen, 14 Mio. E-Pkw80% der Fahrleistung
im Straßengüterverkehr
mit Batterien und Ober-
leitungen, 36 Mio. E-PkwElektrifizierung
Prozesswärme, strom-
basierte Dampfproduktion,
effiziente Querschnitts-
technologienElektrifizierung Prozess-
wärme, CO₂-Abscheidung,
strombasierte Dampf-
produktion in Elektro-
kesseln und Hochtem-
peraturwärmepumpen

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021)

KW = Kraftwerk. DAC = Direct Air Capture. PHH = Private Haushalte. GHD = Gewerbe, Handel, Dienstleistungen.
Verbrauch von Speichern (brutto) beinhaltet Pumpspeicher und stationäre Batteriespeicher in der öffentlichen Versorgung.
Der Stromverbrauch von Heimbatterien in Kombination mit PV-Systemen wird hier nicht berücksichtigt.

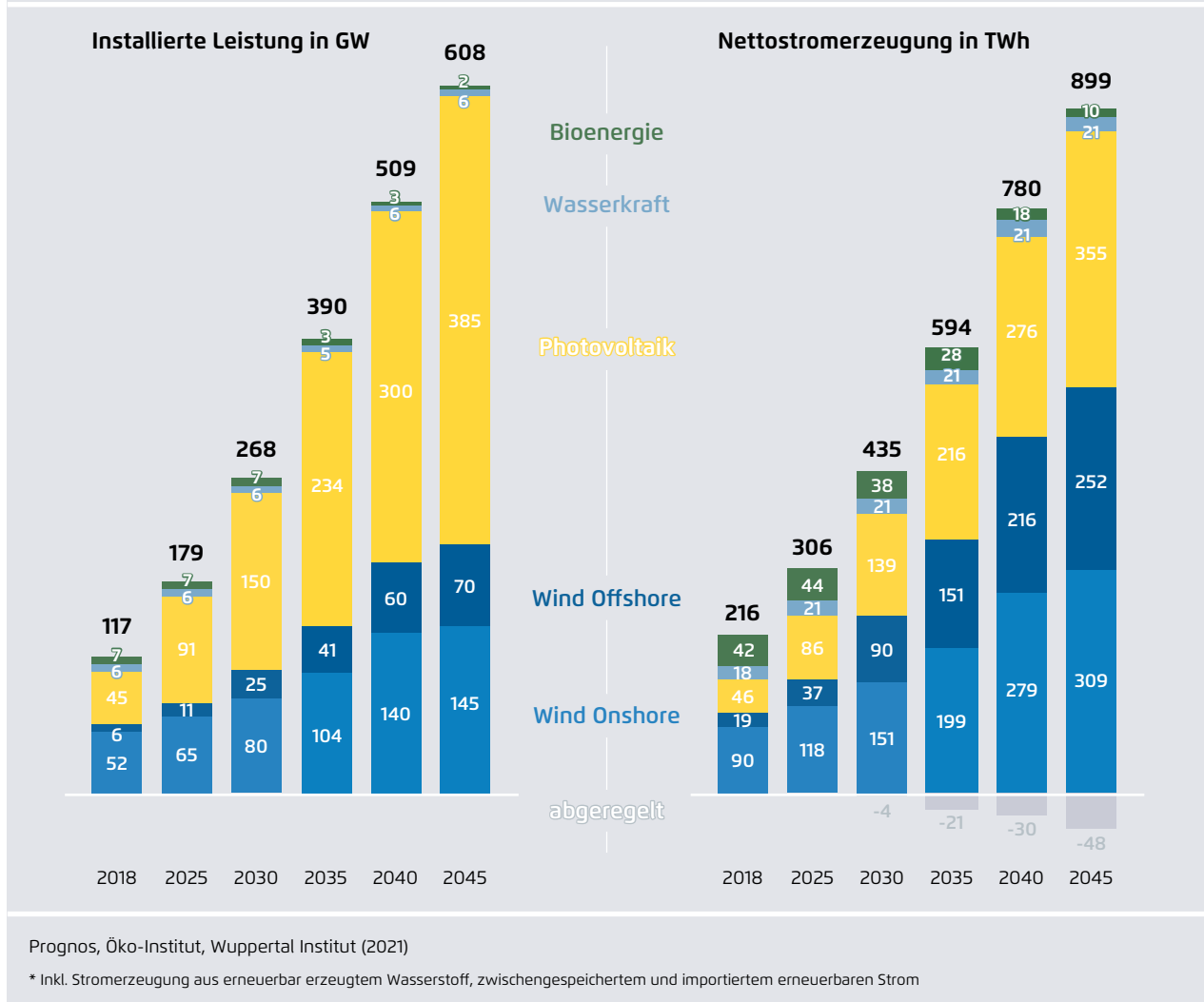
erbaren Energien erzeugten Wasserstoff als Brennstoff nutzen. Die restlichen 5 Prozent werden durch zwischengespeicherten oder importierten Strom gedeckt. Das Stromsystem wird bis zum Jahr 2045 sehr flexibel und kann auch bei hohen fluktuierenden Anteilen effizient genutzt werden. Dies wird einerseits 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.

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 und somit im Winter mehr Strom zur Verfügung gestellt werden.



Erneuerbare Energien

Abbildung 10



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.

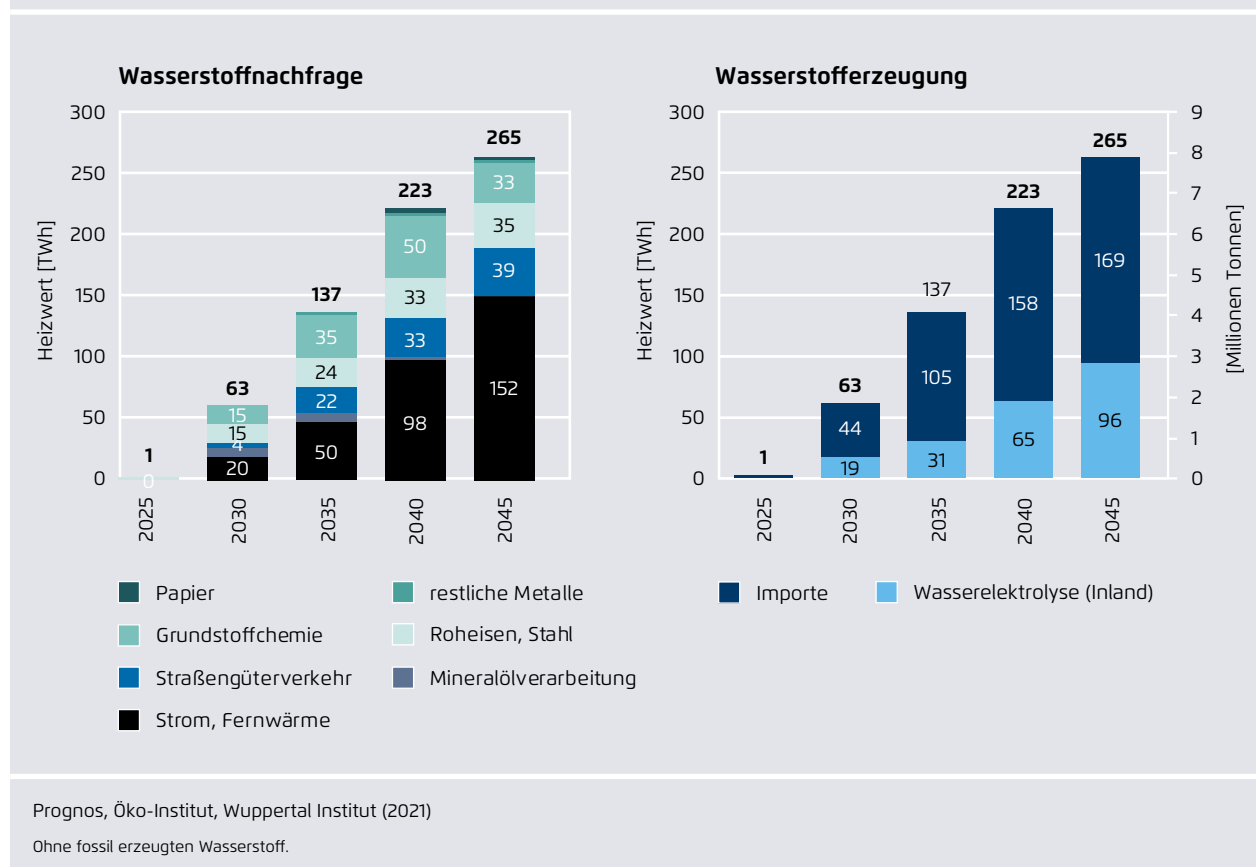
Neben Wasserstoff werden auch synthetische Energieträger eingesetzt. CO₂-neutrale *Power-to-Liquid*-Kraftstoffe werden vorwiegend im nationalen und internationalen Schiffs- und Flugverkehr verwendet, in geringem Umfang auch noch im Straßenverkehr für die im Bestand verbleibenden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

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 331 Terawattstunden importiert werden.

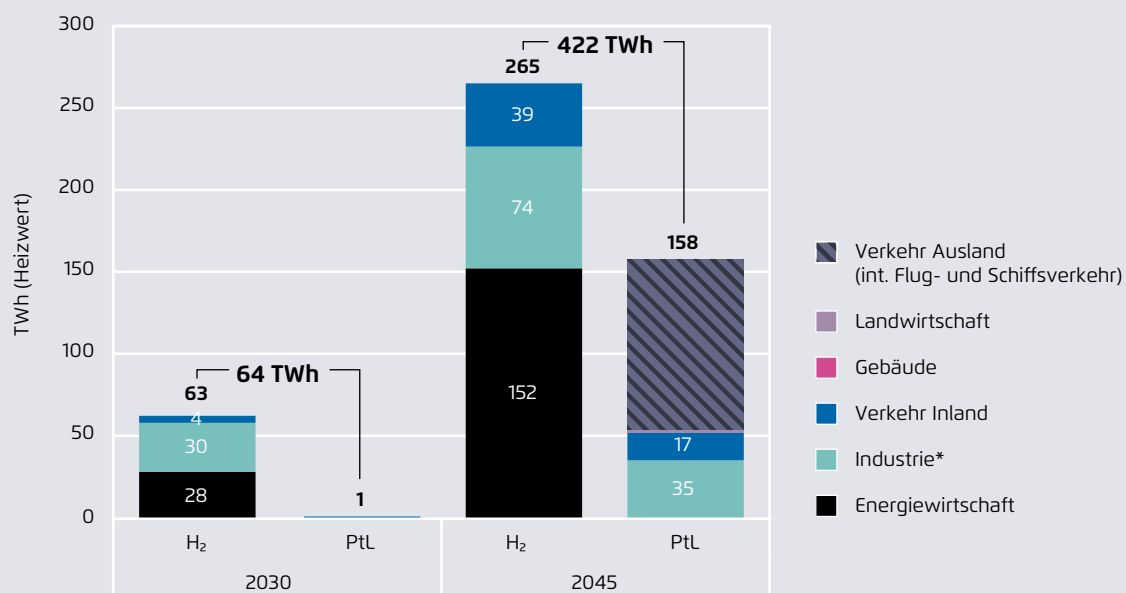
CO₂-freie Wasserstofferzeugung und -nutzung in Deutschland

Abbildung 11



Wasserstoff- und Power-to-Liquid-Einsatz (PtL)

Abbildung 12



Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021)

* Stoffliche Nutzung von PtL-Produkten (Naphtha und Methanol) in der Industrie.

Kernindikatoren des Szenarios Klimaneutral 2045

Abbildung 13

KN2045		2018	2030	2040	2045	2018– 2030 p. a. netto	2030– 2045 p. a. netto
Treibhausgasemissionen* (Mio. t CO ₂ -Äq.)							
Energiewirtschaft 		305	98	26	-18	-17	-8
Industrie 		195	123	19	-30	-6	-10
Verkehr 		162	89	11	0	-6	-6
Gebäude 		117	65	19	3	-4	-4
Landwirtschaft 		70	58	46	41	-1	-1
Abfall und sonstige 		10	5	3	2	0	0
Summe		858	438	124	-2	-35	-29
Minderung im Vergleich zu 1990 (%)		31	65	90	100		
LULUCF (nachrichtlich)		-27	2	0	-11	2	0
Primärenergieverbrauch (PJ), davon		13.129	8.578	7.328	6.658	-379	-141
Kohlen		2.909	349	6	0	-213	-23
Mineralöle		4.452	2.108	203	17	-195	-139
fossile Gase		3.099	2.613	856	27	-41	-172
Bruttostromverbrauch (TWh)		595	643	902	1.017	4	25
EE-Anteil am Bruttostromverbrauch (%)		38	69	87	100**		
Wind Onshore (GW)		52	80	140	145	2	4
Wind Offshore (GW)		6	25	60	70	2	3
Photovoltaik (GW)		45	150	300	385	9	16
Anzahl Elektro-Pkw (inkl. Plug-in-Hybride, Mio. Stück)		0	14	32	36	1	1
Güterverkehrsleistung Schiene (Mrd. tkm)		135	190	210	230	5	3
Anzahl Wärmepumpen (Mio. Stück)		1	6	11	14	0,4	0,5
Nutzenergiebedarf Wohngebäude (kWh/(m ² ·a))		106	85	69	57	-2	-2
Elektrolyseure in Deutschland (GW)		0	10	37	50	1	3
Einsatz von Wasserstoff (TWh)		0	63	223	265	5	13
Herstellung von erneuerbar erzeugtem H ₂ in DE (TWh)		0	19	65	96	2	5
Import Wasserstoff (TWh)		0	44	158	169	4	8
Import sonstiger synth. Brennstoffe u. Feedstocks (TWh)		0	1	57	158	0	10
Carbon Capture and Storage (Brutto-Menge, Mio. t CO₂)		0	-1	-32	-73	0	-5
Prozessemissionen und Abfall (Mio. t CO ₂)		0	-1	-11	-16	0	-1
Negativemissionen (Mio. t CO ₂)		0	0	-22	-57	0	-4
Negativemissionen inkl. stofflicher Bindung (Mio. t CO₂)		0	0	-22	-65	0	-4
Biomasse-CCS (BECCS, Mio. t CO ₂)		0	0	-20	-37	0	-2
Direct-Air-Capture-CCS (DACCS, Mio. t CO ₂)		0	0	-2	-20	0	-1
Grüne Polymere aus importiertem Feedstock (Mio. t CO ₂)		0	0	0	-7	0	0
Bevölkerung in Deutschland (Mio.)		83	83	81	80	0	0
EU-ETS, EUR 2019/t		16	52	70	80	3	2

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021)

* Negativemissionen direkt in den Sektoren berücksichtigt.

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

Energiebilanz Klimaneutrales Deutschland 2045 (in PJ)

Tabelle 1

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040	2045
Primärenergie-Versorgung	11.802	9.557	8.330	7.505	6.799	6.562
Gewinnung (+)	4.719	3.563	3.531	3.926	4.679	5.244
Nettoeinfuhr (±)	7.520	6.444	5.254	3.994	2.512	1.690
Bunkerungen internationale Luftfahrt (–)	-393	-358	-363	-327	-310	-294
Bunkerungen seegehender Schiffe (–)	-107	-92	-92	-87	-82	-76
Bestandsänderungen (±)	64	0	0	0	0	0
Statistische Differenzen	-84	0	0	0	0	0
Statistische Differenzen (±)	-84	0	0	0	0	0
Umwandlungssektor	-3.426	-1.852	-1.386	-1.253	-980	-1.094
Strom-, KWK & Wärmeerzeugung (±)	-2.101	-964	-635	-624	-531	-460
Andere Umwandlungssektoren (±)	-587	-395	-348	-299	-170	-319
Eigenverbrauch und Verluste (–)	-738	-492	-403	-330	-279	-314
Endenergieverbrauch	-8.293	-7.706	-6.944	-6.252	-5.820	-5.469
Industrie (–)	-2.317	-2.259	-2.185	-2.132	-2.136	-2.138
Straßenverkehr (–)	-2.203	-1.911	-1.482	-1.073	-842	-702
Nicht-Straßenverkehr (–)	-117	-119	-118	-125	-130	-129
Sonstige: Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (–)	-1.264	-1.262	-1.166	-1.048	-951	-865
Other: Private Haushalte (–)	-2.320	-2.095	-1.946	-1.808	-1.676	-1.549
Nichtenergetische Nutzung (–)	-72	-60	-46	-66	-86	-85

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021)

*nur H₂ (fossil, PtH₂)

Publikationen von Agora Energiewende

Ladeblockade Netzentgelte

Wie Netzentgelte den Ausbau der Schnellladeinfrastruktur für Elektromobilität behindern und was der Bund dagegen tun kann

Klimaneutralität 2050: Was die Industrie jetzt von der Politik braucht

Ergebnis eines Dialogs mit Industrieunternehmen

Stellungnahme zum Entwurf des Steuerbare-Verbrauchseinrichtungen-Gesetz (SteuVerG)

Die Energiewende im Corona-Jahr: Stand der Dinge 2020

Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2021

Sofortprogramm Windenergie an Land

Was jetzt zu tun ist, um die Blockaden zu überwinden

Klimaneutrales Deutschland (Vollversion)

In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals

Wie passen Mieterschutz und Klimaschutz unter einen Hut?

Wie weiter nach der EEG-Förderung?

Solaranlagen zwischen Eigenverbrauch und Volleinspeisung

Akzeptanz und lokale Teilhabe in der Energiewende

Handlungsempfehlungen für eine umfassende Akzeptanzpolitik

Zwischen Rekordhoch und Abschaffung: Die EEG-Umlage 2021 in Zeiten der Corona-Krise

Der Doppelte Booster

Vorschlag für ein zielgerichtetes 100-Milliarden-Wachstums- und Investitionsprogramm

Auswirkungen der Corona-Krise auf die Klimabilanz Deutschlands

Eine Abschätzung der Emissionen 2020

Die Ökostromlücke, ihre Strommarkteffekte und wie die Lücke gestopft werden kann

Effekte der Windkraftkrise auf Strompreise und CO₂-Emissionen sowie Optionen, um das 65-Prozent-Erneuerbare-Ziel 2030 noch zu erreichen

Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019

Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-energiewende.de

Publikationen von Agora Verkehrswende

Ladeblockade Netzentgelte

Wie Netzentgelte den Ausbau der Schnellladeinfrastruktur für Elektromobilität gefährden und was der Bund dagegen tun kann

Unternehmens-Ladesäulen für alle Fälle

Wie Bund und Länder den Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektromobilität an Unternehmens- und Wohnstandorten voranbringen können

Hinweise zur Überarbeitung der EU-Verordnung für die Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge (Verordnung (EU) 2019/631)

Stellungnahme von Agora Verkehrswende im Rahmen der öffentlichen Konsultation der Europäischen Kommission

Stellungnahme zum Entwurf des Steuerbare-Verbrauchseinrichtungen-Gesetz (SteuVerG)

Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Regulatory Assistance Project (RAP)

Auto tankt Internet

Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur

Unternehmen als Wegbereiter für Elektromobilität

Die Rolle gewerblicher Fahrzeugflotten bei der Elektrifizierung des Straßenverkehrs in Deutschland

Baustellen der Mobilitätswende

Wie sich die Menschen in Deutschland fortbewegen und was das für die Verkehrspolitik bedeutet

Elektromobilität hoch im Kurs?

Stand der Flottenelektrifizierung in den DAX-Unternehmen

Dual-Benefit Stimulus for Germany

A Proposal for a Targeted 100 Billion Euro Growth and Investment Initiative

Making the Most of Offshore Wind

Re-Evaluating the Potential of Offshore Wind in the German North Sea

Supporting the Energy Transition in the Western Balkans

The German Power Market: State of Affairs in 2019

State of Affairs in 2019

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-verkehrswende.de

Wie gelingt uns die Energiewende? Welche konkreten Gesetze, Vorgaben und Maßnahmen sind notwendig, um die Energiewende zum Erfolg zu führen? Agora Energiewende und Agora Verkehrswende wollen den Boden bereiten, damit Deutschland in den kommenden Jahren die Weichen richtig stellt. Wir verstehen uns als Denk- und Politiklabore, in deren Mittelpunkt der Dialog mit den relevanten energiepolitischen Akteuren steht.

Die Stiftung Klimaneutralität wurde gegründet, um in enger Kooperation mit anderen Denkfabriken sektorübergreifende Strategien für ein klimagerechtes Deutschland zu entwickeln. Auf der Basis von guter Forschung will die Stiftung informieren und beraten – jenseits von Einzelinteressen.



Unter diesem QR-Code steht diese
Publikation als PDF zum Download
zur Verfügung.

Stiftung Klimaneutralität

Friedrichstr. 140 | 10117 Berlin

T +49 (0)30 62939 4639

www.stiftung-klima.de

info@stiftung-klima.de



Agora Energiewende

Anna-Louisa-Karsch-Strasse 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000 | F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-energiewende.de

info@agora-energiewende.de



Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Strasse 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000 | F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-verkehrswende.de

info@agora-verkehrswende.de

