

CO₂-neutral bis 2035: **Eckpunkte eines deutschen** **Beitrags zur Einhaltung** **der 1,5-°C-Grenze**

Diskussionsbeitrag für Fridays for Future
Deutschland mit finanzieller Unterstützung
durch die GLS Bank
(2. korrigierte Auflage)

Dr. Georg Kobiela

Dr. Sascha Samadi

Jenny Kurwan

Annika Tönjes

Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick

Thorsten Koska

Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer

Dr. Steven März

Dietmar Schüwer

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde vom Wuppertal Institut für Fridays for Future Deutschland mit finanzieller Unterstützung der GLS Bank durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Erarbeitet für:



Mit finanzieller Unterstützung durch:



Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Wuppertal Institut (2020). *CO₂-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze*. Bericht. Wuppertal.

Projektlaufzeit: Juli 2020 bis Oktober 2020

Autorinnen und Autoren:

Dr. Georg Kobiela (Projektleiter), wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Sektoren und Technologien, Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme, E-Mail: georg.kobiela@wupperinst.org

Dr. Sascha Samadi (stellvertretender Projektleiter), wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Sektoren und Technologien, Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme, E-Mail: sascha.samadi@wupperinst.org

Jenny Kurwan, Junior Researcher im Forschungsbereich Strukturwandel und Innovation, Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme, E-Mail: jenny.kurwan@wupperinst.org

Annika Tönjes, Junior Researcher im Forschungsbereich Strukturwandel und Innovation, Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme, E-Mail: annika.toenjes@wupperinst.org

Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick, wissenschaftlicher Geschäftsführer Wuppertal Institut, E-Mail: manfred.fishedick@wupperinst.org

Thorsten Koska, Co-Leiter des Forschungsbereichs Mobilität und Verkehrspolitik, Abteilung Energie-, Verkehrs- und Klimapolitik, E-Mail: thorsten.koska@wupperinst.org

Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer, Leiter der Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme, E-Mail: stefan.lechtenboehmer@wupperinst.org

Dr. Steven März, wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Stadtwechsel, Abteilung Energie-, Verkehrs- und Klimapolitik, E-Mail: steven.maerz@wupperinst.org

Dietmar Schüwer, Senior Researcher im Forschungsbereich Sektoren und Technologien, Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme, E-Mail: dietmar.schuewer@wupperinst.org

Weitere Mitarbeitende:

Dr. Benjamin Best (Wuppertal Institut), Marvin Ewert (Wuppertal Institut), Ines Stelk (Bergische Universität Wuppertal), Dr. Stefan Thomas (Wuppertal Institut), Timon Wehnert (Wuppertal Institut)

Die Autorinnen und Autoren danken den folgenden Personen für ihr Feedback:

Franz Baumann, PhD (New York University, Graduate School of Arts and Science, Program in International Relations)

Prof. Dr. Dr. Felix Ekardt (Forschungsstelle Nachhaltigkeit und Klimapolitik Leipzig/Berlin und Universität Rostock)

Dr. Michael Jakob (Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, MCC)

Prof. Dr. Claudia Kemfert (Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung, DIW)

Prof. Dr. Andreas Pfennig (Department of Chemical Engineering der University of Liège)

Herausgeberin:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechperson:

Dr. Georg Kobiela
Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme
georg.kobiela@wupperinst.org
Tel. +49 202 2492-311
Fax +49 202 2492-108

Wuppertal, Oktober 2020

Änderungen der zweiten Auflage gegenüber der ersten: Korrekturen in Kapitel 6 im Abschnitt „Zement- und Baustoffbranche“ sowie in Tabelle 6-2.

Der Text dieses Werks steht unter der Lizenz „Creative Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0).
Der Lizenztext ist abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	5
Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	8
1 Kurzfassung	10
2 Einleitung	21
3 Was erfordern die Ziele des Pariser Klimaabkommens?	24
4 Vergleich ausgewählter Klimaschutzszenarien für Deutschland	33
5 Energiewirtschaft	40
6 Industrie	56
7 Verkehr	74
8 Gebäude	89
9 Fazit	101
Literaturverzeichnis	105

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

BaU	Business-as-Usual-Entwicklung (Szenario ohne ambitionierten Klimaschutz)
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (engl. Battery Electric Vehicle)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BTX	Benzol, Toluol, Xylole
CAPEX	Investitionskosten (engl. capital expenditure)
CCS	CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (engl. Carbon Capture and Storage)
CCU	CO ₂ -Abscheidung und -Verwendung (engl. Carbon Capture and Utilisation)
EU-ETS	Europäisches Emissionshandelssystem (engl. Emissions Trading System)
GWP	Global Warming Potential
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Kfz	Kraftfahrzeug
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
Lkw	Lastkraftwagen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
OPEX	Betriebskosten (engl. operational expenditure)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PHEV	Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeug
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
THG	Treibhausgas(e)

Einheiten und Symbole

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
a	annum / Jahr
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
g	Gramm
Gt	Gigatonne (1 Gt = 1 000 000 000 t; 1 Mrd. t)
GW	Gigawatt (1 GW = 1 000 000 000 W)
GWh	Gigawattstunde
h	Stunde
H ₂	Wasserstoff
J	Joule (1 J = 1 Ws)
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kt	Kilotonne
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde (1 kWh = 3,6 MJ)
Mio.	Million
MJ	Megajoule (1 MJ = 0,278 kWh)
Mrd.	Milliarde
Mt	Megatonne (1 Mt = 1 000 000 t; 1 Mio. t)
PJ	Petajoule (1 PJ = 1 000 000 000 MJ = 278 GWh)
s	Sekunde
t	Tonne
TWh	Terawattstunde (1 TWh = 1 000 000 000 kWh = 3,6 PJ)
W	Watt
W _{el}	Watt, elektrische Leistung
W _{th}	Watt, thermische Leistung
Ws	Wattsekunde (1 Ws = 1 J)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Globale und deutsche CO ₂ -Budgets -----	26
Tabelle 4-1	Kurzübersicht über die in dieser Studie herangezogenen Klimaschutzszenarien für Deutschland -----	34
Tabelle 4-2	Abschätzungen aus der Literatur zu den durchschnittlichen jährlichen Differenzkosten bzw. Mehrinvestitionen bis 2050 für das Erreichen (weitgehender) Treibhausgasneutralität im Energiesystem -----	38
Tabelle 6-1	Auflistung der Treibhausgas-Emissionen der deutschen Grundstoffindustrie im Jahr 2017 -----	58
Tabelle 6-2	Endenergiebedarfe in der Industrie bei vollständiger Klimaneutralität und heutiger Primärproduktion -----	69
Tabelle 6-3	Referenztechnologien zur Ermittlung der CO ₂ -Vermeidungskosten -----	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Beispielhafter Emissionspfad zur Einhaltung des deutschen 1,5-°C-Budgets, inkl. aktueller Ziele der Bundesregierung.	11
Abbildung 1-2	Jährlicher Brutto-Zubau von Windenergie- und PV-Anlagen in Deutschland in den Jahren 2018/2019 sowie benötigter Zubau nach Zielen der Bundesregierung und (beschleunigten) Szenarien (in GW).....	14
Abbildung 3-1	Beispielhafter Emissionspfad zur Einhaltung des deutschen 1,5-°C-Budgets	30
Abbildung 3-2	Entwicklung der THG-Emissionen in Deutschland nach Sektoren	31
Abbildung 3-3	Die Klimaziele der Bundesregierung im Verhältnis zum deutschen CO ₂ -Budget.....	32
Abbildung 4-1	Vergleich der gesamten THG-Emissionen in den betrachteten Szenarien mit dem 1,5-°C-Budget	35
Abbildung 4-2	Vergleich der gesamten THG-Emissionen in den betrachteten Szenarien mit dem 1,75-°C-Budget	36
Abbildung 4-3	Entwicklung des Endenergiebedarfs in ambitionierten Klimaschutzszenarien (in PJ)	37
Abbildung 5-1	Inländische Stromerzeugung nach Energieträgern im Jahr 2019 sowie nach verschiedenen vorliegenden Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 (in TWh).....	43
Abbildung 5-2	Installierte Kapazität an Windenergie- und PV-Anlagen in Deutschland im Jahr 2019 sowie nach verschiedenen Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 (in GW).....	44
Abbildung 5-3	Jährlicher Brutto-Zubau von Windenergie- und PV-Anlagen in Deutschland in den Jahren 2018/2019 sowie benötigter Zubau nach Zielen der Bundesregierung sowie (beschleunigten) Szenarien (in GW).....	45
Abbildung 5-4	Jährlicher Brutto-Zubau von Onshore-Windenergie in Deutschland seit 2000 im Vergleich zu dem für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2035 nötigen Zubau (in GW)	47
Abbildung 5-5	Bedarf an Wasserstoff und synthetischen Energieträgern nach ihrer Herkunft in verschiedenen Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 (in TWh).....	51
Abbildung 6-1	Treibhausgas-Emissionen der deutschen Grundstoffindustrie im Jahr 2017	57
Abbildung 6-2	Endenergieverbrauch der Industrie nach Energieträgern im Szenarienvergleich (in PJ)	59
Abbildung 6-3	CO ₂ -Vermeidungskosten wesentlicher Technologien für eine klimaneutrale Grundstoffindustrie	71
Abbildung 7-1	Modal Split des Personenverkehrs in Deutschland: Verkehrsaufkommen (Wege) und Verkehrsaufwand (Personenkilometer) im zeitlichen Vergleich	75
Abbildung 7-2	Verkehrsaufwand und Modal Split im Güterverkehr.....	76
Abbildung 7-3	Strategien der Verkehrswende und der Energiewende im Verkehr	77
Abbildung 7-4	Szenarienvergleich der Entwicklung des Verkehrsaufwands im Personenverkehr	79
Abbildung 7-5	Szenarienvergleich der Modal Shift-Entwicklung zwischen MIV und ÖV im Personenverkehr	80
Abbildung 7-6	Szenarienvergleich der Antriebsarten im Personenverkehr.....	82
Abbildung 7-7	Szenarienvergleich des Verkehrsaufwands im Güterverkehr.....	83
Abbildung 7-8	Szenarienvergleich des Verkehrsaufwands je Verkehrsträger im Güterverkehr.....	84
Abbildung 8-1	Beheizungsstruktur im deutschen Wohnungsbestand.....	91
Abbildung 8-2	Anteil fossil befeuerter Heizungen im Absatzmarkt 2018 im Vergleich zu 1999	91

Abbildung 8-3	Stagnation des Anteils erneuerbarer Wärme: Anteile erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch und an den Endenergieverbräuchen für Wärme und Kälte sowie Verkehr -----	92
Abbildung 8-4	Spezifische Wohnflächenentwicklung pro Kopf, 1960 bis 2050-----	93
Abbildung 8-5	Beheizungsstruktur im Jahr 2050 in drei Energieszenarien mit nahezu Klimaneutralität -----	94

1 Kurzfassung

Wege zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze des Pariser Klimaabkommens

Die in Paris Ende 2015 von der internationalen Staatengemeinschaft beschlossene Vereinbarung gibt das Ziel vor, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius (°C), möglichst aber auf unter 1,5 °C zu begrenzen. Die hier vorliegende Studie orientiert sich auftragsgemäß an der unteren Grenze von 1,5 °C. Nach Erkenntnissen der Klimawissenschaft können hierdurch die Risiken und Auswirkungen des Klimawandels gegenüber einer stärkeren Erwärmung erheblich verringert werden – unter anderem die Gefahr, unwiderruflich Kipppunkte im Klimasystem zu überschreiten. Um die 1,5-°C-Grenze mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent zu erreichen, muss die Menge der zukünftig global ausgestoßenen Treibhausgase eng begrenzt werden. Insgesamt dürften dafür nach Berechnungen des IPCC weltweit ab 2018 noch maximal 580 Gt CO₂ emittiert werden (IPCC 2018a). Für Deutschland bleibt gemäß dem Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) ab dem Jahr 2020 noch ein **Restbudget von 4,2 Gt CO₂** – unter der Annahme, dass die weltweit noch erlaubten Emissionen pro Kopf der Bevölkerung gleichverteilt werden und aufgrund der vielen damit verbundenen Unsicherheiten keine Ausgleichsmaßnahmen über negative Emissionen ergriffen werden sollen oder können. Das Einhalten dieser Zielmarke ist nur dann zu erreichen, wenn Deutschland bis etwa zum Jahr 2035 CO₂-neutral wird und dies auch nur dann, wenn die Emissionen schon in den unmittelbar vor uns liegenden Jahren besonders stark sinken (vgl. Abbildung 1-1). Binnen der nächsten fünf bis sechs Jahre müssen sich die deutschen Treibhausgasemissionen demnach etwa halbieren, was einer **mittleren Reduktion von 60 bis 70 Mt CO₂ pro Jahr** entspricht. Im Licht der Entwicklungen in den letzten zehn Jahren, in denen die jährliche Reduktion im Schnitt lediglich 8 Mt CO₂ betrug, stellt dies eine enorme Herausforderung dar.

Zur zentralen Frage, ob und wie derart drastische Veränderungen unseres Energie- und Wirtschaftssystems innerhalb von rund 15 Jahren möglich sind, will die vorliegende Studie **Denkanstöße** leisten. Dabei hebt sie auf die größten inländischen Treibhausgasquellen ab und fokussiert zugleich auf das dominante Klimagas Kohlendioxid. Die vorwiegend in der Landwirtschaft auftretenden Nicht-CO₂-Treibhausgasemissionen – vor allem Methan und Lachgas – werden nicht explizit betrachtet. Insofern stellt die Studie Bausteine dar, mit denen signifikante Beiträge zur angestrebten Zielsetzung der CO₂-Neutralität erreicht werden können, während zur vollständigen Treibhausgasneutralität zusätzlich auch die Landwirtschaft klimaneutral werden müsste. Darüber hinaus diskutiert die Studie, welche Hemmnisse bei der Umsetzung von CO₂-Neutralität überwunden werden müssen. Sie gibt aber keinen konkreten Weg vor, das heißt sie entwickelt **kein in sich konsistentes Szenario für das Jahr 2035** und schlägt auch keine Priorisierung einzelner Handlungsoptionen vor. Dies bleibt – auf der Basis weitergehender Diskussionen mit Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft und damit verbundener Abwägungsprozesse – zukünftigen Untersuchungen vorbehalten.

Insgesamt legen die Analysen in dieser Studie nahe, dass das **Erreichen von CO₂-Neutralität bis zum Jahr 2035 aus technischer und ökonomischer Sicht zwar extrem anspruchsvoll wäre, grundsätzlich aber möglich ist.**

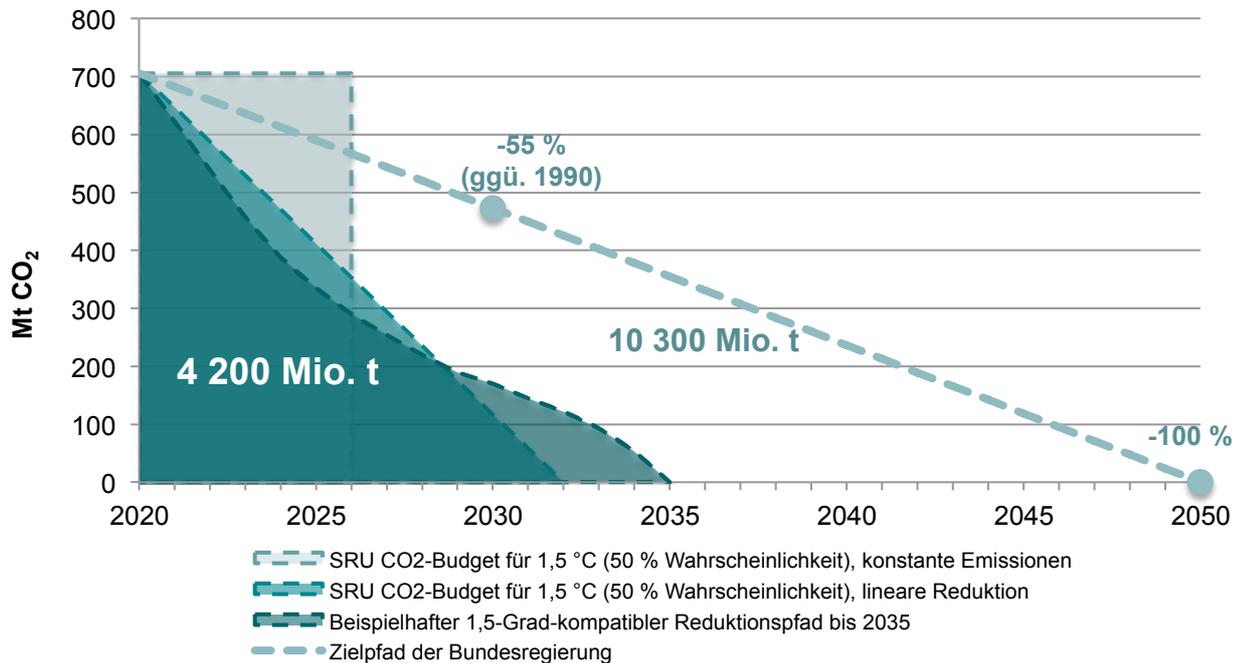


Abbildung 1-1 Beispielhafter Emissionspfad zur Einhaltung des deutschen 1,5-°C-Budgets, inkl. aktueller Ziele der Bundesregierung¹.

Quelle: Basierend auf SRU (2020).

Sie deuten aber auch an, welche vielfach massiven Herausforderungen und strukturellen Veränderungen mit einer entsprechenden Transformation verbunden sind. Ob die für die Zielerreichung notwendige „Große Transformation“ bis 2035 tatsächlich realisierbar sein wird, hängt aber nicht nur von der technologischen und ökonomischen Machbarkeit, sondern auch erheblich von der gesellschaftlichen Bereitschaft zu massiven Veränderungen, einem außerordentlichen politischen Gestaltungswillen mit einer konsequenten Fokussierung auf die Umsetzung sowie weiteren Rahmenbedingungen wie einer verstärkten internationalen Zusammenarbeit ab. Entscheidend dafür sind politische, institutionelle und kulturelle Fragestellungen, die in dieser Studie nur am Rande thematisiert werden, aber nicht abschließend beantwortet werden können. Inwieweit akzeptieren wir als Gesellschaft den massiven Ausbau von erneuerbaren Energien und den Ausbau bestehender sowie den Aufbau neuer Energie-, Verkehrs, Gebäude- und Industrieinfrastrukturen? Sind wir bereit, mit gewohnten Routinen zu brechen und unser Verkehrsverhalten deutlich zu verändern? Sind wir in der Lage, die Veränderungen fair und auch für ökonomisch benachteiligte Mitglieder der Gesellschaft attraktiv zu organisieren? Hat die Politik die Fähigkeit, über den gesamten Zeitraum der Transformation konsequent steuernd einzugreifen und nicht zuletzt für die Wirtschaft verlässliche Rahmenbedingungen zu schaffen? Gelingt es uns, die mit dem Transformationsprozess verbundenen strukturellen Veränderungen

¹ Da es seitens der Bundesregierung keine separaten Minderungsziele (ausschließlich) für CO₂-Emissionen gibt, werden in dieser Abbildung die auf alle Treibhausgase bezogenen Minderungsziele der Bundesregierung dargestellt.

früh genug zu identifizieren, den Strukturwandel proaktiv zu gestalten, das heißt die damit verbundenen Chancen aufzugreifen aber auch flankierende Maßnahmen für die Adressierung möglicherweise negativer Auswirkungen umzusetzen? Diese und andere Fragen müssen wir uns stellen, um ehrliche und transparente Antworten über den Umgang mit den vor uns liegenden Herausforderungen zu finden, vor denen wir stehen, wenn wir in Deutschland einen adäquaten Beitrag zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze leisten wollen, wie in dieser Studie als Grundannahme unterstellt.

Das Einhalten des 1,5-°C-Emissionsbudgets verlangt deutlich schnellere Emissionsminderungen und ein wesentlich früheres Erreichen von CO₂-Neutralität als dies sowohl in bislang vorliegenden umfassenden Szenariostudien (die eine weitgehende Treibhausgasneutralität bis 2050 zum Ziel haben) **als auch in bestehenden politischen Zielvorgaben der Bundesregierung dargelegt** ist. Entsprechend ist davon auszugehen, dass auf der Basis der bisherigen Energie- und Klimapolitik die für einen ambitionierten Minderungspfad notwendigen Maßnahmen nicht im erforderlichen Maß umgesetzt werden und bisherige Politikinstrumente nicht hinreichend greifen.

Für die für den Klimaschutz zentralen Sektoren der **Energiewirtschaft**, der **Industrie**, des **Verkehrs** und der **Gebäudewärme** stellen sich große Herausforderungen, um bis 2035 zumindest eine weitgehende Treibhausgasneutralität zu erreichen. Landwirtschaft und Landnutzung werden hier ungeachtet deren Bedeutung nicht betrachtet, mögliche Rückwirkungen der Transformationsprozesse im Energiesystem auf die Landnutzung werden damit nur am Rande erwähnt. Die Frage, inwieweit eine nationale wie auch weltweite Agrarwende die skizzierten Transformationen unterstützen dürfte, wird dementsprechend ebenfalls nicht betrachtet – jedoch sind Aufforstung, Humusaufbau und eine Umwidmung von bislang zum Futtermitteleinbau eingesetzter Flächen in natürliche Landschaften mit dem Potenzial der biogenen CO₂-Sequestrierung (und zur Reduktion aktueller Ausgasungen aus Böden) sowie zur Bereitstellung von – nachhaltig produzierter – stofflich nutzbarer Biomasse wichtige Kopplungselemente, die weiterer Betrachtung bedürfen.

Gegenüber bestehenden Szenarien, die üblicherweise auf das Zieljahr 2050 abzielen, unterscheiden sich die in dieser Studie als für die Realisierung von CO₂-Neutralität bis 2035 erforderlich abgeleiteten Maßnahmen zumeist in der Umstellungsgeschwindigkeit, was signifikant höhere, in der Regel, zumindest doppelt so hohe Zu- beziehungsweise Umbauraten gegenüber den auf 2050 ausgerichteten Pfaden bedeutet. Diese erhöhte Geschwindigkeit wird aufgrund von Planungszeiten, des Zeitbedarfs für Technologieentwicklungen, der Lebensdauern bestehender Anlagen und Systeme und unter Berücksichtigung der zum Teil auch in den 2050er-Pfaden ohnehin schon sehr ambitionierten Prozesse nicht in allen Fällen realisierbar sein. Insofern unterscheiden sich manche der skizzierten Pfade auch hinsichtlich der Technologieauswahl. Dabei kommt insbesondere einer konsequenteren Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft eine große Bedeutung zu. Ebenso ist eine stärkere Betonung von Suffizienzstrategien beziehungsweise nachhaltigen Konsummustern geboten. Die für die Umsetzung der Maßnahmen erforderlichen, in der vorliegenden Arbeit jedoch lediglich schlaglichtartig beleuchteten Politikinstrumente werden eine größere Eindringtiefe und Komplexität beinhalten müssen als in den meisten bislang diskutierten Pfaden.

Für einen derart schnellen Umbau großer Teile des Wirtschaftssystems gibt es bisher kein Beispiel, entsprechend müssen die damit verbundenen Auswirkungen sorgsam reflektiert werden. Dies gilt vor allem für die skizzierten, vielfach aus heutiger Sicht nicht nur ambitionierten, sondern teils radikalen strukturellen Veränderungen, die aus den Transformationsprozessen folgen. **Damit möglicherweise verbundene Verschärfungen sozialer Ungleichheiten und Benachteiligungen müssen vermieden werden.** Die Grundmaxime muss daher sein, den Umbau im Sinne einer „Just Transition“ sozial-ökologisch zu gestalten und einer Verstärkung sozialer Ungleichheiten und Benachteiligungen durch wirksame Politikinstrumente entgegen zu wirken. Ein Kernstück einer solchen sozial-ökologischen Politik wäre das Verbinden von effektiven CO₂-Preisen und Klimaschutzmaßnahmen mit progressiver Verteilungswirkung, wie etwa dem Absenken der Stromsteuer oder günstigerem ÖPNV, die mit den Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung finanziert werden könnten. Zur Vermeidung negativer Verteilungseffekte sind vermutlich ergänzende Instrumente erforderlich, welche zugleich die Steuerung weiter unterstützen und entstehende finanzielle Härten abfedern. Ob dies Pro-Kopf-Gutschriften sind, wie sie in einigen Ländern bereits umgesetzt sind, oder andere Maßnahmen, bleibt zu diskutieren.

Erneuerbare Energien als Grundpfeiler der Energiewende

Die **Energiewirtschaft** ist der Schlüsselsektor für das Erreichen von CO₂-Neutralität. Sie ermöglicht im zukünftigen System über den verstärkten Einsatz von Strom, der über die heutigen Stromanwendungen hinausgeht, den energieintensiven Sektoren Industrie, Verkehr und Gebäude einen klimaneutralen Betrieb. In der Energiewirtschaft erfordert die Transformation daher insbesondere **einen sehr schnellen Umbau der Stromerzeugung auf 100 Prozent erneuerbare Energien.** Dafür ist ein gegenüber den vergangenen Jahren deutlich schnellerer Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung notwendig. Überträgt man die vorliegenden Erkenntnisse aus den 2050-Pfaden auf das Jahr 2035, **erscheint ein Ausbau von Windenergie- (on- und offshore) und Photovoltaikanlagen in einer Größenordnung von zusammen mindestens 25 bis 30 GW pro Jahr sinnvoll** (s. Abbildung 1-2).

Aus einigen Szenarien lässt sich auch ein niedrigerer jährlicher Ausbaubedarf von 15 GW ableiten, ein solch niedrigerer Ausbau würde allerdings einen sehr großen Import klimaneutraler Energieträger (wie zum Beispiel Wasserstoff) bedingen. Ob ein solch großskaliger Import bis 2035 realisiert werden kann, ist aufgrund des hohen Zeitbedarfs für die Planung und Umsetzung von Erzeugungsanlagen und zugehörigen Transportinfrastrukturen keineswegs sicher. Auch geopolitische Bedenken könnten limitierend wirken. Zudem sollte die Prämisse gelten, dass zunächst die Deckung des eigenen Bedarfs an klimaneutralen Energieträgern in den Exportländern Vorrang hat.

Aber selbst ein Zubau von 15 GW pro Jahr wäre im Vergleich mit den Zubauraten der letzten Jahre viel und ebenfalls deutlich mehr als sich aus den aktuellen Zielen der Bundesregierung ableiten lässt (s. Abbildung 1-2). Allerdings wurden in der Vergangenheit in einzelnen Jahren bereits Zubauraten von über 8 GW Photovoltaik (2012), über 5 GW Onshore-Windenergie (2017) und über 2 GW Offshore-Windenergie (2015) erreicht. Sollte es gelingen, jede dieser Zubauraten wieder zu realisieren und

Jahr für Jahr aufrechtzuerhalten, würde dies fast dem mindestens notwendigen Ausbau für das Ziel 100 Prozent erneuerbarer Energien bis 2035 entsprechen – allerdings nur dann, wenn in vergleichsweise kurzer Zeit zusätzlich massive Importe von Wasserstoff oder synthetischen Energieträgern realisiert werden können.

Bei einem nur sehr geringen Import klimaneutraler Energieträger und ohne einen deutlichen Trend hin zu suffizienteren Lebensstilen wäre sogar ein Ausbau von rund 40 GW pro Jahr notwendig. Der jährliche Ausbau müsste unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Vollaststunden von Wind- und Solarenergie ebenfalls deutlich höher ausfallen, falls aufgrund bestehender Hemmnisse eine Erhöhung des Zubaus der Onshore-Windenergie von 1,1 GW (Jahr 2019) auf jährlich rund 7 GW nicht möglich sein sollte und dies durch einen deutlich höheren Ausbau der Photovoltaik kompensiert werden müsste. **Aufgrund dieser Unsicherheiten darf keine weitere Zeit verloren werden, internationale Energie-Partnerschaften auszubauen, während es gleichzeitig sinnvoll erscheint, einen maximal (nachhaltig) möglichen inländischen Ausbau erneuerbarer Energien anzustreben.**

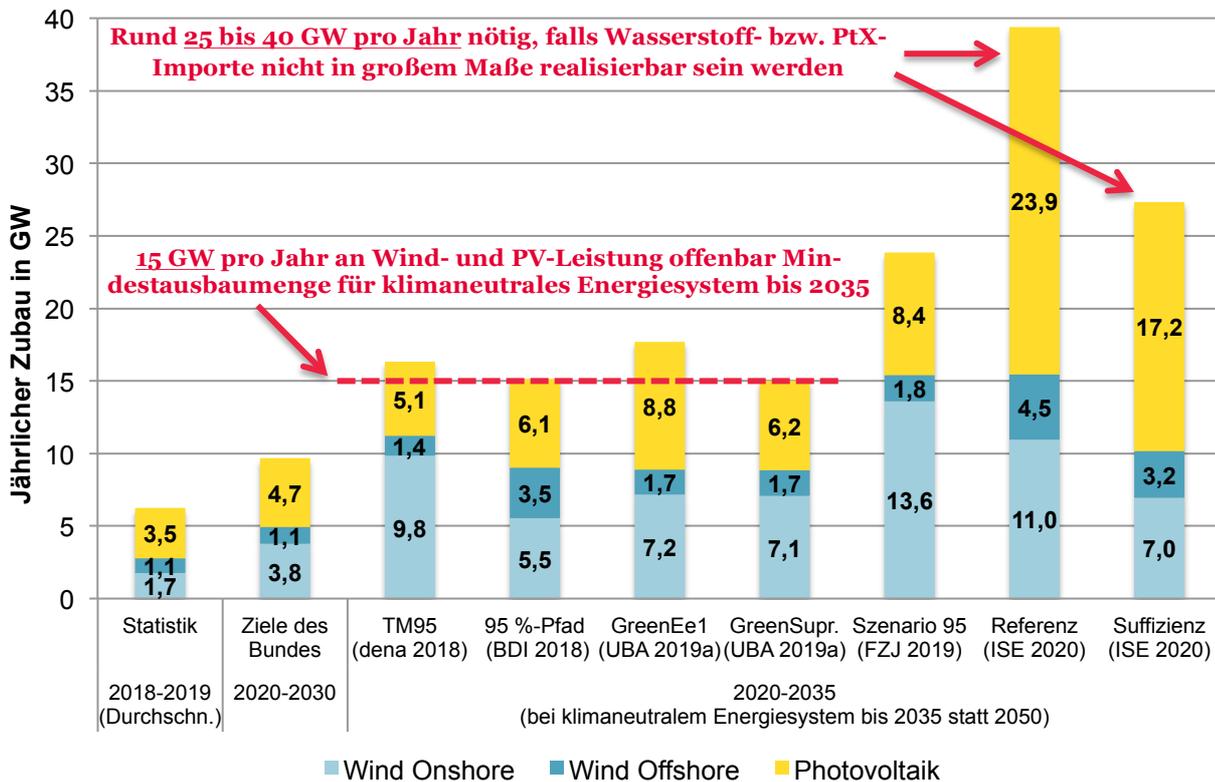


Abbildung 1-2 Jährlicher Brutto-Zubau von Windenergie- und PV-Anlagen in Deutschland in den Jahren 2018/2019 sowie benötigter Zubau nach Zielen der Bundesregierung und (beschleunigten) Szenarien (in GW)²

Quellen: Statistik nach BWE (2020a), pv-magazine (2019, 2020), BMWi (2020). Ziele des Bundes nach der im September 2020 vom Bundeskabinett verabschiedeten EEG-Novelle 2021 (Bundesregierung 2020a).

Aus den aktuellen Zielen der Bundesregierung lässt sich hingegen bis 2030 ein Ausbaubedarf von Wind- und Photovoltaikanlagen von jährlich rund 9 bis 10 GW ablei-

² Annahme: Anlagen-Lebensdauern von 20 Jahren (Wind) bzw. 25 Jahren (Photovoltaik).

ten. Auch die meisten vorliegenden Energieszenarien, die bis 2050 ein klimaneutrales Energiesystem erreichen, beschreiben bis 2030 einen jährlichen Ausbau in ähnlicher Größenordnung (8 bis 13 GW). Wie Abbildung 1-2 zeigt, lag der Erneuerbaren-Zubau in den letzten Jahren deutlich unterhalb dieser Werte und noch deutlich weiter entfernt von dem hier abgeleiteten notwendigen Ausbau für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2035.

Die notwendige starke Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien **erfordert neue energiepolitische Maßnahmen**, vor allem im Bereich der Windenergie. Eine Belegung des Ausbaus der Onshore-Windenergie wird nur über ein Bündel an Maßnahmen erreicht werden können, zu der eine **stärkere Beteiligung der Anwohnerinnen und Anwohner sowie der Kommunen am Betrieb von Windenergieanlagen** bzw. an den von diesen generierten Einnahmen gehört. Hinzu kommen muss eine stärkere und beschleunigte Abstimmung zwischen Vogel- und Landschaftsschutz auf der einen und Klimaschutz auf der anderen Seite sowie die Bildung entsprechender Allianzen. Im Bereich der **Photovoltaik** könnte über eine **Installations- bzw. Nutzungspflicht** beim Neubau sowie bei Dachsanierungen beziehungsweise beim Eigentümerwechsel nachgedacht werden.

Der **Aus- und Umbau der Stromübertragungs- und -verteilnetze** muss stark beschleunigt und die **zeitliche Flexibilität der Stromnachfrage** (unter anderem über eine verstärkte Sektorenkopplung) erhöht werden. **Kurz- und Langzeitspeicher** müssen errichtet werden.

In einem klimaneutralen Energiesystem ist mit einem **Bedarf an Wasserstoff und gasförmigen sowie flüssigen synthetischen Energieträgern** in einer Größenordnung von etwa 400 bis 900 TWh pro Jahr zu rechnen, nur im Falle weitgehender Lebensstiländerungen könnte der Bedarf niedriger liegen. Die Nachfrage nach Wasserstoff und synthetischen Energieträgern in einem klimaneutralen Energiesystem könnte vorliegenden Szenarien zufolge zwischen 25 und 55 Prozent des zukünftigen gesamten Endenergiebedarfs entsprechen und damit etwa dem 8- bis 18-fachen der heutigen (primär auf der klimaschädlichen Reformierung von Erdgas basierenden) Erzeugung von Wasserstoff.

Zumindest ein Teil dieses Bedarfs kann und sollte über eine **inländische Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyseuren** gedeckt werden. Importe sind auf Dauer nur aus Ländern ökologisch sinnvoll, die bereits eine vollständige eigene Bedarfsdeckung mit erneuerbaren Energien erreicht haben und die Wasserstoff bereitstellen können, der aus erneuerbaren Energiequellen stammt. Mit dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ließen sich auch entsprechende Wertschöpfungseffekte und Innovationsimpulse in Deutschland auslösen. Wird bis 2035 zumindest eine inländische Bereitstellung von 150 bis 200 TWh Wasserstoff als notwendig angenommen, macht dies bis dahin den Aufbau einer Kapazität an Elektrolyseuren in Höhe von voraussichtlich mindestens 40 und bis zu 90 GW erforderlich (unter anderem in Abhängigkeit der realisierbaren Volllaststunden der Elektrolyseure). Die Bundesregierung strebt im Rahmen ihrer Wasserstoffstrategie hingegen gegenwärtig bis 2035 eine entsprechende Kapazität in Höhe von maximal 10 GW an. In vorliegenden Szenarien, die ein klimaneutrales Energiesystem bis 2050 beschreiben, werden bis 2035 maximal rund 20 GW an Elektrolyseuren in Deutschland angenommen.

Im Vergleich zu den bisher vorliegenden Studien besteht nicht zuletzt hinsichtlich der Geschwindigkeit der Einführung und Marktdurchdringung von auf erneuerbaren Energien basierenden gasförmigen oder flüssigen synthetischen Energieträgern wie insbesondere Wasserstoff ein großer Unterschied. Die heute noch zum Teil hohen Kosten dieser Energieträger müssten schnell überwunden werden und es muss mit Nachdruck an dem Aufbau internationaler Märkte gearbeitet werden. Um schnell Effekte erzielen zu können, könnte über eine umfassende Beimischungsquote für ausschließlich klimaneutrale Brennstoffe nachgedacht werden, die bereits innerhalb der nächsten Jahre eingeführt und dann kontinuierlich gesteigert würde.

Industrietransformation

Für die **Transformation des Industriesektors** lassen sich vier Leitlinien ableiten. Gegenüber der Erreichung von weitgehender Treibhausgasneutralität erst im Jahr 2050 stellt sich die Herausforderung, dass bis 2035 nur eine geringere Auswahl an verwendbaren Technologien mit hinreichend hohem Reifegrad bereitstehen wird. Zudem stellen die üblichen hohen Lebensdauern der bereits bestehenden Anlagen für eine Transformation innerhalb von lediglich fünfzehn Jahren eine enorme zu überwindende Hürde dar.

(1) Der vollständige und schnelle Ersatz fossiler Energieträger und fossiler chemischer Grundstoffe in der Industrie erfordert den **Ersatz der fossilen Industriekraftwerke durch erneuerbare Energien**, die **Elektrifizierung von Industrie-Heizsystemen für Dampf und Wärme** (beispielsweise mittels elektrischer Dampferzeugung) und den **Ersatz fossiler Grundstoffe in der chemischen Industrie durch Kreislaufführung** (Ausbau des mechanischen Recyclings und Einsatz von chemischem Recycling) sowie biogene Materialien, unter Beachtung von Nachhaltigkeitsprinzipien sowie der grundsätzlich begrenzten Flächenverfügbarkeit und Nutzungskonkurrenz hinsichtlich der Anbauflächen.

(2) Wegen der langen Lebensdauer von Industrieanlagen – vor allem im Bereich der energieintensiven Industrie – dürfen ab heute ausschließlich **THG-Neutralitätskompatible Neuinstallationen** erfolgen, andernfalls würde ein kaum mehr vor 2035 lösbarer Lock-In in fossile Anlagen entstehen. Sofern die sichere Möglichkeit der Umstellung, wie etwa von Erdgas auf grünen Wasserstoff, mit einer klaren zeitlichen Perspektive gegeben ist, können manche dieser Anlagen anfangs noch fossil betrieben werden.

(3) Der **konsequente und schnelle Aufbau einer Kreislaufwirtschaft** (circular economy) verringert den Bedarf der energieintensiven Primärmaterial-Produktion. Aufeinander aufbauende Strategien sind hierbei

- **Reduce:** Die Steigerung der Materialeffizienz unter anderem durch die Vermeidung unnötigen Materialbedarfs durch ein intelligentes Produktdesign und von Materialverlusten im Rahmen der Herstellungsprozesse sowie die verlängerte bzw. intensivere Nutzung von Produkten,
- **Reuse:** Die Weiternutzung von Produkten oder Komponenten sowie
- **Recycle:** Das mechanische Recycling durch Trennen und Aufbereiten und das chemische Recycling auf Molekülebene.

(4) Die schnelle Einführung von klimaschonenden Technologien und dafür notwendigen Infrastrukturen im Bereich der Grundstoffindustrie kann nur gelingen durch forcierte Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen (Demo- und Pilotanlagen), eine **schnelle – durch entsprechende Anreizsysteme unterstützte – Markteinführung und dann ein flächendeckendes Ausrollen von nicht-fossilen Prozesstechnologien** (zum Beispiel Wasserstoff-basierte Stahlerzeugung), den Einstieg in eine branchenübergreifende Wasserstoffwirtschaft inkl. Aufbau von Produktionsstrukturen (Elektrolyseure) und Transport- und Verteilsysteme (etwa durch eine schrittweise Umstellung der Erdgaspipelines auf Wasserstoff) sowie den Aufbau eines CO₂-Transportnetzes für die Nutzung unvermeidbarer Restemissionen an CO₂.

Diese Strategien sind grundsätzlich nicht neu in der Diskussion, ihre Umsetzung bisher aber aus unterschiedlichen Gründen gehemmt. Die vorliegenden Hemmnisse müssen unverzüglich und offensiv gemeinsam mit den Unternehmen angegangen werden, um gerade in der durch lange Anlagenlebensdauern gekennzeichneten Industrie keine Lock-in-Effekte zu erzeugen. Viele Unternehmen sind heute zum Umbau ihrer Produktionsstrukturen bereit, sie brauchen dafür aber eine Unterstützung und Planungssicherheit. Der aufgrund der Altersstruktur bestehenden hohe Reinvestitionsbedarf, der in einzelnen Sektoren bis 2030 bei mehr als 50 Prozent liegt, bietet hierfür eine gute Möglichkeit, die nicht verpasst werden darf. Hierzu ist ein **komplexer Werkzeugkasten** mit vielen einzelnen Ansätzen erforderlich.

Ein ambitionierter CO₂-Mindestpreis ist dafür ein wichtiges Instrument, jedoch allein nicht ausreichend, um notwendige innovative Schlüsseltechnologien ökonomisch attraktiv werden zu lassen. Herausforderungen, die durch einen hohen CO₂-Preis allein vermutlich nicht gelöst werden können, sind die Entwicklung der benötigten Infrastrukturen (beispielsweise Wasserstoff, CO₂) sowie das Abdecken der hohen Anfangsinvestitionen (Überwinden des „Tal des Todes“) von Demonstrationsanlagen. Dies erfordert ohne Frage hohe unterstützende Investitionen seitens des Staates. Die durch das Mitte 2020 verabschiedete Konjunkturprogramm des Bundes ausgelösten Impulse für die Transformation des Industriesystems müssen mit Blick auf eine Zielerreichung dafür nicht nur konsequent fortgesetzt, sondern auch deutlich erweitert werden. Entsprechende Investitionen zahlen sich aber nicht nur durch das Erreichen ambitionierter Klimaschutzziele aus, sondern auch durch technische Entwicklungen, die Deutschland große Exportchancen auf den wachsenden internationalen Klimaschutzmärkten eröffnen. Von hoher Bedeutung sind zudem flankierende Maßnahmen zur Sicherstellung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen, um eine Verlagerung von Produktion und damit verbundenen Emissionen ins Ausland („carbon leakage“) zu vermeiden. Notwendig ist zudem der Aufbau von grünen Produktmärkten (beispielsweise grüner Stahl), um über das Nutzen der Marktkräfte eine hinreichend hohe Dynamik zu erzeugen.

Mobilitätswende

Die Treibhausgasemissionen im **Verkehr** stagnierten in den letzten 30 Jahren auf hohem Niveau. Für durchschlagende Erfolge in Richtung Klimaneutralität ist es zentral Verkehre zu reduzieren, die verbleibenden Mobilitätsbedarfe soweit wie möglich auf den Umweltverbund aus Fuß- und Radverkehr sowie öffentlichem Verkehr

zu verlagern und die Effizienz der Verkehrsmittel deutlich zu verbessern. Daneben muss die Fahrzeugflotte möglichst schnell vollständig elektrifiziert werden. Dies gilt vor allem für Pkw aber soweit möglich auch den Güterverkehr (insbesondere leichte Nutzfahrzeuge). Für größere Lkw ist eine Umstellung auf Brennstoffzellen und damit Wasserstoffantrieb eine Option. Aufgrund der üblichen Fahrzeuglebensdauern von rund zehn Jahren ist für den notwendigen umfassenden Umbau innerhalb von fünfzehn Jahren keine lange Übergangszeit mehr erlaubt. Verbleibende konventionelle Fahrzeuge (vor allem im Bereich des Güterverkehrs) und der Luftverkehr müssten mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden. Im Güterverkehr ist zudem der Aufbau einer Oberleitungsstruktur entlang der Autobahnen eine sinnvolle Option, um eine weitgehende Elektrifizierung zu erreichen. Im Einzelnen sind folgende Maßnahmen und Instrumente im Verkehrsbereich zentral:

- (1) **Personenverkehr reduzieren:** Verkehrsvermeidende Stadt- und Raumplanung, Anreize gegen Zersiedelung, Förderung virtueller Mobilität, Verteuerung von Flugverkehr etc. können eine Reduktion um bis zu 20 Prozent ermöglichen.
- (2) Verkehr vom **motorisierten Individualverkehr auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel verlagern:** Durch massiven Ausbau von öffentlichem Verkehr, Rad- und Fußwegeninfrastrukturen und Sharing-Angeboten scheint es möglich, die **Verkehrsleistung des Umweltverbands bis 2035 zu verdoppeln:** unterstützen können Push-Faktoren wie Tempolimits, höhere Preise für das Parken und eine Umverteilung von Straßenraum zugunsten von ÖPNV, Rad- und Fußverkehr. Hierdurch kann die Attraktivität des Autoverkehrs verringert, das „Mitfahren“ in geteilten Fahrzeugen gefördert und der **Pkw-Verkehr um die Hälfte reduziert** werden. Hinsichtlich der Verwendung staatlicher Investitionen ist dafür ein Paradigmenwechsel erforderlich. So braucht es **für den öffentlichen Verkehr eine Verdopplung der Förderungen auf ca. 24 Mrd. Euro pro Jahr** und eine **Erhöhung der Investitionen ins Schienennetz auf rund 12 Mrd. Euro pro Jahr**.
- (3) **Güterverkehr reduzieren:** Durch Förderung regionaler Wirtschaftskreisläufe, Vermeidung von Leerfahrten durch intelligente Steuerung und die Verteuerung von Lkw-Transporten ließe sich ein Reduktionspotenzial von etwa 5 bis 10 Prozent erschließen.
- (4) **Lkw-Verkehr auf die Schiene verlagern:** Durch Engpassbeseitigungen im Schienennetz, Reaktivierung von Gleisanschlüssen und automatisierte Hubs für den kombinierten Güterverkehr und die Verteuerung von Lkw-Transporten ist eine **Verlagerung von bis zu 30 Prozent** möglich.
- (5) **Schnelle und flächendeckende Elektrifizierung der Fahrzeuge:** Durch flächendeckenden Umstieg auf Batteriebetrieb bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen, auf Brennstoffzellen oder Hybridbetrieb bei Lkw sowie für Sattelzüge den **Aufbau von Oberleitungen auf Autobahnen von durchschnittlich 550 km pro Jahr**.
- (6) **Umstellung verbleibender Verbrennungsantriebe auf synthetische Kraftstoffe spätestens bis 2035:** dies gilt vor allem für den Flugverkehr und Teile des Schwerlastverkehrs, die nicht elektrifiziert werden können. Aufgrund der hohen Energieverluste bei der Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen sollten diese

grundsätzlich nur dort eingesetzt werden, wo sich keine anderen Möglichkeiten ergeben.

(7) Für den Übergang und zur Erleichterung der Transformation: die **Fahrzeugeffizienz konventioneller Pkw kann um 30 Prozent** (Trendwende bei Pkw-Gewicht und Abkehr von der heute üblichen Übermotorisierung) und von **Lkw um 25 Prozent gesteigert werden**, unter anderem durch weiterentwickelte CO₂-Flottengrenzwerte und progressive Kfz-Steuern. Auch bei neuen Antriebssystemen (Elektrofahrzeuge, Brennstoffzellen) sind Effizienzsteigerungen möglich, müssen Recyclingsysteme eingeführt und für die Herstellung notwendige kritische Materialien möglichst ersetzt werden.

(8) Ebenso sind im Schiffs- und Flugverkehr entsprechende Wenden weit jenseits aktueller Fahrpläne erforderlich. Diese können erzielt werden durch Verkehrsreduktion, Streckenverkürzung, Einhalten von Emissionsgrenzwerten sowie Wechsel der Antriebssysteme und Energieträger.

Die Mobilitätswende als notwendiges konsequentes Zusammenspiel von Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und Verbesserung der Verkehrsabläufe erfordert massive Eingriffe in bestehende Strukturen. Vor allem ist eine vollständige Abkehr des seit Jahrzehnten aufrechterhaltenen Paradigmas autogerechter Städte notwendig. Diese Maßnahmen tragen maßgeblich dazu bei, die Energiewende im Verkehr, also den Einsatz alternativer Antriebe und Kraftstoffe und des damit verbundenen Infrastrukturbedarfs und den Aufbau von Produktionsstrukturen, erreichbarer werden zu lassen. Zu beachten ist dabei, dass durch die dargestellten Veränderungen parallel eine deutliche Verbesserung der Luftqualität in den Städten und eine Erhöhung der Lebens- und Wohnqualität in urbanen Räumen erzielt werden kann.

Wärmewende

Im **Gebäudebereich** ist die in den vergangenen Jahren beobachtete **energetische Sanierungsrate** von circa 1 Prozent des Bestands pro Jahr **deutlich zu niedrig**, um eine zeitnahe Treibhausgasneutralität zu erreichen. Eine vollständige oder auch nur weitgehende Abdeckung des Heiz- und Warmwasserbedarfs des Gebäudebestandes durch erneuerbare Energien erscheint in Deutschland ohne eine deutliche Steigerung der Sanierungsrate aufgrund der begrenzten Potenziale ausgeschlossen.

(1) Daher **müssten bis 2035 jährlich circa 4 Prozent aller Gebäude energetisch saniert werden**. Dies wäre ein historisch noch nie erreichter Umfang und läge auch **deutlich über dem politischen Ziel der Bundesregierung von 2 Prozent**. Dabei sollten idealerweise der Passivhausstandard oder mindestens der KfW-Effizienzhaus 55-Standard eingehalten werden.

(2) Die gegenwärtig dominierenden **Heizungen auf Basis fossiler Energieträger** müssten primär **durch Wärmepumpen, solarthermische Kollektoranlagen oder grüne Nah- bzw. Fernwärme ersetzt** werden.

(3) Für voraussichtlich unvermeidliche **Restbestände** fossiler Heizungsanlagen muss eine Versorgung über **synthetische Energieträger** erfolgen. Je geringer diese ausfallen und je umfassender die Gebäudedämmung verbessert wird, desto realistischer erscheint die Bedarfsdeckung. Müsste der aktuelle Bedarf an Mineralölprodukten und Erdgas in Wohn- und Nichtwohngebäuden (ca. 550 TWh pro Jahr) zu

sehr großen Anteilen durch synthetische Energieträger abgedeckt werden, würde dies aufgrund der mit ihrer Herstellung verbundenen Umwandlungsverluste zu erheblichen Ineffizienzen und Kosten führen (dies gilt im Übrigen auch für einen entsprechenden Ersatz von Mineralölprodukten im Verkehr, die derzeit jährlich rund 700 TWh ausmachen). Stark steigende Einsatzmengen biogener Energieträger scheinen ebenso kaum möglich, allein aufgrund der Flächenkonkurrenzen sowie möglicher negativer ökologischer und sozialer Auswirkungen.

Um eine derartige Steigerung der Sanierungsrate zu ermöglichen, wäre ein sehr konsequentes und umfassendes Anreizsystem von Fördern und Fordern von energetischen Sanierungsmaßnahmen auf Basis gebäudeindividueller Sanierungsfahrpläne notwendig, eine bundesweit flächendeckende Sanierungssteuerung, ein konsequentes Monitoring und eine massive Qualifizierungs- und Kommunikationsoffensive. Neuartige Methoden wie das Erstellen digitaler Abbilder der Gebäude und eine industrielle Vorfertigung der Sanierungsmaßnahmen können wichtige und beschleunigende Beiträge leisten. Auch Suffizienzmaßnahmen können wichtige Beiträge leisten, wenn es beispielsweise durch einen Wohnungstausch zwischen Generationen gelingt, den Trend nach immer größeren Wohnungen zu stoppen.

Klimaneutralität als gesamtgesellschaftliche Aufgabe

Die skizzierten vielfältigen parallelen Herausforderungen zur Zielerreichung bis 2035 in allen Sektoren stellen jeweils für sich alleine schon große Herausforderungen dar und erfordern beispiellose politische Anstrengungen und ein hohes Maß an Bereitschaft der Unternehmen, den Transformationsprozess mitzugestalten. Angemessene Beiträge zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze sind aber vor allem nur mit einer breiten Zustimmung und Teilhabe der Gesellschaft möglich. Es sind daher weniger die technischen Grenzen, die über Erfolg oder Misserfolg entscheiden werden, sondern der entsprechende gesellschaftliche und politische Wille. Ist dieser gegeben, stehen der Zielerreichung keine unüberwindlichen Hindernisse entgegen.

2 Einleitung

Hintergrund der Studie

Mit dem Pariser Klimaschutzabkommen von 2015 (UNFCCC 2015) haben sich die Staaten der Erde völkerrechtlich verbindlich zu Maßnahmen verpflichtet, damit

„[...] der Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau gehalten wird und Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, da erkannt wurde, dass dies die Risiken und Auswirkungen der Klimaänderungen erheblich verringern würde“ (UNFCCC 2015, Art 2, Abs. 1a).

Seit dem Abschluss des Pariser Abkommens wurde wissenschaftlich nochmals deutlicher, welche schwerwiegenden Folgen eine Überschreitung der 1,5-°C-Grenze hätte. Die 1,5-°C-Grenze einzuhalten verlangt weltweit eine Transformation fast aller Bereiche der Wirtschaft in vergleichsweise sehr kurzer Zeit. Im Pariser Abkommen wurde vereinbart, dass Industrieländer wie Deutschland aufgrund ihrer relativ großen technologischen Möglichkeiten noch schneller vorangehen sollen als Entwicklungsländer. Um wie viel schneller ist eine Frage der Verteilungsgerechtigkeit. Die Ermittlung nationaler CO₂-Budgets bietet eine fundierte Grundlage, von der aus eine Aufteilung des globalen CO₂-Budgets auf politischer Ebene erfolgen kann. Hierbei finden rechtliche, politische und moralische Fragen Einzug. Die vorliegende Studie orientiert sich hierzu an der Sichtweise des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU). Ausgehend von dem vorhandenen globalen CO₂-Budget erscheint die auch von Fridays for Future Deutschland geäußerte Forderung deutscher CO₂-Neutralität bis 2035 zur Einhaltung der globalen 1,5-°C-Grenze³ schlüssig. Auch aus internationaler Perspektive dürfte ein derartiger deutscher Beitrag als erforderlich erachtet werden.

Ausgehend davon setzt sich die vorliegende Studie mit der Frage auseinander, welche Umstellungen in der Energiewirtschaft, im Verkehr, beim Heizen und in der Industrie notwendig wären, um die CO₂-Emissionen bis 2035 tatsächlich auf Null oder zumindest nahezu Null zu reduzieren. Insbesondere ermöglicht die Studie einen Überblick, welche Zielmarken für einen beschleunigten Klimaschutzpfad bis 2035 sinnvoll erscheinen und nennt potenzielle Maßnahmen für die Umsetzung eines solchen Pfades. Durch Vergleich der hier gefundenen Zielmarken mit den Zielen der Bundesregierung leistet die Studie einen Beitrag zur Diskussion um das Ambitionsniveau der deutschen Klimapolitik.

Methodik der Studie und Grenzen ihrer Aussagekraft

Die Studie fokussiert sich bewusst auf die notwendige Transformation in Deutschland. Zum einen soll durch diese Fokussierung erreicht werden, dass die hierzulande gegebenen Handlungsnotwendigkeiten und -möglichkeiten klar herausgearbeitet werden und damit ein konkreter Beitrag zu dem politischen und gesellschaftlichen Diskurs über angemessene Klimaschutzmaßnahmen geleistet werden kann. Zum anderen ist zu beachten, dass Deutschland wegen seiner technologischen, wirtschaftlichen und politischen Möglichkeiten im internationalen Klimaschutz einen ambiti-

³ Diese Forderung lässt sich aus den Ergebnissen des „Sonderbericht 1,5 °C globale Erwärmung“ des IPCC (2018a) ableiten, wie Kapitel 3 der Studie zeigt.

onssteigernden Einfluss haben kann, der weit über die deutschen Emissionen hinausgeht. Der Erfolg eines wirksamen Einsatzes Deutschlands auf internationaler Ebene für ambitionierten globalen Klimaschutz dürfte jedoch stark davon abhängen, wie schnell und weitgehend die Emissionen in Deutschland selbst gesenkt werden.

Die Auswirkungen eines in dieser Studie skizzierten beispiellos schnellen Umbaus großer Teile des Wirtschaftssystems mit den einhergehenden radikalen strukturellen Veränderungen müssen sorgsam reflektiert werden. Denn mit einer unreflektierten Umsetzung einer solchen Transformation könnten Verschärfungen sozialer Ungleichheiten und Benachteiligungen einzelner gesellschaftlicher Gruppen einhergehen. Diese Risiken sollten frühzeitig beachtet werden, um den Umbau von vornherein gesellschaftlich möglichst fair zu gestalten. Eine tiefgehende Diskussion der genauen Ausgestaltung politischer Maßnahmen zur Berücksichtigung dieser Risiken übersteigt jedoch den Umfang der vorliegenden Arbeit. Diverse wissenschaftliche Untersuchungen beschäftigen sich mit der Vermeidung von Ungleichheitsverschärfungen durch Klimaschutzmaßnahmen und mit Akzeptanzfragen (unter anderem Held 2017, Local Energy Consulting 2020, Sovacool & Brisbois 2019, Sovacool et al. 2019). Der bekannteste politische Ansatz hierfür ist das von den Gewerkschaften geprägte Konzept der „Just Transition“ (ILO 2015), das sowohl die umfängliche Absicherung von Beschäftigten in fossilen Branchen als auch die Schaffung von qualitativ hochwertigen, grünen Jobs zum Ziel hat.

Eine wichtige Grundlage der Studie stellt eine Metaanalyse von vorliegenden Klimaschutzszenarien für Deutschland dar, die auf der Basis von Energiesystemmodellen Pfade hin zu (weitgehender) Treibhausgasneutralität bis 2050 skizzieren. Da bisher keine detailliert ausgearbeiteten Szenarioanalysen für eine CO₂-Neutralität bis zum Jahr 2035 vorliegen, ermöglicht die Metaanalyse als wichtiger Startpunkt und wissenschaftlich abgesicherte Grundlage ein Verständnis darüber, wie nach heutigem Wissensstand ein klimaneutrales Energiesystem grundsätzlich aussehen könnte und welche zentralen Strategien für dessen Realisierung verfolgt werden müssten. Auf dieser Grundlage wird für die Energiewirtschaft und die Endenergiesektoren Industrie, Verkehr und Gebäude jeweils diskutiert, welche Veränderungen erforderlich wären, um nicht erst 2050, sondern bereits 2035 den CO₂-Ausstoß auf Null oder zumindest nahezu Null zu reduzieren. Dabei wird deutlich, dass moderate Veränderungen für das Erreichen von CO₂-Neutralität bis zum Jahr 2035 bei weitem nicht ausreichen werden, sondern dass es eines unmittelbaren Transformationsschubs bedarf, um in relativ kurzer Zeit den notwendigen grundlegenden Umbau der Energieversorgung, der Industrie, des Verkehrs und der Gebäude erreichen zu können. Die Studie benennt dabei auch zentrale Hemmnisse und Risiken, die für eine beschleunigte Transformation überwunden bzw. minimiert werden müssten.

Die vorliegende Studie thematisiert eine mögliche beschleunigte Transformation des Energie- und Industriesystems. Der CO₂-Ausstoß in diesen Bereichen steht für annähernd 100 Prozent des deutschen CO₂-Ausstosses und knapp 90 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2020a). Die restlichen Emissionen, die hier nicht diskutiert werden können, entstehen insbesondere in der Landwirtschaft. Auch mögliche Wechselwirkungen zwischen Energiewende und Landwirtschaft bzw. Ernährungssicherheit und Agrarwende sind nicht Gegenstand der Studie, sollten allerdings bei konkreten energie- und klimapolitischen Entscheidungen berücksichtigt

werden. Schließlich diskutiert die vorliegende Studie auch nicht die vielfältigen potenziellen Vorteile und Chancen, die eine Transformation hin zu einem klimaneutralen Energiesystem – zusätzlich zum zentralen Ziel der Vermeidung eines gefährlichen Klimawandels – mit sich bringen würde.⁴

Mit ihren Analysen will die vorliegende Studie aufzeigen, wie stark die bisher eingeleiteten oder geplanten Maßnahmen beschleunigt werden müssen, um einen Beitrag zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze leisten zu können. Dabei möchte sie auch Voraussetzungen für eine solche Beschleunigung aufzeigen. Die Studie gibt aber keinen konkreten Weg vor oder priorisiert einzelne Handlungsoptionen und formuliert kein in sich konsistentes Szenario für das Jahr 2035. Dies bleibt künftigen Untersuchungen vorbehalten, die hierfür auch einen Austausch zwischen Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft suchen sollten.

⁴ So könnte beispielsweise durch eine frühzeitige Transformation ein attraktiver Standort für zukunftssträchtige Branchen und Unternehmen geschaffen werden und somit neue Arbeitsplätze entstehen. Und ein beschleunigter Ausstieg aus der Verbrennung fossiler Energieträger würde infolge einer saubereren Luft zu positiven Effekten auf die menschliche Gesundheit führen.

3 Was erfordern die Ziele des Pariser Klimaabkommens?

Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, also den Anstieg der Erdtemperatur auf deutlich unter 2 °C und möglichst nicht über 1,5 °C zu begrenzen, **muss der weltweite Ausstoß klimaschädlicher Gase schnell auf Nettonull gebracht werden.**

Entscheidend für das Ausmaß der Erderwärmung ist die Menge an Treibhausgasen, die auf dem Weg bis zur Klimaneutralität insgesamt noch emittiert wird. Der IPCC hat die CO₂-Menge, die zur Einhaltung der Pariser Ziele weltweit noch ausgestoßen werden darf – also das verbleibende globale CO₂-Budget – für seinen Sonderbericht zu einer globalen Erwärmung um 1,5 °C ermittelt. Die Höhe dieses Budgets hängt dabei von der angestrebten Begrenzung des Temperaturanstiegs (zum Beispiel auf 1,5 °C oder auf 1,75 °C) ab sowie von der Wahrscheinlichkeit, mit der dieser nicht überschritten wird.

Aus klimawissenschaftlicher Sicht kann argumentiert werden, dass eine Orientierung am 1,5-°C-Ziel angestrebt werden sollte, da die Begrenzung der Erderwärmung auf unter 1,5 °C die Risiken und negativen Auswirkungen des Klimawandels gegenüber einer stärkeren Erwärmung erheblich verringern kann.

Auf Basis der IPCC-Berechnungen hat sich der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) zu Beginn des Jahres 2020 mit der Frage beschäftigt, wie hoch das verbleibende CO₂-Budget für die Bundesrepublik Deutschland angesetzt werden kann. Damit einher gehen Fragen zur gerechten Verteilung des globalen Budgets, die letztlich politischer und moralischer Natur sind und sich wissenschaftlich nicht eindeutig beantworten lassen. Der SRU hat ein deutsches CO₂-Budget auf Grundlage der verbreiteten Annahme abgeleitet, dass **das verbleibende CO₂-Budget ab Verabschiedung des Pariser Klimaabkommens gleichmäßig unter allen Menschen der Erde aufgeteilt wird.**

Um das 1,5-°C-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent zu erreichen, bleibt Deutschland gemäß SRU ab 2020 noch ein Restbudget von 4,2 Gt CO₂.

Würden die deutschen CO₂-Emissionen konstant auf dem Niveau von 2019 bleiben, wäre dieses Budget bereits 2026 aufgebraucht. **Reduziert Deutschland seine Emissionen jedes Jahr um die gleiche Menge (lineare Reduktion), müsste es bis 2032 klimaneutral sein**, um das Budget einzuhalten. Werden die Emissionen nicht linear, sondern zu Beginn stärker reduziert, kann der Zeitpunkt, an dem THG-Neutralität erreicht werden muss, weiter nach hinten in den Bereich von 2035 geschoben werden.

Unabhängig vom konkreten Reduktionsverlauf **zeigt ein einfacher Vergleich mit den aktuellen Klimazielen der Bundesregierung, dass eine erhebliche Zielverschärfung notwendig ist**, um das vom SRU berechnete CO₂-Budget einzuhalten und einen entsprechenden Beitrag Deutschlands zur Erreichung des 1,5-°C-Ziels zu gewährleisten. Auch mit einem angemessenen Beitrag für eine Begrenzung auf 1,75 °C sind die bisherigen Ziele der Bundesregierung demnach nicht kompatibel.

Das Pariser Klimaziel

Die Vertragsparteien des Pariser Klimaabkommens einigten sich völkerrechtlich verbindlich darauf, dass

„[...] der Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau gehalten wird und Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, da erkannt wurde, dass dies die Risiken und Auswirkungen der Klimaänderungen erheblich verringern würde“ (UNFCCC 2015, Art 2, Abs. 1a).

So könnte eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C statt auf 2 °C beispielsweise

„[...] die Anzahl der Menschen, die sowohl klimabedingten Risiken ausgesetzt als auch armutsgefährdet sind, bis zum Jahr 2050 um mehrere hundert Millionen senken“ (IPCC 2018b, B.5.1, S. 13).

Der CO₂-Budget-Ansatz

Politische Klimaschutzziele werden häufig als Ziel zu einem bestimmten Zeitpunkt formuliert. Für das Ausmaß der Erderwärmung ist jedoch die Höhe der Emissionen zu einem bestimmten Zeitpunkt weniger wichtig als die Höhe der Emissionen, die über den gesamten Zeitraum bis zu einem bestimmten Jahr (kumuliert) ausgestoßen werden. Expertinnen und Experten sprechen deshalb von einem Treibhausgasemissions- bzw. einem CO₂-Emissionsbudget, das noch zur Verfügung steht, um das Pariser Klimaziel zu erreichen.

Das globale CO₂-Budget

Der IPCC ermittelte in seinem 2018 veröffentlichten „Sonderbericht 1,5 °C globale Erwärmung“ das global noch verbleibende CO₂-Budget für verschiedene Erwärmungsobergrenzen.⁵ Demnach dürften ab 2018 weltweit noch 1040 Gt CO₂ ausgestoßen werden, um den Temperaturanstieg mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent auf 1,75 °C, also *deutlich unter 2 °C*, zu begrenzen. Um diese Wahrscheinlichkeit auf 67 Prozent zu erhöhen, muss das Budget auf 800 Gt herabgesetzt werden.

Soll die Erderwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent auf 1,5 °C begrenzt werden, beträgt das globale CO₂-Budget ab 2018 noch 580 Gt CO₂, bei einer 67-prozentigen Wahrscheinlichkeit nur noch 420 Gt. Zum Vergleich: Aktuell werden weltweit ca. 42 Gt CO₂ pro Jahr emittiert (Friedlingstein et al. 2019), das heißt das Budget wäre bei gleichbleibenden Emissionen bereits in zehn Jahren aufgebraucht.

Mögliche Rückkopplungs- und Verstärkungseffekte im Erdsystem, wie sie beispielsweise durch das Tauen der Permafrostböden der Tundra und Taiga erwartet werden und teilweise auch schon eintreten, sind in diesen Budgets noch nicht vollständig berücksichtigt. Ihr Einbezug könnte die Budgets um weitere ca. 100 Gt CO₂ mindern (IPCC 2018c, Tabelle 2.2, S. 108). Ebenfalls unberücksichtigt bleiben denkbare zukünftige negative Emissionen, zum Beispiel durch die technische Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre oder eine großmaßstäbliche Wiederaufforstung.

⁵ Dabei trifft der IPCC für die Ableitung dieses CO₂-Budgets eine Annahme über die Möglichkeit der zukünftigen Minderung der Emissionen der anderen (also der Nicht-CO₂-) Treibhausgase (IPCC 2018b, Abb. SPM.3a und IPCC 2018c, Abs. 2.2.2.2).

Das deutsche CO₂-Budget

Der Anteil des Emissionsbudgets, der auf ein einzelnes Land entfällt, hängt von Annahmen zur Verteilungsgerechtigkeit ab, wobei das Pariser Klimaabkommen völkerrechtlich verbindend festlegt, dass die wohlhabenderen Länder eine größere Verantwortung zur THG-Reduktion tragen als die ärmeren Länder (Art. 2, Abs. 2 und Art. 4, Abs. 4). Der Sachverständigenrat der Bundesregierung für Umweltfragen (SRU) leitete Anfang 2020 in seinem Umweltgutachten (SRU 2020) zwei verschiedene nationale CO₂-Budgets für Deutschland ab. Dabei bezog er sich auf die Berechnungen des IPCC zu den global noch verfügbaren CO₂-Emissionsbudgets.

Tabelle 3-1 Globale und deutsche CO₂-Budgets

		Erderwärmung von 1,75 °C	Erderwärmung von 1,5 °C
Verbleibendes globales CO ₂ -Budget in Gt CO ₂ ab 01.01.2018	67 Prozent Wahrscheinlichkeit, die Grenze einzuhalten	800	420
	50 Prozent Wahrscheinlichkeit, die Grenze einzuhalten	1040	580
Verbleibendes deutsches CO ₂ -Budget in Gt CO ₂ ab 01.01.2020	67 Prozent Wahrscheinlichkeit, die Grenze einzuhalten	6,7	2,5*
	50 Prozent Wahrscheinlichkeit, die Grenze einzuhalten	9,3*	4,2

*eigene Abschätzung

Quellen: Basierend auf IPCC (2018a) und SRU (2020).

Angelehnt an das Pariser Klimaabkommen von Ende 2015 legt der SRU den Berechnungsbeginn auf 2016 und teilt ab diesem Zeitpunkt allen auf der Erde lebenden Menschen das gleiche Pro-Kopf-Emissionsrecht zu. Die überdurchschnittlichen historischen Emissionen Deutschlands bleiben somit unberücksichtigt. Unter Abzug der zwischen 2016 und 2019 in Deutschland verursachten Emissionen ergibt sich für die Einhaltung der 1,5-°C-Grenze mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent ein deutsches CO₂-Budget von 4,2 Gt ab Anfang 2020. Bei gleichbleibenden Emissionen des Jahres 2019 wäre dieses Budget im Jahr 2026 aufgebraucht, bei linearer Reduktion im Jahr 2032. Geht man dagegen von der 1,75-°C-Grenze aus (mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 Prozent)⁶, beträgt das Budget 6,7 Gt CO₂ ab 2020. Dieses wäre bei gleichbleibenden Emissionen im Jahr 2029 verbraucht, bei linearer Reduktion im Jahr 2038.⁷

Aus klimapolitischer Sicht kann argumentiert werden, dass viel dafür spricht, sich an der 1,5-°C-Grenze zu orientieren. Der IPCC-Sonderbericht von 2018 verdeutlicht, dass die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C die negativen Folgen und Risiken

⁶ Der SRU setzt für das 1,75-°C-Budget eine höhere Wahrscheinlichkeit an, da für die Erreichung dieses Mindestziels eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit unzureichend erscheint (SRU 2020).

⁷ Die Emissionen der übrigen Treibhausgase, die gegenwärtig rund 12 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen ausmachen (UBA 2020a), müssten ebenfalls deutlich sinken.

des Klimawandels gegenüber einer stärkeren Erwärmung erheblich verringern kann. Auch legt das im europäischen und internationalen Recht verankerte Vorsorgeprinzip nahe, sich an der unteren Grenze der Budgetbreite und damit am 1,5-°C-Budget zu orientieren, um irreversible Schäden der menschlichen Lebensgrundlagen vorzubeugen (Artikel 191 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union und Artikel 3, Abs. 3 Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen). Analysen zeigen zudem, dass auf globaler Ebene die Kosten für das Einhalten der 1,5-°C-Grenze aufgrund der vermiedenen Schäden und des geringeren Anpassungsbedarfs vermutlich deutlich geringer sind als die Kosten, die durch eine höhere Erwärmung entstehen (zum Beispiel Chen et al. 2020).

Die vom SRU gewählte Zuteilung des global noch verbleibenden CO₂-Budgets nach Bevölkerungsanteil stellt eine von mehreren Möglichkeiten dar, Emissionsrechte auf die verschiedenen Länder zu verteilen. Andere Verteilungsschlüssel, nach denen Deutschland ein größeres oder kleineres Restbudget zugeteilt werden würde, werden ebenfalls in der Wissenschaft und der internationalen Klimapolitik diskutiert.

Vorgeschlagen wird so beispielsweise, dass das globale CO₂-Budget so aufgeteilt wird, dass die Relation der spezifischen Pro-Kopf-Emissionen der einzelnen Länder zukünftig konstant bleibt, was allerdings als eine Verletzung des Pariser Abkommens angesehen werden kann.⁸ Demnach dürfte Deutschland pro Kopf weiterhin etwa doppelt so viele Emissionen ausstoßen wie der weltweite Durchschnitt. Diesem Ansatz folgend würde Deutschland ein höheres CO₂-Budget zur Verfügung stehen als vom SRU berechnet und hätte dieses bei linearer Reduktion statt 2032 erst um 2040 herum aufgebraucht (Mehr Demokratie & BürgerBegehren Klimaschutz 2020). Selbst dies wäre allerdings immer noch deutlich früher als derzeit von der Bundesregierung angestrebt. Abgesehen davon erscheint es unrealistisch, dass Länder des globalen Südens in der Lage sein sollten, ihre Emissionen so stark zu reduzieren, dass ohne einen größeren Beitrag der Länder des globalen Nordens (als nach dieser Aufteilung vorgesehen) die 1,5-°C-Grenze noch eingehalten werden könnte.

Andersherum erhielte Deutschland einen nochmals geringeren Anteil am verbleibenden globalen CO₂-Budget als vom SRU vorgeschlagen, wenn die hohen historischen Emissionen der frühindustrialisierten Länder bei der Berechnung der länderspezifischen Restbudgets berücksichtigt würden. Deutschland stünde nach einem solchen Konzept aufgrund seines historisch hohen Beitrags zur Erderwärmung in der Verantwortung, seine Emissionen deutlich schneller auf Netto-Null zu reduzieren als im weltweiten Durchschnitt.⁹ Ebenso ließe sich aus den historischen Emissionen eine Verpflichtung zur Unterstützung gegenüber ärmeren Ländern und solchen mit historisch geringeren Treibhausgasemissionen ablesen. Ansätze solcher Unterstützungsleistungen finden sich im Pariser Abkommen und der Ausgestaltung des Green Climate Funds.

⁸ Sinngemäß haben die beteiligten Länder des Pariser Abkommens vereinbart, dass die hochindustrialisierten Länder bei der Emissionsreduktion den anderen Ländern vorangehen sollen (Art. 2, Abs. 2 und Art. 4, Abs. 4 Übereinkommen von Paris).

⁹ Für die Berücksichtigung historischer Emissionen bei der Verteilung des globalen Budgets gibt es verschiedene Berechnungsansätze (siehe zum Beispiel Gignac & Matthews 2015, Robiou du Pont et al. 2017).

Inwieweit der vom SRU verwendete Pro-Kopf-Ansatz gerecht erscheint, ist damit weniger eine naturwissenschaftliche als eine politische und moralische Frage, bei der die internationale Perspektive zu berücksichtigen ist.

Aus internationalem Blickwinkel ergibt sich mit der Möglichkeit der Umverteilung verbleibender Emissionen durch einen Zertifikatehandel noch eine weitere Dimension. Eine international und auch von den gering emittierenden Ländern als gerecht empfundene Verteilung der global verbleibenden Emissionsrechte könnte durch Handelbarkeit dieser Rechte noch verändert werden. Befürwortende einer solchen Handelbarkeit von Emissionsrechten argumentieren, dass auf diese Weise die globalen Emissionen dort reduziert werden können, wo dies am kostengünstigsten möglich ist. Demnach könnten Deutschland und weitere hochindustrialisierte Länder auch bei einer Pro-Kopf-CO₂-Budgetaufteilung gemäß SRU erst später als etwa 2035 Netto-Null erreichen, sofern sie Emissionsrechte von Ländern zukaufen können, die aufgrund ihrer geringeren Pro-Kopf-Emissionen noch über 2035 hinaus emittieren können. Abgesehen von der gegenwärtig schwer vorstellbaren weltweiten politischen Bereitschaft zur Einführung eines internationalen Zertifikatehandels, ist die Idee einer internationalen Handelbarkeit von Emissionsrechten umstritten (Page 2013), da sie unter anderem global ungerechte Entwicklungen und neokolonialistische Verhaltensweisen fortführen könnte (Bumpus & Liverman 2010, Cabello & Gilbertson 2012, Dehm 2016). So besteht die Gefahr, dass ärmere Länder einen Teil ihrer Emissionsrechte deutlich unter Wert verkaufen – beispielsweise aufgrund eines dringenden Devisenbedarfs oder auch infolge politischen Drucks aus dem Ausland – und somit die mittel- bis langfristigen Entwicklungsperspektiven des Landes eingeschränkt werden.

In jedem Fall ist anzumerken, dass aufgrund der geringen Höhe des für die 1,5-°C-Grenze verbleibenden Emissionsbudgets der Spielraum für den Zukauf von Emissionsrechten insgesamt sehr begrenzt sein dürfte. Selbst wenn also in Zukunft ein gewisser Kauf zusätzlicher Emissionsrechte im Ausland möglich und ethisch vertretbar sein sollte, ist nicht damit zu rechnen, dass dies einen wesentlichen Aufschub der Transformation des Energiesystems gegenüber dem in dieser Studie skizzierten Pfad ermöglicht.

Eine weitere grundsätzliche Möglichkeit, den Zeitpunkt hinauszuzögern, ab dem keine CO₂-Emissionen mehr zugelassen sind, ergibt sich durch das Prinzip der negativen Emissionen. Grundgedanke ist, dass CO₂ der Atmosphäre entzogen wird und hierdurch an anderer Stelle entstehende Emissionen kompensiert werden, netto entsprechend Null-Emissionen entstehen. Technisch kann dies beispielsweise durch eine Kopplung der (vorzugsweise primär stofflichen und höchstens anschließend energetischen) Nutzung von – sinnvollerweise nachhaltig produzierter – Biomasse mit fester Kohlenstoffabtrennung¹⁰ oder CO₂-Abtrennung und Speicherung (CCS: Carbon Capture and Storage), durch eine Kopplung von Verfahren der Abtrennung von CO₂ aus der Umgebungsluft (DAC: Direct Air Capture) mit CCS sowie durch die Stärkung

¹⁰ U. a. pyrolytische Erzeugung von Langzeit-stabiler Pflanzenkohle, welche neben anderen Anwendungen zur bodenverbessernden Kohlenstoffspeicherung in Kulturböden genutzt werden kann (Bates & Draper 2018; Schwarzer 2019; Wuppertal Institut 2018b)

natürlicher Senken durch Wiedervernässung von Mooren oder Aufforstungsmaßnahmen¹¹ erreicht werden. Die Nutzung dieser Optionen wird von vielen (gerade in Bezug auf CCS) durchaus kritisch gesehen, andere sehen ohne das Aufgreifen negativer Emissionen keine realistische Option, in angemessener Zeit CO₂-neutral werden zu können.¹² Die Diskussion der Vor- und Nachteile kann an dieser Stelle nicht vertieft werden. Insgesamt muss die Möglichkeit, solche negativen Emissionen in großem Maßstab zu realisieren, aus heutiger Sicht als sehr unsicher angesehen werden (Smith et al. 2016, Lenzi et al. 2018, Low & Schäfer 2020) oder bedarf noch erheblicher Forschungsanstrengungen. Entsprechend soll die sich durch negative Emissionen ergebende Flexibilität in der Gestaltung des Minderungspfades nicht kategorisch ausgeschlossen werden¹³, sie wird im Rahmen dieser Studie aber nicht weiter betrachtet.

1,5-°C-kompatible Entwicklung der deutschen Emissionen

Wird für die weitere Diskussion von der 1,5-°C-Grenze ausgegangen, wäre das entsprechende Budget in Höhe von 4,2 Gt bei einem linearen Reduktionsverlauf im Jahr 2032 aufgebraucht (siehe dreieckige Fläche, Abbildung 3-1). Deutschland müsste also bei einer linearen Reduktion der Emissionen innerhalb der kommenden zwölf Jahre CO₂-neutral werden, um die vom Sachverständigenrat für Umweltfragen abgeleitete Budgetgrenze einzuhalten.

Da die Vermeidung bestimmter Rest-Treibhausgasemissionen (darunter auch CO₂-Emissionen) bis 2032 wohl nicht möglich sein wird, sollten die Emissionen zur Einhaltung des 1,5-°C-Budgets bereits in den nächsten Jahren stärker als linear reduziert werden. Dadurch kann der Zeitpunkt, zu dem CO₂-Neutralität erreicht werden muss, unter Einhaltung des CO₂-Budgets um wenige Jahre auf ca. 2035 nach hinten verschoben werden. Das schnellstmögliche Abstellen aller relativ leicht vermeidbaren Emissionen, wie etwa durch das Abschalten vieler Kohlekraftwerke, ist entsprechend notwendig, um das deutsche 1,5-°C-Budget noch einhalten zu können. Einen beispielhaften Reduktionspfad mit starker Minderung zu Beginn zeigt die geschwungene Kurve in Abbildung 3-1: Obgleich die Emissionskurve über 2032 hinausgeht, entsprechen die kumulierten Emissionen, also die Fläche unter der Kurve, dem hin-

¹¹ Das Gesamtpotenzial von Aufforstungsmaßnahmen ist allerdings umstritten (siehe unter anderem Bastin et al. 2019, Brancalion et al. 2019, Yu et al. 2019, Holl & Brancalion 2020). Zudem müsste bei starker Aufforstung zur Vermeidung von Flächenkonkurrenzen (die zu einer Gefährdung der Ernährungssicherheit besonders verwundbarer Bevölkerungen führen würden) die Erzeugung von Futtermitteln und tierischen Lebensmitteln stark reduziert werden (siehe unter anderem Pfennig 2019, Poore und Nemecek 2018, Nijdam et al. 2012, FAO 2006).

¹² U. a. in der Zementindustrie und der Metallerzeugung gibt es Prozesse, deren Emissionen zwar reduziert, jedoch voraussichtlich nicht vollständig auf Null abgesenkt werden können. Des Weiteren bewirken Verbrennungsflugzeuge – selbst, wenn sie CO₂-neutrale synthetische Kohlenwasserstoffe nutzen sollten – aufgrund der Effekte in der hohen Flughöhe einen relevanten Beitrag zur Klimaerwärmung (Lee et al. 2020). Zudem finden sich auch in der (nicht in dieser Studie berücksichtigten) Landwirtschaft und dort vor allem in der Tierhaltung und beim Anbau mancher Ackerfrüchte Bereiche, in denen eine vollständige Vermeidung der THG-Emissionen aus heutiger Sicht nicht erreichbar ist (sofern diese nicht radikal reduziert und in Richtung Humusaufbau umgestellt wird). Solche – vergleichsweise geringen – Restemissionen können voraussichtlich nur dadurch kompensiert werden, dass CO₂ der Atmosphäre entzogen wird. Hierdurch gleichen sich die Treibhausgaswirkungen aus und das Gesamtergebnis kann als „netto-Null“ bezeichnet werden.

¹³ Auch wenn es umstritten ist, ob deren Einplanung in die Minderungspfade nach dem Pariser Abkommen rechtlich überhaupt zulässig ist, siehe Ekardt et al. (2018).

terlegten Budget. Die Abbildung verdeutlicht, dass der Reduktionspfad entscheidender ist als der Zeitpunkt, zu dem CO₂-Neutralität erreicht wird: Das CO₂-Budget kann sowohl durch eine lineare als auch durch eine zunächst stärkere und anschließend geringere Reduktion eingehalten werden. In jedem Fall müssten aber im Schnitt erheblich größere CO₂-Mengen eingespart werden als im letzten Jahrzehnt.

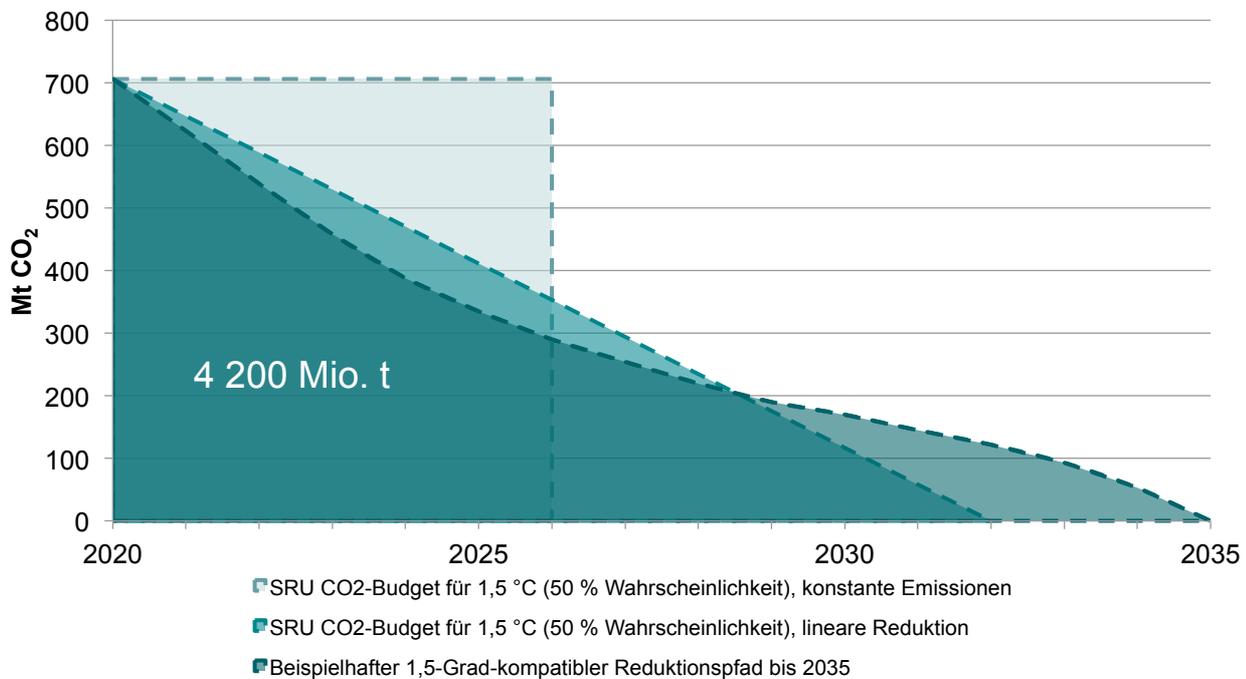


Abbildung 3-1 Beispielhafter Emissionspfad zur Einhaltung des deutschen 1,5-°C-Budgets

Quelle: Basierend auf SRU (2020).

Die Klimaziele der Bundesregierung

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland etwa 800 Mt CO₂-Äquivalente Treibhausgase emittiert. Davon entfielen 31 Prozent auf die Energiewirtschaft, 23 Prozent auf die Industrie, 20 Prozent auf Verkehr, 15 Prozent auf Gebäude, 8 Prozent auf die Landwirtschaft, 1 Prozent auf Abfall und Abwasser und 2 Prozent auf sonstige Quellen. Insgesamt konnte Deutschland seine Emissionen zwischen 1990 und 2019 um etwa 36 Prozent reduzieren. Die größte absolute Reduktion fand in der Energiewirtschaft statt (ca. 180 Mt bzw. 42 Prozent Reduktion). Im Verkehrssektor hingegen gab es gegenüber 1990 keine Reduktion (siehe Abbildung 3-2, vorläufige Werte, UBA 2020b).

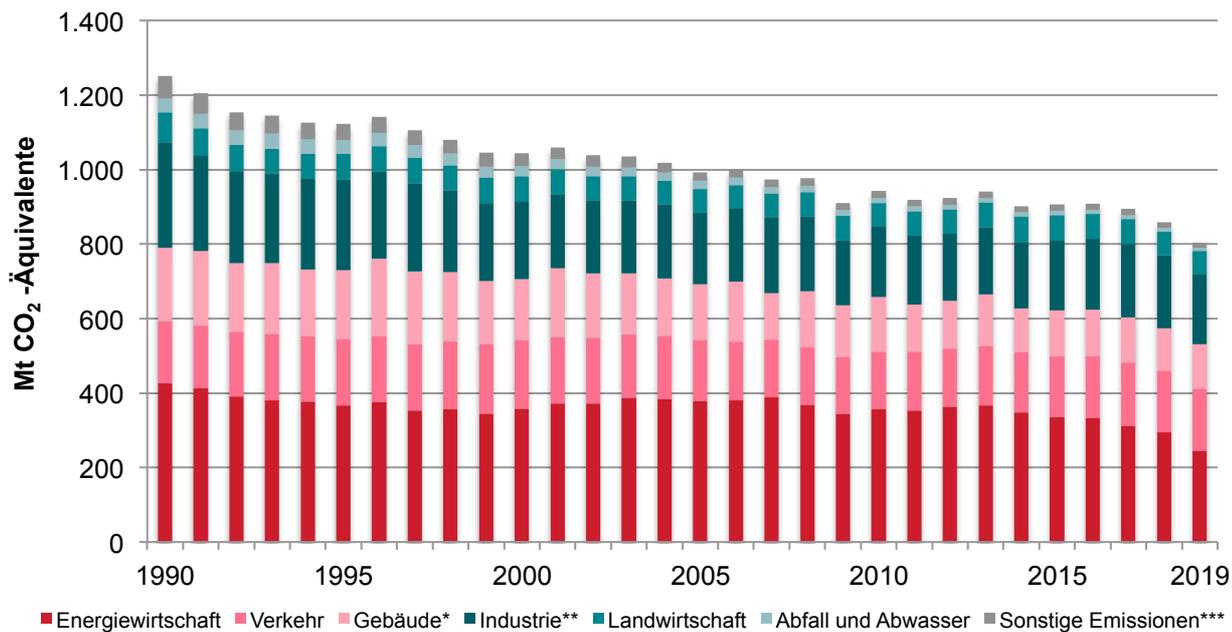


Abbildung 3-2 Entwicklung der THG-Emissionen in Deutschland nach Sektoren¹⁴

Quelle: UBA (2020b).

In ihrem Klimaschutzplan 2050 setzte sich die Bundesregierung das Ziel, Deutschland bis 2050 weitgehend klimaneutral zu machen. Aktuell sind dafür Zwischenziele von –40 Prozent THG-Emissionen gegenüber 1990 bis 2020 und –55 Prozent bis 2030 vorgesehen (BMUB 2016).

Abbildung 3-3 setzt einen den aktuellen Klimazielen entsprechenden Reduktionspfad ins Verhältnis zum deutschen Emissionsbudget. Hierbei ist zu beachten, dass die Klimaziele alle THG-Emissionen umfassen, während das Emissionsbudget ausschließlich CO₂ beinhaltet, wodurch sich eine Ungenauigkeit im Vergleich ergibt. Da CO₂ allerdings im Jahr 2018 88 Prozent der deutschen THG-Emissionen ausmachte (UBA 2020a), erscheint der Vergleich dennoch in erster Näherung aussagekräftig.

In der Abbildung wird die Lücke zu dem auf 1,5 °C zielenden CO₂-Budget (grüne Fläche) besonders deutlich, das bei linearer Reduktion für 2030 schon eine Minderung um etwa 90 Prozent nahelegt. Auch das auf 1,75 °C zielende CO₂-Budget (rosa Fläche) wird mit den aktuellen Klimazielen der Bundesregierung noch deutlich überschritten. Hierfür wäre bei linearer Reduktion bis 2030 bereits eine Minderung der CO₂-Emissionen um knapp 70 Prozent erforderlich.

Das bedeutet, dass die aktuellen deutschen Klimaziele unter Bezugnahme auf den vom SRU vorgeschlagenen Pro-Kopf-Emissionsrechteansatz nicht ausreichend sind, um den nationalen Beitrag für die Begrenzung der Erwärmung auf 1,5 °C zu leisten. Deutschland müsste hierfür seine Ziele deutlich verschärfen und möglichst auch um weitere Zwischenziele ergänzen, um einen nach Berechnung des SRU 1,5-°C-

¹⁴ * umfasst Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und private Haushalte,

** umfasst energie- und prozessbedingte Emissionen der Industrie,

*** umfasst sonstige Feuerungen (unter anderem Militär) und diffuse Emissionen aus Brennstoffen.

kompatiblen Pfad zu ermöglichen. So würde die in Abbildung 3-3 dargestellte lineare Minderung für 2025 bereits ein Reduktionsziel von etwa 60 Prozent nahelegen.

Dabei muss die nationale deutsche Klimapolitik natürlich stets im Zusammenspiel mit der europäischen (sowie der internationalen) Klimapolitik gesehen werden. Eine Zielverschärfung auf Bundesebene sollte demnach mit einer entsprechenden Ambitionssteigerung auf EU-Ebene einhergehen, insbesondere auch im Rahmen des europäischen Emissionshandels (EU-ETS). Sollte auf europäischer Ebene die Bereitschaft für eine solche Ambitionssteigerung fehlen, müsste Deutschland prüfen, wie es auf Instrumente wie das EU-ETS einwirken kann, um eine Verlagerung von Emissionen in andere Länder der EU zu vermeiden.

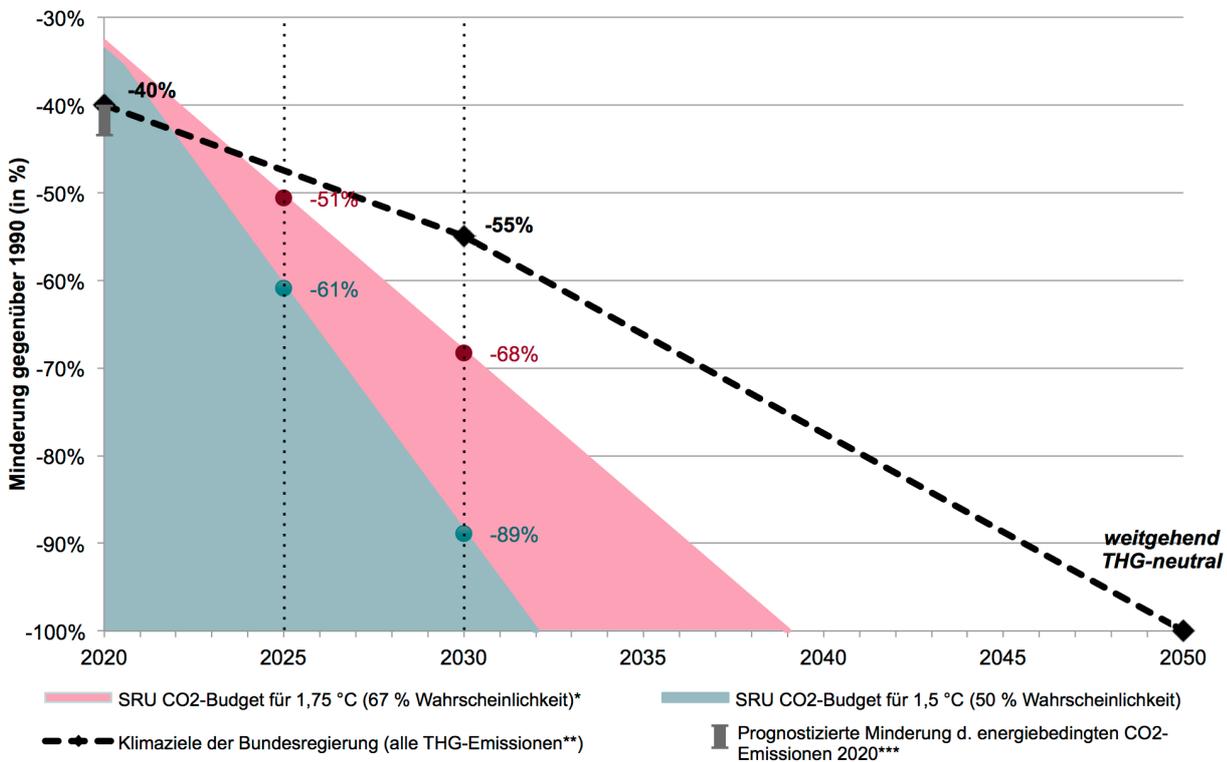


Abbildung 3-3 Die Klimaziele der Bundesregierung im Verhältnis zum deutschen CO₂-Budget¹⁵

Quelle: Basierend auf SRU (2020).

¹⁵ * Das 1,75-°C-Budget des SRU wäre Ende 2038 aufgebraucht. Hier wurde eine gerundete Darstellung gewählt, weshalb die Fläche 2039 endet.

** Die Klimaziele umfassen alle THG-Emissionen, die Budgets nur CO₂, was zu einer Ungenauigkeit im Vergleich führt. Da CO₂ ca. 88 Prozent der deutschen THG-Emissionen ausmacht (UBA 2020a), ist diese Ungenauigkeit vernachlässigbar. Wird davon ausgegangen, dass die Sektorziele 2030 durch eine jeweils gleich starke Reduktion der für den Sektor relevanten Treibhausgase erreicht werden sollen, beträgt die daraus abgeleitete notwendige Minderung der CO₂-Emissionen ebenfalls rund 55 Prozent.

*** Die CO₂-Budgets wurden vom SRU Anfang 2020 auf Basis vorläufiger Emissionswerte für 2019 berechnet (SRU 2020). Die AG Energiebilanzen erwartet nach Ablauf der ersten Jahreshälfte für das gesamte Jahr 2020 gegenüber dem Vorjahr einen hauptsächlich durch die Corona-Pandemie bedingten Rückgang der energiebedingten CO₂-Emissionen zwischen 10 und 17 Prozent (AG Energiebilanzen 2020b). Sollte die tatsächliche Minderung am oberen Ende dieser Spanne liegen, wäre das 1,5-°C-Budget bei gleichbleibenden Emissionen 2027 aufgebraucht, bei linearer Reduktion 2033, also jeweils ein Jahr später als vom SRU berechnet.

4 Vergleich ausgewählter Klimaschutzszenarien für Deutschland

Quantitative, modellbasierte Klimaschutzszenarien beschreiben mögliche THG-Reduktionspfade und liefern damit Anhaltspunkte dafür, welche Entscheidungen kurz- sowie längerfristig getroffen werden müssen, um bestimmte Klimaziele einzuhalten. Für den vorliegenden Bericht wurden als besonders ambitioniert geltende Szenarien aus mehreren Studien vergleichend analysiert, die verschiedene Wege beschreiben, wie Deutschland bis 2050 ein (annähernd) THG-neutrales Energiesystem realisieren kann.

Vergleicht man die Emissionspfade der betrachteten Szenarien mit den vom SRU berechneten **1,5- und 1,75-°C-kompatiblen CO₂-Budgets**, so werden diese in allen betrachteten Szenarien (größtenteils erheblich) **überschritten**. Dennoch lassen sich aus den Szenarien **Rückschlüsse hinsichtlich der Struktur eines klimaneutralen Energiesystems** ziehen, die im weiteren Verlauf insbesondere der Beantwortung der Frage dienen sollen, wie die in den Szenarien aufgezeigte **Transformation** in den verschiedenen Sektoren des Energiesystems **zusätzlich beschleunigt** werden könnte.

Der Vergleich der Szenarien legt nahe, dass eine **deutliche Minderung des gesamten Endenergiebedarfs** eine wichtige Voraussetzung für ambitionierten Klimaschutz ist: Der Endenergiebedarf ist in den Szenarien im Jahr 2050 zwischen 36 und 58 Prozent geringer als im Jahr 2018. Der **Strombedarf steigt hingegen in allen Szenarien deutlich**, was sich durch die sogenannte Sektorenkopplung begründen lässt, also durch die weitere **Elektrifizierung** (direkt in Form von Strom sowie indirekt in Form etwa von Wasserstoff) **in den Sektoren Gebäude, Verkehr und Industrie**.

Einige Studien stellen auch Berechnungen hinsichtlich der Kosten einer klimaneutralen Transformation bis 2050 an. Die **Mehrkosten**, die für das Erreichen eines klimaneutralen Energiesystems anfallen würden, könnten gemäß der betrachteten Szenarien gegenüber einer Referenzentwicklung ohne ambitionierten Klimaschutz bis 2050 auf **durchschnittlich ca. 50 bis 70 Mrd. Euro pro Jahr** geschätzt werden. Es ist davon auszugehen, dass die jährlichen Mehrkosten bis 2050 (und insbesondere im Zeitraum bis 2035) **höher** liegen würden, **wenn Klimaneutralität bereits bis 2035 realisiert werden soll**.

Sollten diese jährlichen Mehrkosten bei rund 100 Mrd. Euro liegen, so würde dies knapp 3 Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts (BIP) und knapp 6 Prozent der privaten Konsumausgaben des Jahres 2019 entsprechen. Bei einer solchen reinen Kostenbetrachtung bleibt der **Nutzen der Transformation** unberücksichtigt, also insbesondere die **vermiedenen Klimaschäden** sowie weitere potenzielle Vorteile wie **geringere Schadstoffemissionen, positive Arbeitplatzeffekte** und **ausgelöste Innovationsdynamiken**.

Betrachtete Szenariostudien

Quantitative, modellbasierte Klimaschutzszenarien beschreiben mögliche THG-Reduktionspfade und liefern damit Anhaltspunkte dafür, welche Entscheidungen kurz- sowie längerfristig getroffen werden müssen, um bestimmte Reduktionsziele einzuhalten.

Tabelle 4-1 Kurzübersicht über die in dieser Studie herangezogenen Klimaschutzszenarien für Deutschland

Szenario	Studie	Energiebedingte CO ₂ -Emissionen, 1990–2050 ¹⁶	Wesentliches Ziel des Szenarios ¹⁷
TM95	dena (2018)	–100 Prozent	Darstellung eines kostengünstigen und robusten Transformationspfads zur Erreichung des –95-Prozent-Ziels.
95 %-Pfad	BDI (2018)	–100 Prozent	Aufzeigen eines kosteneffizienten Weges zur Erreichung des –95-Prozent-Ziels.
GreenEe1	UBA (2019a)	–100 Prozent	Aufzeigen der Möglichkeit von THG-Neutralität bis 2050, vor allem mit technischen Lösungen, aber ohne CCS, unter Berücksichtigung des Ressourcenverbrauchs.
GreenSupreme	UBA (2019a)	–100 Prozent	Wie bei GreenEe1, aber mit geringeren kumulativen Emissionen, unter anderem durch Verhaltensänderungen und Nullwachstum nach 2030.
Szenario 95	FZJ (2019)	etwa –97 Prozent	Identifikation der kosteneffizientesten CO ₂ -Minderungsstrategie zur Erreichung des –95-Prozent-Ziels.
Referenz	ISE (2020)	etwa –95 Prozent	Identifikation einer kostenoptimalen Transformation des Energiesystems für eine Minderung der energiebedingten Emissionen um 95 Prozent bis 2050 (gegenüber 1990).
Suffizienz	ISE (2020)	etwa –95 Prozent	Untersuchung des möglichen Beitrags weitreichender Lebensstiländerungen für die Transformation des Energiesystems.

In diesem Kapitel sowie in den folgenden Kapiteln wird an verschiedenen Stellen auf vier Szenarien aus drei Studien (dena 2018, BDI 2018, UBA 2019a) verwiesen, die detailliert verschiedene Wege beschreiben, wie die energiebedingten Treibhausgase

¹⁶ Einige der aufgelisteten Szenarien betrachten auch weitere Quellen von Treibhausgasen, wie industrielle Prozesse, die Landwirtschaft oder den Abfall. Die Emissionen dieser Bereiche setzen sich zu einem erheblichen Teil aus nicht-CO₂-Treibhausgasen zusammen, beispielsweise aus Methan und Lachgas. Aufgrund des in der vorliegenden Studie gesetzten Schwerpunkts auf die Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen (die derzeit rund 84 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands ausmachen und nahezu ausschließlich aus CO₂ bestehen – bei Berücksichtigung der prozessbedingten CO₂-Emissionen erhöht sich dieser Wert weiter), wird in dieser Spalte aber nur die in den Szenarien jeweils beschriebene Entwicklung der energiebedingten CO₂-Emissionen aufgeführt.

¹⁷ Die in dieser Spalte genannten Minderungsziele beziehen sich auf alle Treibhausgasemissionen. Das Referenzjahr ist jeweils 1990.

Deutschlands bis zum Jahr 2050 auf Null reduziert werden könnten.¹⁸ Zusätzlich wird in dem vorliegenden Bericht teilweise noch auf drei weitere aktuelle Szenarien aus zwei Studien (FZJ 2019, ISE 2020) Bezug genommen. In diesen drei Szenarien werden die energiebedingten Treibhausgasemissionen bis 2050 zwar nicht ganz auf Null reduziert, sie erweitern aber gegenüber den anderen vier Szenarien den Blick auf mögliche zukünftige Ausgestaltungen eines klimaneutralen Energiesystems, insbesondere in Hinblick auf die Menge des in Deutschland erzeugten Stroms, die nach Deutschland importierte Menge klimaneutraler Brennstoffe sowie das Verhältnis zwischen der Stromerzeugung aus Windenergie auf der einen und Solarenergie auf der anderen Seite. Diese insgesamt sieben Szenarien und ihre jeweils wichtigen Ziele werden in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Vergleich der THG-Emissionspfade der Szenarien mit den vom SRU abgeleiteten CO₂-Budgets

An dieser Stelle sollen zunächst die Emissionspfade derjenigen vier Szenarien, welche die energiebedingten THG-Emissionen bis 2050 auf Null reduzieren, mit dem vom SRU berechneten CO₂-Budget ins Verhältnis gesetzt werden (s. Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2).

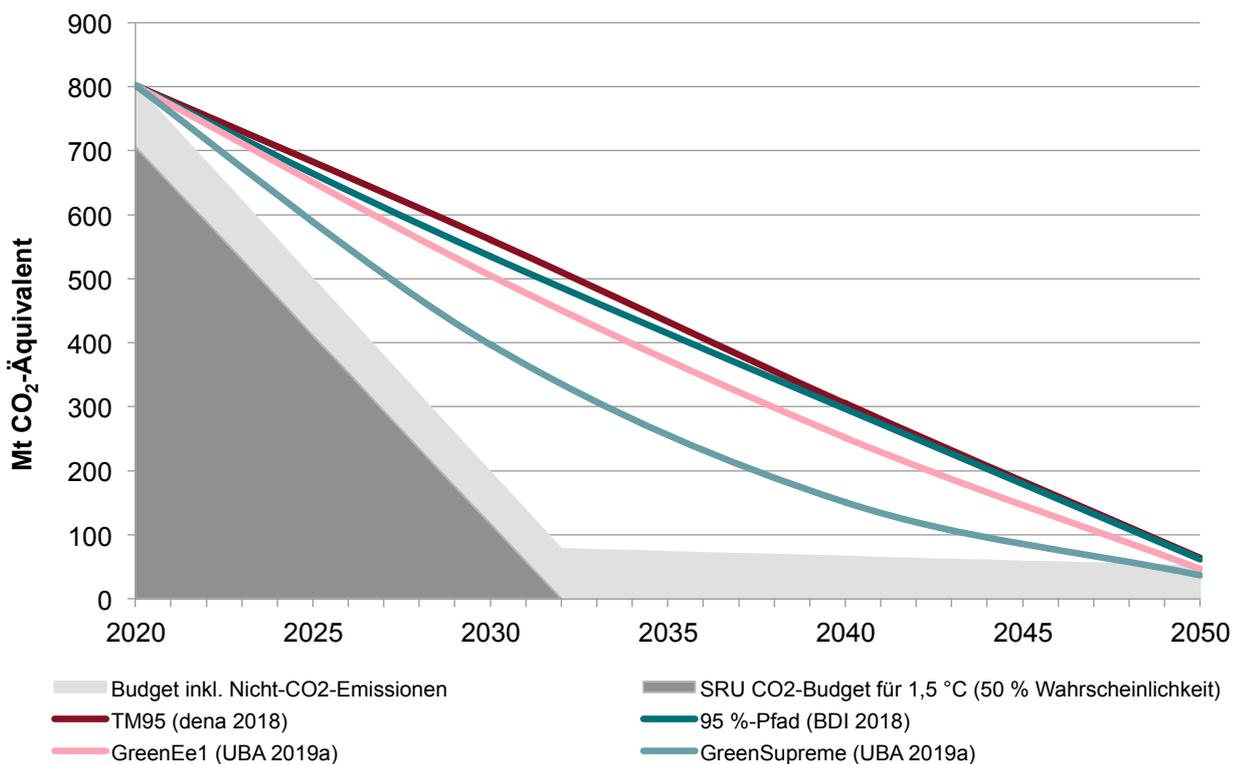


Abbildung 4-1 Vergleich der gesamten THG-Emissionen in den betrachteten Szenarien mit dem 1,5-°C-Budget

Quellen: Basierend auf SRU (2020), IPCC (2018b) und den zitierten Szenariostudien.

¹⁸ Nach unserem Kenntnisstand sind diese vier Szenarien derzeit die ambitioniertesten detailliert berechneten vorliegenden Klimaschutzszenarien für Deutschland.

In beiden Abbildungen stellen die dunkelgrauen Flächen das vom SRU berechnete CO₂-Budget für Deutschland dar. Die dunkel- und die hellgraue Fläche zusammen ergeben das Budget inkl. der Nicht-CO₂-Emissionen (insbesondere Methan und Lachgas).¹⁹ Ein Vergleich der in den jeweiligen Szenarien bis 2050 insgesamt ausgestoßenen THG-Emissionen mit dem Budget zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze (CO₂- und Nicht-CO₂-Emissionen), zeigt deutlich, dass alle Szenarien das Budget überschreiten – obwohl sie als ambitioniert gelten. Selbst das 1,75-°C-Budget wird in allen Szenarien noch überschritten, mit Ausnahme von GreenSupreme sogar erheblich.

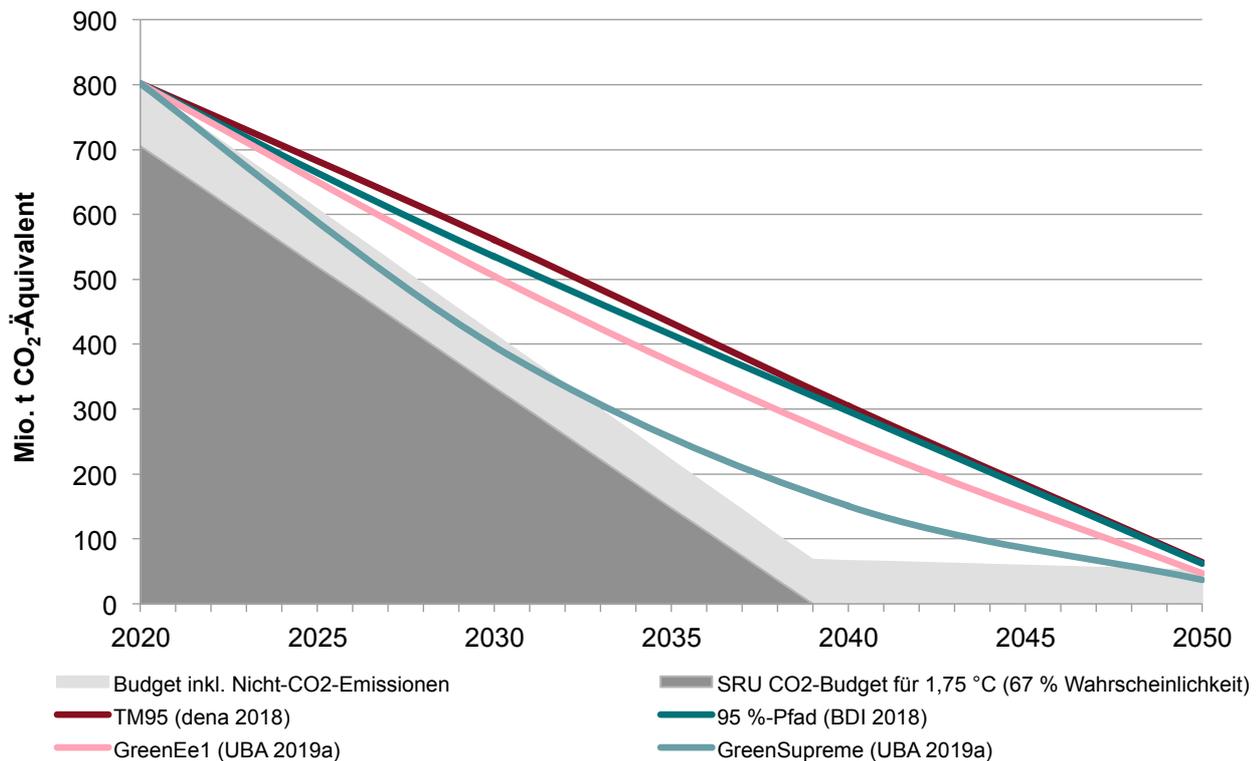


Abbildung 4-2 Vergleich der gesamten THG-Emissionen in den betrachteten Szenarien mit dem 1,75-°C-Budget

Quellen: Basierend auf SRU (2020), IPCC (2018b) und den zitierten Szenariostudien.

Dennoch lassen sich aus den Szenarien Rückschlüsse hinsichtlich der Struktur eines klimaneutralen Energiesystems ziehen, denn in allen vier hier betrachteten Szenarien werden die energiebedingten Treibhausgasemissionen bis 2050 auf Null reduziert. Aus diesem Grund wird in den folgenden Kapiteln, die sich auf einzelne Sektoren des Energiesystems fokussieren, an verschiedenen Stellen auf diese Szenarien zurückgegriffen und dabei insbesondere die Frage gestellt, wie die Transformation in diesen Szenarien zusätzlich beschleunigt werden könnte.

¹⁹ Hierfür wurde für beide Budgets eine Minderung um 40 Prozent bis 2040 angenommen (mit anschließender Trendfortsetzung). Diese Annahme orientiert sich grob an den Annahmen zur globalen Entwicklung dieser Emissionen unter globalen 1,5-°C-Pfaden im 1,5-°C-Bericht des IPCC (2018b, Abb. SPM.3a).

Entwicklung des Endenergiebedarfs in den betrachteten Szenarien

Für einen allgemeinen Überblick über die notwendigen Änderungen im Energiesystem soll an dieser Stelle die Entwicklung des Endenergiebedarfs in den vier analysierten Szenarien betrachtet werden (s. Abbildung 4-3). Die Ergebnisse legen nahe, dass die deutliche Minderung des Endenergiebedarfs eine wichtige Voraussetzung für ambitionierten Klimaschutz ist: Er ist in den Szenarien im Jahr 2050 zwischen 36 und 58 Prozent geringer als heute. Der Grund für den steigenden Strombedarf im Endenergieverbrauch liegt in der Sektorenkopplung, also der weiteren Elektrifizierung der Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden sowie des Verkehrs und der Industrie. Dabei ist zu beachten, dass der Strombedarf insgesamt in den Szenarien noch stärker steigt, als aus Abbildung 4-3 ersichtlich, da bis 2050 durch die angenommene inländische Wasserstoffherzeugung aus Elektrolyse in allen Szenarien auch im Umwandlungssektor ein starker Anstieg des Strombedarfs erfolgt (vgl. Kapitel 5).

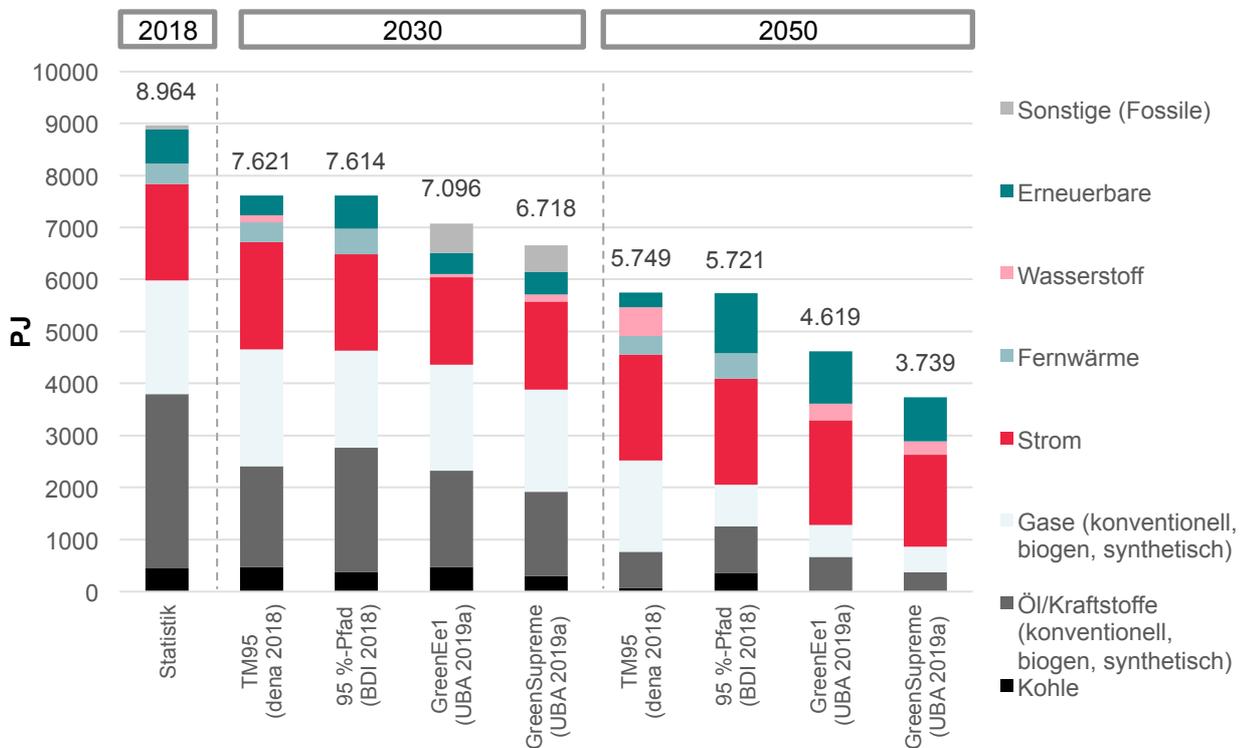


Abbildung 4-3 Entwicklung des Endenergiebedarfs in ambitionierten Klimaschutzszenarien (in PJ)²⁰

Quellen: Basierend auf AG Energiebilanzen (2020a) und den zitierten Szenariostudien.

²⁰ Hinweise: i) Es besteht keine vollständige Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien. Beispielsweise wird in den Szenarien GreenEet1 und GreenSupreme Fernwärme nicht gesondert ausgewiesen. ii) In den Szenarien der UBA- und der dena-Studie wird beim Endenergieverbrauch nicht explizit zwischen konventionellen, biogenen und synthetischen Gasen und Kraftstoffen differenziert, sondern innerhalb aggregierter Werte eine schrittweise Substitution angenommen. Folglich kann auch in dieser Abbildung keine entsprechende Unterscheidung vorgenommen werden.

Schätzungen der Kosten für das Erreichen eines klimaneutralen Energiesystems

Einige der betrachteten Szenariostudien haben in den letzten Jahren die Gesamtkosten abgeschätzt, die für das Erreichen eines klimaneutralen Energiesystems anfallen würden. Diese Kosten umfassen sowohl die Transformationskosten auf der Energieangebotsseite als auch die Kosten für die notwendigen Anpassungen in den Endenergiesektoren, also beispielsweise die Kosten für energetische Gebäudesanierungen oder für die Umstellungen von Produktionsprozessen in der Grundstoffindustrie. Die Kostenabschätzungen enthalten in der Regel sowohl Investitionsausgaben (CAPEX) als auch Betriebskosten (OPEX) – mit Ausnahme der Studie für den BDI (2018), dort werden nur die CAPEX aufgeführt. Die folgende Tabelle 4-2 liefert einen Überblick über die in diesen Studien geschätzten Kosten.

Tabelle 4-2 Abschätzungen aus der Literatur zu den durchschnittlichen jährlichen Differenzkosten bzw. Mehrinvestitionen bis 2050 für das Erreichen (weitgehender) Treibhausgasneutralität im Energiesystem

Studie	Szenario	Bezugsgröße	Betrachtungszeitraum	Zusätzliche Kosten/ Investitionen pro Jahr
dena (2018)	TM95	Differenzkosten gegenüber BaU*	2018–2050	+52 Mrd. Euro
ISE (2020b)	Referenz100	Differenzkosten gegenüber BaU*	2020–2050	+70 Mrd. Euro
	Suffizienz2035			+110 Mrd. Euro
BDI (2018)	95 %-Pfad	Mehrinvestitionen gegenüber BaU*	2015–2050	+50 Mrd. Euro
FZJ (2019)	Szenario 95	Differenzkosten gegenüber heute	2020–2050	+62 Mrd. Euro

*BaU= *Business-as-Usual-Entwicklung (Szenario ohne ambitionierten Klimaschutz)*

Gegenüber einer Entwicklung, in der kein ambitionierter Klimaschutz betrieben wird, können die Mehrkosten für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2050 auf Basis der vorliegenden Literatur auf durchschnittlich ca. 50 bis 70 Mrd. Euro pro Jahr geschätzt werden.²¹

Es ist davon auszugehen, dass die jährlichen Mehrkosten bis 2050 (und insbesondere bis 2035) höher liegen würden, wenn Klimaneutralität bereits bis 2035 realisiert werden soll. Das Fraunhofer ISE schätzt die jährlichen Mehrkosten bis 2050 zur Erreichung eines klimaneutralen Energiesystems (das heißt Umwandlung, Industrie, Verkehr und Wärme) bis 2035 auf ca. 110 Mrd. Euro, gegenüber 70 Mrd. Euro für Klimaneutralität bis 2050 (ISE 2020). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Szenarien dieser Studie eine relativ hohe inländische Stromerzeugung und einen geringen Import von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern vorsehen, was ein wesentlicher Grund für die gegenüber anderen Studien höheren Kosten sein dürfte.

²¹ Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Kostenspanne mit hohen Unsicherheiten verbunden ist, da zukünftige Kostenentwicklungen über drei Jahrzehnte schwierig vorherzusehen sind und die für den Vergleich herangezogene Referenzentwicklung sehr unterschiedlich definiert werden kann.

Außerdem ist zu beachten, dass diese Kosten den Nutzen der Transformation nicht berücksichtigen. So werden insbesondere die vermiedenen Klimaschäden – aber auch weitere potenzielle Vorteile wie geringere Schadstoffemissionen, positive Arbeitsplatzeffekte und ausgelöste Innovationsdynamiken – nicht gegengerechnet. Analysen auf globaler Ebene zeigen, dass die Kosten für das Einhalten der 1,5-°C-Grenze aufgrund der vermiedenen Schäden und des geringeren Anpassungsbedarfs vermutlich deutlich geringer wären als die Kosten, die durch eine höhere Erwärmung entstehen würden (beispielsweise Chen et al. 2020).

Werden 100 Mrd. Euro pro Jahr zusätzlich für das Erreichen eines klimaneutralen Energiesystems bis 2035 angenommen, so würde dies knapp 3 Prozent des deutschen BIP und knapp 6 Prozent der privaten Konsumausgaben des Jahres 2019 darstellen (Destatis 2020a).

5 Energiewirtschaft

Die Energiewirtschaft stieß 2019 nach vorläufigen Angaben des Umweltbundesamtes Treibhausgase in Höhe von 246 Mt CO₂-Äquivalente aus. Damit war sie **für rund 30 Prozent der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich**. Dabei dominieren in dem Sektor die Emissionen aus der Strom- und Wärmeerzeugung.

Um bereits bis 2035 eine vollständig auf erneuerbaren Energien beruhende Stromerzeugung realisieren zu können, ist insbesondere ein gegenüber den vergangenen Jahren deutlich schnellerer Ausbau von Windkraft und Photovoltaik notwendig. Bis 2035 erscheint dann ein Ausbau von **jährlich mindestens etwa 25 bis 30 GW an neuen Windenergie- (on- und offshore) und PV-Anlagen sinnvoll**. Der tatsächliche Ausbau lag in den Jahren 2018 und 2019 im Durchschnitt hingegen nur bei 6 GW pro Jahr. Die aktuellen Ausbauziele der Bundesregierung für das Jahr 2030 erfordern einen jährlichen Ausbau von etwa 10 GW.

Sollte bereits bis 2035 der Import sehr großer Mengen klimaneutraler Brenn- und Kraftstoffe möglich sein, könnte sich der nötige Zubau an erneuerbaren Energien auf mindestens 15 GW pro Jahr reduzieren. Auch das wären jedoch noch deutlich mehr, als die aktuellen Regierungsziele vorsehen. Andererseits **könnte der Ausbaubedarf sogar bei bis zu rund 40 GW pro Jahr liegen, falls bis 2035 nur geringe Importe klimaneutraler Energieträger möglich sein sollten** und sich zudem keine starken gesellschaftlichen Trends zu suffizienteren Lebensstilen ergeben.

Eine starke Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien **erfordert neue energiepolitische Maßnahmen**. Eine Belebung des Ausbaus der Onshore-Windenergie kann nur über ein Bündel an Maßnahmen erreicht werden. Hierzu gehört eine stärkere Beteiligung der Kommunen an den Einnahmen. Im Bereich der PV sollte über eine Installations- bzw. Nutzungspflicht auch über den Neubau hinaus (etwa bei Dachsanierungen) nachgedacht werden.

In einem klimaneutralen Energiesystem ist zudem mit einem **Bedarf an Wasserstoff und gasförmigen sowie flüssigen synthetischen Energieträgern in einer Größenordnung von wahrscheinlich etwa 400 bis 900 TWh pro Jahr** zu rechnen.

Ein Teil dieses Bedarfs sollte über eine inländische Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse gedeckt werden. Wird bis 2035 eine inländische Bereitstellung von 150 bis 200 TWh Wasserstoff als angemessen angenommen, könnte bis dahin **eine Kapazität an Elektrolyseuren in Höhe von mindestens 40 und bis zu 90 GW notwendig** sein. Die Bundesregierung strebt bis 2035 eine entsprechende Kapazität in Höhe von maximal 10 GW an.

Zumindest ein Teil des Bedarfs an klimaneutralen Brenn- und Kraftstoffen wird zukünftig aber voraussichtlich aus Ländern mit besonders guten Erneuerbaren-Energien-Bedingungen importiert werden müssen. Um eine ausreichende Verfügbarkeit zu gewährleisten und die Voraussetzungen für einen solchen Import zu schaffen, sind **frühzeitige Kooperationen mit anderen Ländern** einzugehen.

Sektorbeschreibung

Der Sektor „Energiewirtschaft“ stieß im Jahr 2019 nach vorläufigen Angaben des Umweltbundesamtes Treibhausgase in Höhe von 246 Mt CO₂-Äquivalente aus (UBA 2020b). Dies waren rund 30 Prozent der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen. Dabei dominiert die öffentliche Strom- und Wärmeerzeugung, die im Jahr 2018 etwa 90 Prozent der Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft ausmachte. (Eine genaue Aufteilung der Emissionen der Energiewirtschaft liegt für 2019 noch nicht vor.) Allein die Strom- und Wärmeerzeugung aus Braun- und Steinkohle machten 2018 einen Anteil von 73 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen des Sektors aus. Weitere Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft entstehen unter anderem bei der Herstellung von Kraftstoffen in Raffinerien.

Die Emissionen der Energiewirtschaft sind zwischen 1990 und 2019 um 42 Prozent gesunken. Als ein wesentlicher Grund für diesen Rückgang kann der Ausbau der erneuerbaren Energien genannt werden. So stieg deren Anteil am Bruttostromverbrauch von 4 Prozent im Jahr 1990 auf 42 Prozent im Jahr 2019 (AG Energiebilanzen 2020c). Zum anderen hat die Wirtschaftlichkeit der Kohlekraftwerke gegenüber Gaskraftwerken in den letzten Jahren deutlich abgenommen, und damit auch die durchschnittliche Auslastung der Kohlekraftwerke. Dies ist wiederum auf die seit Mitte 2017 stark gestiegenen CO₂-Preise im EU-Emissionshandel sowie den gegenwärtig relativ geringen Erdgaspreis zurückzuführen (Agora Energiewende 2020).

Handlungsbedarf für ein klimaneutrales Energiesystem

Aufgrund der Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des CO₂-Preises, der bevorstehenden Abschaltung der noch laufenden Atomkraftwerke bis Ende 2022 sowie des seit 2018 eingebrochenen Ausbaus der Windenergie an Land kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Emissionen der Energiewirtschaft auch in den nächsten Jahren weiter deutlich sinken werden. Um einen fortgesetzten Emissionsrückgang bzw. eine Beschleunigung dieses Rückgangs ermöglichen zu können, ist ein gegenüber den vergangenen Jahren erheblich schnellerer Ausbau der erneuerbaren Energien hin zu einer vollständig erneuerbaren Stromversorgung unerlässlich. Komplementär zum Ausbau der Erneuerbaren-Anlagen müssen noch weitere größere Änderungen im Strom- sowie im gesamten Energiesystem vorgenommen werden:

- Aus- und Umbau des Transport- und Verteilnetzes für Strom
- Ausbau von Speicherkapazitäten
- Erhöhung der nachfrageseitigen Flexibilitäten
- Stärkere Digitalisierung des Stromsystems für eine optimale Nutzung der fluktuierenden erneuerbaren Energien sowie zur Stärkung des europäischen Stromaustauschs
- Nutzung der Potenziale der Sektorenkopplung, etwa auf Grundlage einer integrierten Analyse der Ausbauerfordernisse des Strom- und Wasserstoffnetzes

Zudem kommt der Energiewirtschaft für das Erreichen eines klimaneutralen Energie- und Industriesystems die Aufgabe zu, den Endenergiesektoren neben erneuerbar erzeugtem Strom auch treibhausgasneutrale gasförmige und flüssige Energieträger zur Verfügung zu stellen, soweit diese nicht durch Effizienz, Suffizienz oder Elektrifizierung vermieden werden können. Insbesondere in der Industrie werden zukünftig

größere Mengen an Wasserstoff benötigt. Im Flugverkehr könnte die Verwendung synthetischer Kraftstoffe notwendig sein²². Die zukünftig noch benötigten gasförmigen und flüssigen Energieträger werden daher zunehmend und letztlich vollständig entweder durch klimaneutral erzeugten Wasserstoff oder durch (auf Wasserstoff basierende) klimaneutrale synthetische Energieträger bereitgestellt werden müssen. Um dies ermöglichen zu können, sind insbesondere die folgenden Schritte notwendig:

- Ausbau von Elektrolyseur-Kapazitäten – im Gleichschritt mit einem stark beschleunigten Zubau von Erneuerbare-Energien-Anlagen
- Aufbau von Partnerschaften mit Ländern, die gut geeignet sind, zukünftig in großem Maße Wasserstoff und/oder synthetische Energieträger zu erzeugen
- Aufbau der für eine klimaneutrale Brennstoffversorgung benötigten Infrastruktur (vor allem inländische und grenzüberschreitende Wasserstoff-Pipelines)

Die zwei zuvor genannten zentralen Herausforderung für die Energiewirtschaft auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität – also die vollständige Umstellung der inländischen Stromerzeugung auf erneuerbare Energien sowie die Bereitstellung ausschließlich treibhausgasneutraler Brennstoffe – werden in diesem Kapitel näher betrachtet. Dabei wird zum einen auf Grundlage bestehender Szenariostudien aufgezeigt, wie der Zielzustand einer treibhausgasneutralen Strom- und Brennstoffversorgung aussehen könnte. Zum anderen wird skizziert, wie die in den Szenarien beschriebenen Entwicklungen – die in der Regel eine Treibhausgasneutralität des Energiesystems bis 2050 vorsehen – beschleunigt werden müssten, um das Ziel der Treibhausgasneutralität bereits bis 2035 zu erreichen, und welche Herausforderungen damit voraussichtlich verbunden wären.

Die Umstellung der Fernwärmeversorgung auf „grüne“ Fernwärme stellt auf dem Weg zur Klimaneutralität eine weitere Herausforderung für die Energiewirtschaft dar. Aufgrund der unmittelbaren Bedeutung der Fernwärme für den Gebäudesektor wird auf diese Herausforderung im Kapitel „Gebäude“ eingegangen (s. Infobox „Konversion zur grünen Nah- und Fernwärme“).

Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in einem klimaneutralen Energiesystem

Ein vollständig auf erneuerbaren Energien beruhendes Stromsystem wird von verschiedenen Szenariostudien (s. Abbildung 5-1) sowie weiteren wissenschaftlichen Studien (unter anderem Brown et al. 2018, Zappa et al. 2019) als technisch und ökonomisch realisierbar eingeschätzt.

Die hier betrachteten Szenariostudien legen nahe, dass in einem klimaneutralen Energiesystem in Deutschland pro Jahr mindestens 700 bis 800 TWh Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden müssten, gegenüber knapp 250 TWh im Jahr 2019. In einigen Szenarien steigt die jährliche inländische Stromerzeugung auf Basis

²² Dabei ist zu beachten, dass CO₂-Neutralität im Flugverkehr nicht gleichzusetzen ist mit Klimaneutralität, da das Verbrennen von Kohlenwasserstoffen in großen Flughöhen ein ca. dreimal stärkeres Treibhauspotenzial mit sich bringt als an der Erdoberfläche (siehe unter anderem Lee et al. 2020).

erneuerbarer Energien sogar auf rund 1.000 bis 1.400 TWh. Eine solch hohe Erzeugung – sofern insbesondere hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz umsetzbar – könnte in Deutschland große Mengen an Strom für die Erzeugung von Wasserstoff bereitstellen und damit den zukünftigen Bedarf an Importen von Wasserstoff beziehungsweise synthetischen Energieträgern deutlich mindern. In allen betrachteten Szenarien liegt die Bruttostromerzeugung damit deutlich höher als gegenwärtig (rund 600 TWh im Jahr 2019, AG Energiebilanzen 2020c). Die in den Szenarien unterstellten zukünftigen Effizienzsteigerungen bei den „klassischen“ Stromanwendungen werden dabei überkompensiert durch den zusätzlichen Strombedarf „neuer“ Stromanwendungen, wie etwa Elektroautos, Wärmepumpen, Elektrolyseure zur Wasserstoffherzeugung, die fossile Energieträger ersetzen sollen.

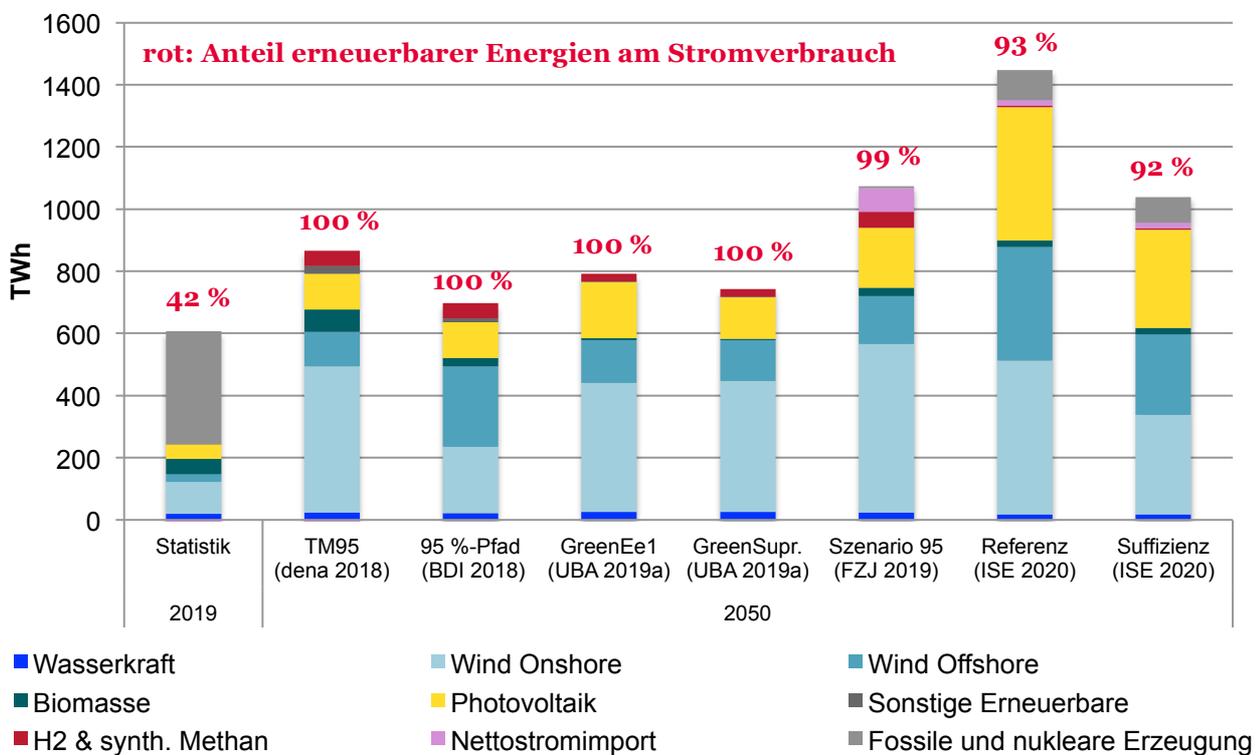


Abbildung 5-1 Inländische Stromerzeugung nach Energieträgern im Jahr 2019 sowie nach verschiedenen vorliegenden Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 (in TWh)²³

Quellen: Basierend auf AG Energiebilanzen (2020c) und den zitierten Szenariostudien.

Grundsätzlich wird erwartet, dass im zukünftigen deutschen Energiesystem die Stromerzeugung aus Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen aufgrund ihrer relativ großen natürlichen Potenziale in Deutschland und ihrer mittlerweile geringen Gesteungskosten klar dominieren wird. Das genaue zukünftige Verhältnis zwischen Strom aus Windenergie und Strom aus Photovoltaik ist aus heutiger Sicht jedoch unsicher und aus systemtechnischer Sicht innerhalb eines gewissen Rahmens flexibel. Das Verhältnis zwischen der Stromerzeugung aus Windenergieanlagen (Onshore

²³ Hinweise: Die statistischen Angaben für 2019 sind vorläufig und beziehen sich auf die Bruttostromerzeugung. Die Daten der Szenarien beziehen sich teilweise auf die Brutto-, teilweise auf die Nettostromerzeugung. Die Angaben für das Szenario „Suffizienz“ stellen ungefähre Werte dar.

plus Offshore) sowie Photovoltaik-Anlagen steigt in den meisten der betrachteten Szenarien von 2,7 (Wind) zu 1 (Solar) im Jahr 2019 (AG Energiebilanzen 2020c) zu- gunsten eines höheren Windstromanteils auf ein Verhältnis zwischen 3:1 und 5:1 im Jahr 2050. Das Verhältnis liegt in einzelnen Szenarien aber auch deutlich niedriger, nämlich bei 2:1 im Szenario „Referenz“ (ISE 2020), 1,8:1 im Szenario „Suffizienz“ (ISE 2020) und sogar bei 0,6:1 im Szenario „Inakzeptanz“ (ISE 2020, nicht in Abbil- dung 5-1 dargestellt). Im letztgenannten Szenario wird also 2050 mehr Strom aus Photovoltaik-Anlagen erzeugt als aus Windenergieanlagen. In den meisten vorlie- genden Szenarien wird jedoch auch längerfristig eine höhere Stromerzeugung aus Windenergie als aus Photovoltaik angenommen, da dies mit einer gleichmäßigeren Stromerzeugung verbunden ist und der Bedarf an Speichern gegenüber einem stär- keren Fokus auf Photovoltaik geringer wäre.

Für ein klimaneutrales Energiesystem mit einer inländischen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von rund 700 bis 800 TWh pro Jahr müssten den Szenarien zufolge Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen in einem Umfang von zusammen mindestens rund 300 GW installiert sein – gegenüber 110 GW im Jahr 2019 (siehe Abbildung 5-2). In einigen Szenarien liegt die installierte Kapazität dieser Technolo- gien bei (nahezu) vollständig erneuerbarer Stromerzeugung aber auch deutlich hö- her, bei rund 500 bis 700 GW. Eine entsprechend höhere installierte Kapazität könn- te beispielsweise nötig sein, falls der Bedarf an inländischer Stromerzeugung bei rund 1.000 bis 1.400 TWh pro Jahr liegen sollte, beispielsweise aufgrund einer be- grenzten Verfügbarkeit importierter klimaneutraler Brennstoffe.

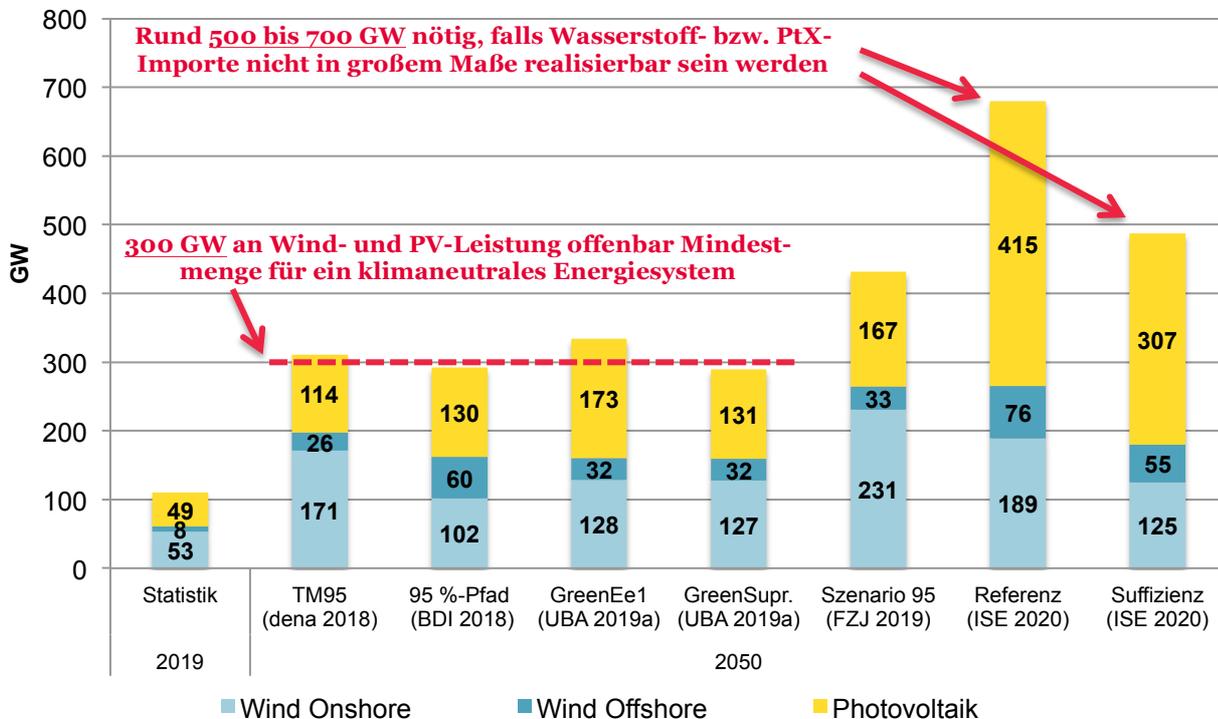


Abbildung 5-2 Installierte Kapazität an Windenergie- und PV-Anlagen in Deutschland im Jahr 2019 sowie nach verschiedenen Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 (in GW)

Quellen: Basierend auf BMWi (2020) und den zitierten Szenariostudien.

Ebenfalls könnten sich hohe Photovoltaik-Kapazitäten infolge einer mangelnden Akzeptanz des Windenergieausbaus als notwendig erweisen. In einem solchen Fall müsste sehr viel stärker auf Photovoltaik-Anlagen gesetzt werden, und diese Technologie weist gegenüber Windenergieanlagen deutlich weniger Volllaststunden auf, würde also mehr installierte Leistung zur Erzeugung des benötigten Stroms erfordern.

Im Folgenden wird nun angenommen, dass die in den Szenarien im Jahr 2050 installierten Wind- und Photovoltaik-Kapazitäten schon im Jahr 2035 existieren müssten, um ein treibhausgasneutrales Energiesystem bereits bis dahin verwirklichen zu können. Auf Grundlage dieser Annahme wird in Abbildung 5-3 dargestellt, wie stark der Brutto-Zubau²⁴ von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen ab dem Jahr 2020 und bis 2035 durchschnittlich pro Jahr ausfallen müsste.

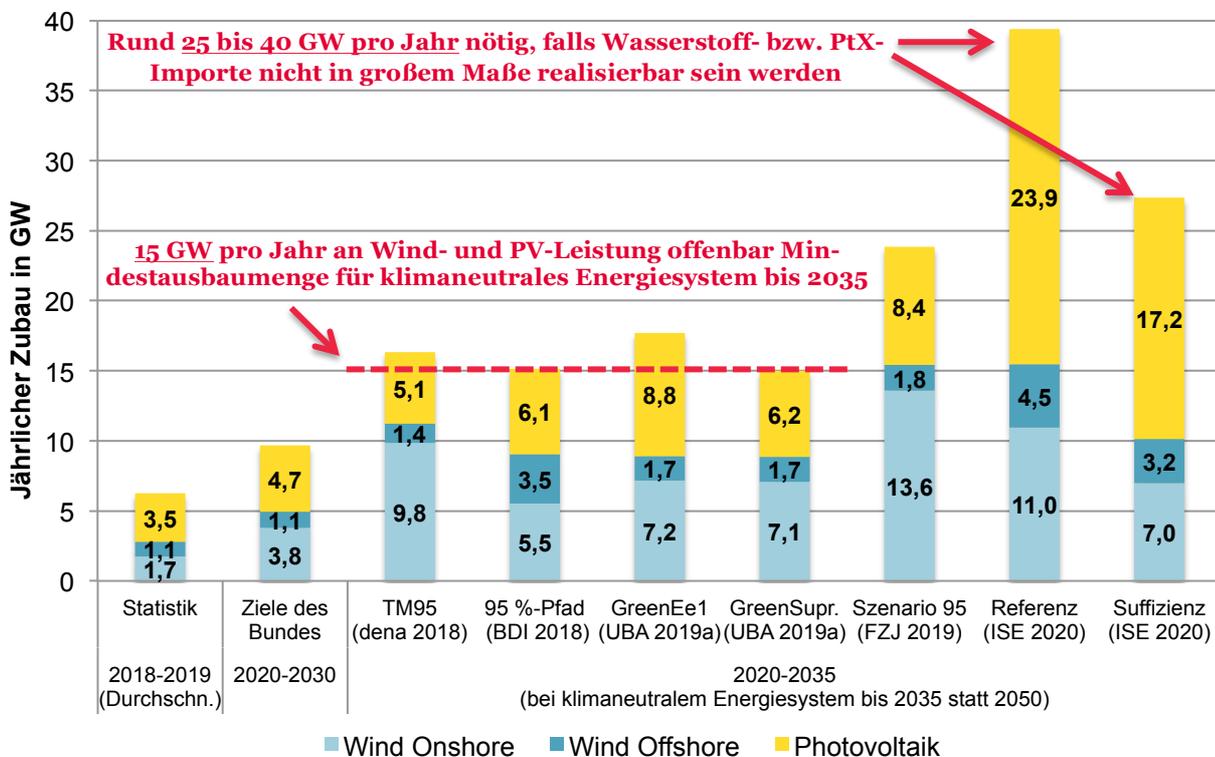


Abbildung 5-3 Jährlicher Brutto-Zubau von Windenergie- und PV-Anlagen in Deutschland in den Jahren 2018/2019 sowie benötigter Zubau nach Zielen der Bundesregierung sowie (beschleunigten) Szenarien (in GW)²⁵

Quellen: Statistik nach BWE (2020a), pv-magazine (2019, 2020), BMWi (2020). Ziele des Bundes nach der im September 2020 vom Bundeskabinett verabschiedeten EEG-Novelle 2021 (Bundesregierung 2020a).

²⁴ Mit dem jährlichen „Brutto-Zubau“ ist die tatsächlich in einem Jahr neu installierte Kapazität an Wind- und Photovoltaik-Anlagen gemeint. Demgegenüber werden beim „Netto-Zubau“ die in einem entsprechenden Jahr stillgelegten Kapazitäten alter Anlagen vom Brutto-Zubau abgezogen.

²⁵ Annahme: Anlagen-Lebensdauern von 20 Jahren (Wind) bzw. 25 Jahren (Photovoltaik).

Keinem der Szenarien zufolge würde ein jährlicher Zubau von unter 15 GW an Wind- und Photovoltaikanlagen ausreichen, um ein (zumindest weitgehend) klimaneutrales Energiesystem bis 2035 zu erreichen. Bei einem Ausbau von 15 GW pro Jahr wäre Deutschland zur Deckung seines Energiebedarfs zusätzlich auf den Import erheblicher Mengen an klimaneutral erzeugtem Wasserstoff oder synthetischen Energieträgern angewiesen. Für deren Erzeugung müssten in den Exportländern wie etwa in Irland, Norwegen oder Marokko erhebliche Erneuerbaren-Kapazitäten errichtet werden. Ob ein derart großskaliger Import bis 2035 realisiert werden kann, ist aufgrund des Zeitbedarfs für die Planung und Umsetzung von Erzeugungsanlagen und Transportinfrastrukturen keineswegs sicher. Auch geopolitische Bedenken könnten limitierend wirken. Zudem sollte die Prämisse gelten, dass zunächst die Deckung des eigenen Bedarfs an klimaneutralen Energieträgern in den Exportländern Vorrang hat.

Falls der Import synthetischer Energieträger nicht energisch vorangetrieben werden bzw. nicht in einem entsprechenden Ausmaß realisierbar sein sollte, müsste der Ausbau von Wind- und Photovoltaikanlagen in Deutschland noch deutlich stärker ausfallen als 15 GW pro Jahr. Im Fall von relativ geringen Importen synthetischer Energieträger ergibt sich im Szenario „Referenz“ (ISE 2020) ein inländischer Ausbaubedarf in Höhe von rund 40 GW pro Jahr.²⁶ Dieser Ausbaubedarf könnte – basierend auf dem Szenario „Suffizienz“ (ISE 2020) – auf rund 27 GW reduziert werden, falls sich (relativ kurzfristig) ein deutlich suffizienterer Lebensstil in der Gesellschaft durchsetzen sollte, falls zukünftig also etwa die Verkehrsleistung und die beheizten Gebäudeflächen im Gegensatz zum bisherigen Trend gesenkt werden könnten.

Der für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2035 nötige durchschnittliche jährliche Brutto-Zubau könnte den betrachteten Szenarien zufolge für die verschiedenen Technologien etwa in den folgenden Größenordnungen liegen (siehe Abbildung 5-3):

- Bei Effizienzsteigerungen und einem Import größerer Mengen klimaneutraler Energieträger im Umfang von jährlich etwa 350 bis 700 TWh:
 - Wind-Onshore: 7 GW
 - Wind-Offshore: 2 GW
 - Photovoltaik: 6 GW
- Bei Effizienzsteigerungen und relativ geringem Import klimaneutraler Energieträger im Umfang von jährlich etwa 150 TWh:
 - Wind-Onshore: 11 GW
 - Wind-Offshore: 4 bis 5 GW
 - Photovoltaik: 24 GW
- Bei Effizienzsteigerungen, suffizienten Lebensstilen und geringem Import klimaneutraler Energieträger im Umfang von jährlich etwa 65 TWh:
 - Wind-Onshore: 7 GW
 - Wind-Offshore: 3 GW
 - Photovoltaik: 17 GW

²⁶ Die hier genannten Zubauraten sind nur dann ausreichend, falls davon mindestens 9 GW auf die Windenergie entfallen (Onshore plus Offshore). Sollte ein so ambitionierter Windenergieausbau etwa wegen politischer oder gesellschaftlicher Widerständen nicht möglich oder aus Gründen des Naturschutzes nicht gewünscht sein, müssten die genannten Gesamtzubauraten deutlich höher ausfallen, da dann zur Kompensation stärker auf Photovoltaik-Anlagen (mit ihren geringeren Volllaststunden) gesetzt werden müsste.

Zum Vergleich: In den vergangenen beiden Jahren (2018 und 2019) wurden in Deutschland im Durchschnitt in der Summe nur rund 6 GW an Wind- und Photovoltaik-Anlagen installiert. Insbesondere die Windenergie an Land müsste um ein Vielfaches stärker ausgebaut werden als 2018 und 2019 (siehe auch Abbildung 5-4). Mit Ausnahme des Szenario 95 (FZJ 2019), in dem der notwendige Ausbau noch deutlich höher liegen würde, müssten pro Jahr Windenergieanlagen an Land in Höhe von 5,5 bis 11,0 GW errichtet werden. Dabei würden 5,5 GW pro Jahr nur dann ausreichen, wenn zum einen klimaneutrale Energieträger in relativ großen Mengen importiert werden können und zum anderen die Offshore-Windenergie mit 3,5 GW pro Jahr auf 60 GW im Jahr 2035 ausgebaut werden kann. Unter der Annahme, dass ein entsprechend schneller und hoher Offshore-Zubau aufgrund langer Planungszeiträume und naturschutzbedingter Einschränkungen nicht realisierbar bzw. wünschenswert sein dürfte, kann auf Grundlage der vorliegenden Szenarien davon ausgegangen werden, dass ein klimaneutrales Energiesystem bis 2035 einen jährlichen Brutto-Zubau der Windenergie an Land in Höhe von *mindestens* 7 GW voraussetzt.

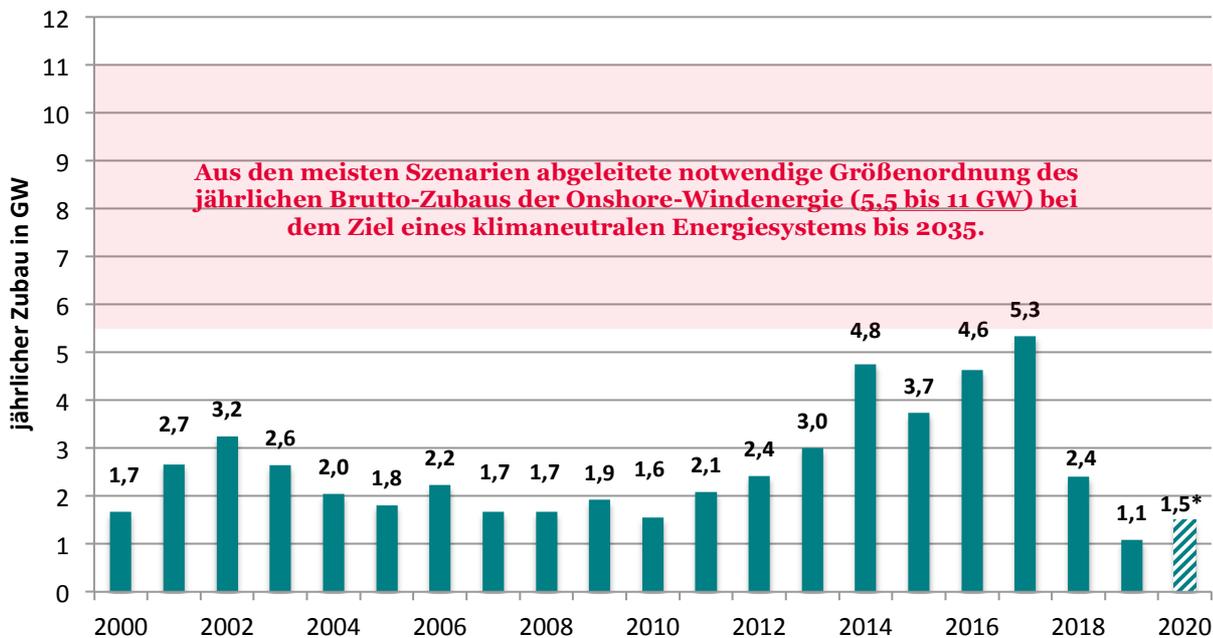


Abbildung 5-4 Jährlicher Brutto-Zubau von Onshore-Windenergie in Deutschland seit 2000 im Vergleich zu dem für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2035 nötigen Zubau (in GW)

Quellen: Ausbauzahlen bis 2019 nach BWE (2020a). * Prognose von Ende Juli 2020 für das gesamte Jahr 2020 nach BWE und VDMA Power Systems (BWE 2020b).

Die aktuellen Ziele der Bundesregierung für den Ausbau von Windenergie- und Photovoltaikanlagen bis 2030 (aus der im September 2020 im Bundeskabinett verabschiedeten EEG-Novelle 2021) erfordern einen durchschnittlichen jährlichen Ausbau entsprechender Anlagen von 9 bis 10 GW.²⁷ Diese Größenordnung wurde in den vergangenen Jahren nicht erreicht, sie liegt dennoch deutlich unter dem hier für ein

²⁷ Auch die meisten vorliegenden Energieszenarien, die bis 2050 ein klimaneutrales Energiesystem erreichen, beschreiben bis 2030 einen jährlichen Ausbau in ähnlicher Größenordnung (8 bis 13 GW).

klimateutralen Energiesystem bis 2035 abgeleiteten jährlichen Mindestzubau von 15 GW. Dabei sei noch einmal betont, dass ein jährlicher Zubau von 15 GW als absolutes Minimum für ein klimateutralen Energiesystem bis 2035 zu verstehen ist, der nur bei einem starken inländischen Windkraftausbau und einem bereits bis 2035 realisierten großskaligen Import klimateutraler Energieträger ausreichen würde.

Bezüglich des reinen Anlagen-Ausbaus scheint ein jährlicher Zubau von 15 GW oder auch mehr realisierbar zu sein, wie der Ausbau in einzelnen Jahren der Vergangenheit nahelegt. So wurden 8,2 GW Photovoltaik im Jahr 2012, 5,3 GW Wind-Onshore im Jahr 2017 und 2,3 GW Wind-Offshore im Jahr 2015 zugebaut. Diese in der Vergangenheit – in verschiedenen Jahren – realisierten Rekordzubauwerte müssten mindestens erneut erreicht (bzw. im Fall der Onshore-Windenergie sogar übertroffen) und verstetigt werden.

Sollten andere Länder kurzfristig einen ähnlichen Weg einschlagen und ihren Erneuerbaren-Ausbau deutlich beschleunigen – was aus Sicht des Klimaschutzes wünschenswert wäre – so wäre zunächst mit Engpässen bei der Anlagenherstellung zu rechnen. Bei einer glaubhaften ambitionierten Klimapolitik sollten die Kapazitäten der Anlagenhersteller aber schnell hochgefahren werden können und die Engpässe würden auf wenige Jahre begrenzt sein. Dem Aufbau einer installierten Kapazität von rund 300 bis 500 GW bis 2035 würde hinsichtlich der Herstellung und Errichtung der Anlagen unserer Einschätzung nach nichts Grundsätzliches im Weg stehen.

Auch die in Deutschland vorhandenen Potenziale für Wind- und Solarenergie stellen kein grundsätzliches Hindernis für einen beschleunigten Zubau bzw. eine installierte Gesamtmenge von 300 GW oder auch mehr dar (UBA 2013, Fath 2018).

Für die Realisierung eines solch schnellen Ausbaus ist allerdings eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz für den Ausbau erneuerbarer Energien zentral. Diese Grundvoraussetzung sollten energiepolitische Maßnahmen dringend im Blick haben.

Die Investitionsausgaben für einen Ausbau von 15 GW pro Jahr lägen bei einer angenommenen Aufteilung von 6 GW Photovoltaik, 2 GW Offshore-Wind und 7 GW Onshore-Wind bei derzeit ungefähr 23 Mrd. Euro pro Jahr und – infolge der erwarteten weiteren Kostensenkungen bei den Wind- und Photovoltaik-Anlagen (ISE 2020) – bei rund 19 Mrd. Euro im Jahr 2035. Damit müssten in diese Technologien in den kommenden 15 Jahren pro Jahr rund dreimal mehr investiert werden als 2019, allerdings „nur“ in etwa so viel wie bereits 2010 (22 Mrd. Euro) und 2011 (19 Mrd. Euro) (BMWi 2020).²⁸ Unter der Annahme, dass zukünftig infolge eines nur eingeschränkt möglichen Imports klimateutraler Energieträger ein deutlich höherer jährlicher Zubau von 27 GW benötigt wird, könnten sich die jährlichen Investitionsausgaben auf 38 Mrd. Euro (aktuelle Investitionskosten) bzw. 28 Mrd. Euro (erwartete Investitionskosten im Jahr 2035) belaufen. Dabei wurde ein jährlicher Ausbau von 17 GW Photovoltaik, 7 GW Onshore-Wind und 3 GW Offshore-Wind zugrunde gelegt.

²⁸ Gegenüber den Jahren 2010 und 2011 könnten mit einer ähnlichen Summe aufgrund der deutlich gesunkenen spezifischen Kosten allerdings rund 75 Prozent mehr Leistung errichtet werden und diese Anlagen würden etwa zweieinhalb mal soviel Strom erzeugen wie die 2010 zugebauten Anlagen. (Die Differenz der Steigerungsraten zwischen der Leistung und der Stromerzeugung ist vor allem auf die höheren Volllaststunden von Windenergieanlagen gegenüber Photovoltaik-Anlagen zurückzuführen – 2010 wurden vor allem letztere zugebaut.)

Stromnetzausbau und Schaffung ausreichender Speicherkapazitäten

Parallel zu einem starken Zubau von Wind- und Photovoltaik-Anlagen muss auch das deutsche und europäische Stromnetz infolge der sich ändernden Stromflüsse aus- und umgebaut werden. Einige der betrachteten Szenariostudien betonen, dass eine weitere deutliche Erhöhung der Anteile erneuerbarer Energien an der deutschen Stromerzeugung mindestens einen Aus- und Umbau des Übertragungsnetzes erfordern würde, wie er in den aktuellen Netzentwicklungsplänen (NEP) bis 2030/2035 beschrieben wird (zum Beispiel ÜNB 2019). Dies würde gegenüber den letzten Jahren eine Beschleunigung des Aus- und Umbaus des Transportnetzes und eine hierfür ausreichende gesellschaftliche Akzeptanz erfordern.

Beispielhaft für den schleppenden Fortschritt der letzten Jahre sei hier das Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG, ursprünglich von 2009) genannt, in dem 22 Projekte mit einer Gesamtlänge von ca. 1800 km festgelegt wurden. Sie sollten ursprünglich bis 2015 realisiert sein. Nach dem zweiten Quartal 2020 war aber mit 953 km erst knapp über die Hälfte der Gesamtlänge fertiggestellt (BNetzA 2020, BMWi 2019a).

Auch die Verteilnetze müssen aus- und umgebaut werden, um die dezentralen Erneuerbaren-Anlagen sowie die neuen Stromanwendungen wie Elektroautos einbinden zu können (Agora Verkehrswende et al. 2019).

Der letztlich nötige Netzausbaubedarf hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem vom Ausmaß der zusätzlichen Flexibilitäten im System, etwa nachfrageseitige Flexibilitäten bei der Stromnachfrage und flexible Back-up-Kraftwerke, und von der regionalen Verteilung der Erneuerbaren-Anlagen.

Genauere Analysen der spezifischen Herausforderungen für den Aus- und Umbau des deutschen Stromnetzes für das Erreichen von 100 Prozent erneuerbaren Energien bereits bis 2035 liegen unseres Wissens nach bisher nicht vor. Es ist aber zu vermuten, dass es keine grundsätzlichen technischen oder ökonomischen Hürden beim Aufbau eines 100-Prozent-Erneuerbaren-kompatiblen Stromnetzes bis 2035 gibt. Vielmehr dürfte die Herausforderung darin liegen, planungsrechtliche Schritte zu beschleunigen und ausreichende Akzeptanz für den Netzausbau sicherzustellen.

Parallel zum beschleunigten Ausbau der Wind- und Photovoltaik-Anlagen müssen auch zusätzliche Stromspeicher errichtet werden, um sicherzustellen, dass das Stromangebot jederzeit mit der Stromnachfrage in Deckung gebracht werden kann.

Dabei ist zwischen unterschiedlichen Speicherbedarfen zu unterscheiden. Für den kurzfristigen Ausgleich von Angebot und Nachfrage (etwa im Bereich von Minuten bis Stunden) eignen sich neben Pumpspeicherkraftwerken auch Batterien. Für den längerfristigen Ausgleich (Tage bis Monate) eignen sich chemische Speicher wie Wasserstoffspeicher. Der tatsächliche zukünftige Speicherbedarf und die Aufteilung auf verschiedene Speicherarten sollte unter Beachtung der Wechselwirkungen im Gesamtsystem bestimmt werden. Beispielsweise hat Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem nicht nur eine Funktion als Langzeitspeicher, sondern dient zugleich auch als potenziell treibhausgasneutraler Endenergieträger in den Sektoren Verkehr und Industrie. Eine solche doppelte Funktion kann zu (kostendämpfenden) Synergien im Gesamtsystem führen.

Bis zum Jahr 2050 sind im Szenario TM95 (dena 2018) 15 GW an stationären Batteriespeichern installiert, die über den Tag entstehende Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage ausgleichen. Im 95 %-Pfad (BDI 2018) ist die Batteriekapazität im Jahr 2050 mit 20 GW etwas höher. Die FZJ-Studie (2019) stellt hingegen in ihrem Szenario 95 fest, dass dank eines hohen Anteils batterieelektrischer Fahrzeuge im Verkehr und unter der Annahme, dass sich 10 Prozent der verfügbaren Speicherkapazitäten dieser Fahrzeuge systemdienlich nutzen lassen, „kein nennenswerter Ausbaubedarf“ an zusätzlichen Batteriespeichern existiert. Aufgrund der Möglichkeit der Massenherstellung von Batterien scheint auch ein evtl. notwendiger stärkerer Zubau stationärer Batteriekapazitäten kein grundsätzliches Hemmnis darzustellen. Allerdings sollten mögliche (vorübergehende aber auch längerfristige) Engpässe bei der Bereitstellung der für die Batterien benötigten Rohstoffe im Blick behalten werden (Pehlken et al. 2017).²⁹

Zusätzlich werden in den betrachteten Szenarien im Jahr 2050 zur Sicherstellung einer jederzeit ausreichenden Stromerzeugung Gaskraftwerkskapazitäten in Höhe von 10 bis 75 GW vorgesehen, die bis 2050 ausschließlich mit Biogas, Wasserstoff oder synthetischem Methan laufen, also mit klimaneutralen Gasen auf Basis erneuerbarer Energien.³⁰ Die Gründe für die deutlichen Unterschiede zwischen den Szenarien bezüglich der benötigten Gaskraftwerkskapazität liegen vermutlich unter anderem in abweichenden Annahmen über den Stromaustausch mit den europäischen Nachbarländern, den Mix an erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung und die Flexibilität der Stromnachfrage. Eine weitere Studie (Energy Brainpool 2017) kommt zu dem Schluss, dass in Deutschland für eine zu 100 Prozent auf erneuerbaren Energien beruhende und sichere Stromversorgung 67 GW an Gaskraftwerken (betrieben mit klimaneutralem Gas wie etwa grünem Wasserstoff) nötig seien.

Umstellung auf klimaneutrale gasförmige und flüssige Energieträger

Die meisten der hier betrachteten Szenarien erwarten bis 2050 einen Gesamtbedarf an Wasserstoff und gasförmigen sowie flüssigen synthetischen Energieträgern zwischen 400 und 900 TWh pro Jahr (siehe Abbildung 5-5).³¹ Die Szenarien nehmen dabei an, dass diese Energieträger auf Basis von erneuerbar erzeugtem Strom hergestellt werden, also zum Beispiel nicht auf Grundlage von Biomasse.

Die Höhe des Bedarfs variiert in den Szenarien unter anderem in Abhängigkeit von den jeweiligen Annahmen zu:

- Energieeffizienzsteigerungen in den Endenergiesektoren
- dem Umfang der (direkten) Elektrifizierung in den Endenergiesektoren
- Verhaltens- bzw. Lebensstiländerungen
- der Nutzung von CO₂-Abscheidung und -Speicherung (engl. Carbon Capture and Storage, CCS) in der Industrie

²⁹ Die Studie des UBA (2019) nimmt an, dass für stationäre Batterien nur ausrangierte Batterien aus Elektroautos zum Einsatz kommen („second-life“-Ansatz) und somit kein zusätzlicher Ressourcenbedarf entsteht.

³⁰ Gegenüber dem Einsatz von synthetischem Methan ist ein Einsatz von Wasserstoff aufgrund niedrigerer Umwandlungsverluste bei der Erzeugung des jeweiligen Sekundärenergieträgers energieeffizienter.

³¹ Nur unter der Annahme weitgehender Lebensstiländerungen ließe sich der jährliche Bedarf möglicherweise auf rund 200 TWh reduzieren (s. Szenario „Suffizienz“).

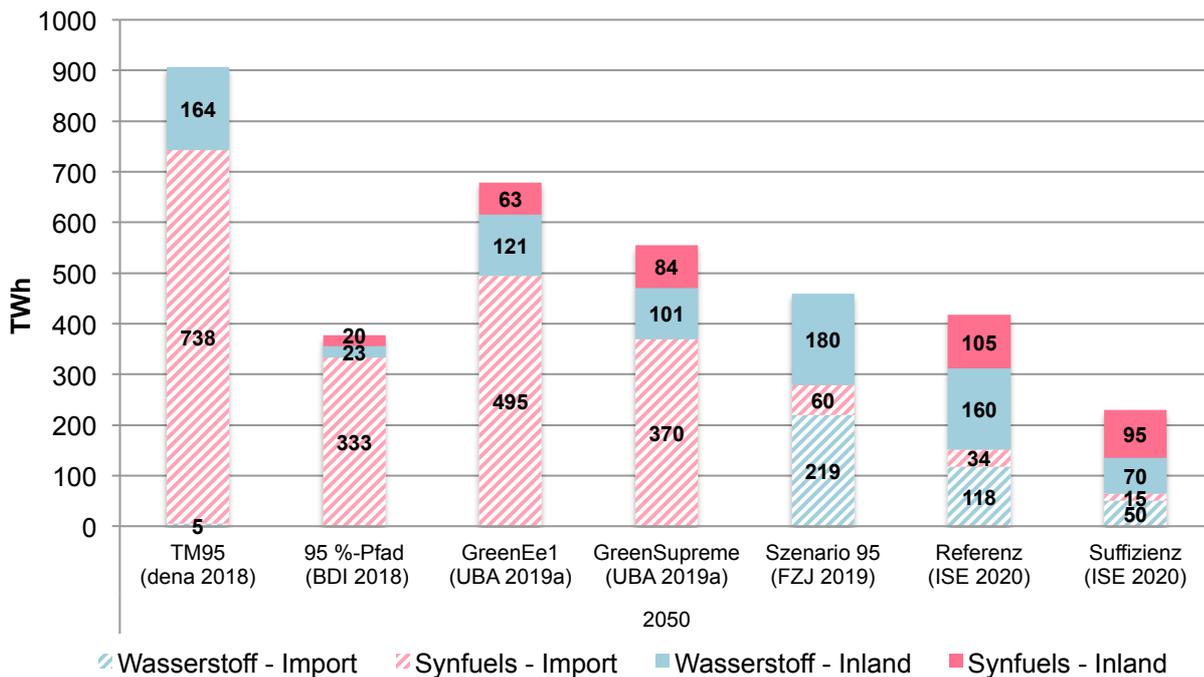


Abbildung 5-5 Bedarf an Wasserstoff und synthetischen Energieträgern nach ihrer Herkunft in verschiedenen Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 (in TWh)

Quellen: Basierend auf den zitierten Szenariostudien.

Dabei ist zu betonen, dass für eine vollständige Umstellung auf klimaneutrale strombasierte Energieträger weitgehende Reduktionen des Brenn- und Kraftstoffbedarfs nicht zuletzt durch Effizienzsteigerungen, veränderte Lebensstile und eine Realisierung der Potenziale zur direkten Nutzung von Strom (beispielsweise in Form von Wärmepumpen und Elektroautos) von zentraler Bedeutung sind. Dies verdeutlicht die folgende hypothetische Überlegung: Würde der gesamte gegenwärtige fossile Brenn- und Kraftstoffbedarf alleine der Sektoren Verkehr und Gebäude durch synthetische (strombasierte) Energieträger gedeckt werden müssen, so würde dies aufgrund der hohen Umwandlungsverluste bei deren Erzeugung zu einem zusätzlichen Strombedarf von rund 2400 TWh führen.³² Dies entspricht der vierfachen Menge des gesamten derzeitigen Strombedarfs in Deutschland. Zwar könnte die teilweise Nutzung von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff gegenüber synthetischen Energieträgern den Strombedarf aufgrund niedrigerer Umwandlungsverluste etwas reduzieren, aber auch dann wären angesichts der in Deutschland begrenzten Erneuerbaren-Potenziale sehr große Importe klimaneutraler Energieträger notwendig. Solche Importe dürften in dieser Größenordnung kaum realisierbar sein, schon gar nicht falls andere Länder eine vergleichbare Nachfrage hätten.

Die nach bedarfsreduzierenden Maßnahmen verbleibende Nachfrage nach Wasserstoff und synthetischen Energieträgern muss entweder durch inländische Erzeugung oder durch Importe gedeckt werden. In vielen der betrachteten Szenarien wird im Jahr 2050 ein Großteil des Bedarfs importiert (rund 65 bis 740 TWh). Dabei wird in

³² Für diese Rechnung wurde ein Wirkungsgrad von Strom zu flüssigen synthetischen Energieträgern von 50 Prozent sowie zu gasförmigen synthetischen Energieträgern von 65 Prozent angenommen.

einigen Szenarien ein Import vor allem von synthetischen (kohlenstoffhaltigen) Energieträgern angenommen, insbesondere da diese niedrigere Transportkosten aufweisen, wenn sie aus anderen Weltregionen importiert werden, und da sie infolge ihrer Ähnlichkeiten zu fossilen Energieträgern keinen großen Anpassungsbedarf in den Endenergiesektoren bedingen. Andere – vor allem neuere – Szenarien (FZJ 2019, ISE 2020) nehmen aber auch einen höheren Import von Wasserstoff gegenüber synthetischen Energieträgern an. Für eine Fokussierung auf Wasserstoff spricht der gegenüber synthetischen Energieträgern geringere Strombedarf für die Erzeugung (weniger Umwandlungsschritte und -verluste), sowie die Tatsache, dass für Wasserstoff kein Bedarf an einer Bereitstellung von (klimaneutralem) CO₂ anfällt.³³

In den meisten der betrachteten Szenarien (Ausnahme: 95 %-Pfad der Studie für den BDI) werden 2050 aber auch 70 bis 180 TWh Wasserstoff und teilweise – und zu meist in geringerem Maße – auch synthetische Energieträger innerhalb Deutschlands erzeugt. Für die inländische Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern (in Summe häufig auch als Power-to-X- bzw. PtX-Energieträger bezeichnet) fällt in diesen Szenarien ein Strombedarf in Höhe von ca. 200 bis 400 TWh an. Wichtige Gründe für eine gewisse PtX-Erzeugung im Inland ist die Tatsache, dass die Bereitstellungskosten für inländisch erzeugten Wasserstoff – soweit die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dafür ausreicht – günstiger sein könnten als von importiertem Wasserstoff.³⁴ Außerdem wird teilweise – unter anderem in der Studie für den BDI (2018) – argumentiert, dass eine gewisse inländische Erzeugung aus Gründen der Versorgungssicherheit sinnvoll wäre. Allerdings müsste für eine bedeutende inländische PtX-Erzeugung der Ausbau erneuerbarer Energien besonders hoch ausfallen, also auch die gesellschaftliche Akzeptanz für die Erschließung der notwendigen Potenziale gewährleistet sein.

Die meisten der betrachteten Klimaschutzszenarien halten in einem klimaneutralen Energiesystem eine inländische Wasserstoffherzeugung von rund 150 bis 200 TWh pro Jahr für notwendig oder sinnvoll (s. Abbildung 5-5). Ein Teil dieses Wasserstoffs könnte anschließend in kohlenstoffhaltige synthetische Brenn- oder Kraftstoffe umgewandelt werden. Die Kapazität an Elektrolyseuren, die für eine Wasserstoffherzeugung von 150 bis 200 TWh pro Jahr benötigt wird, hängt von den Volllaststunden der Elektrolyseure ab. Diese werden sich in Abhängigkeit der genauen Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems sowie der ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen ergeben.³⁵ Verschiedene vorliegende Szenarien erwarten eine durchschnittliche Anzahl an jährlichen Volllaststunden von knapp 3000. In einem solchen Fall müssten – bei einem hier angenommenen Wirkungsgrad der Elektrolyseure von

³³ Klimaneutrales CO₂ könnte zukünftig aus der Verbrennung oder Vergasung von Biomasse oder mittels direkter Gewinnung aus der Umgebungsluft („Direct Air Capture“, DAC) gewonnen werden.

³⁴ Zwar werden die Gesteungskosten von Wasserstoff in vielen Regionen der Welt – aufgrund besserer Erneuerbaren-Potenziale – sicherlich niedriger sein als in Deutschland, allerdings ist der Wasserstoff-Transport per Schiff kostenintensiv, so dass im Endeffekt inländisch erzeugter Wasserstoff günstiger sein könnte.

³⁵ Dabei gibt es einen Trade-off zwischen einer grundsätzlich wünschenswerten hohen Auslastung der Elektrolyseure (das heißt möglichst hohen Volllaststunden, um die Investitionssumme auf eine große Wasserstoff-Menge zu verteilen) und einem möglichst systemdienlichen Betrieb der Elektrolyseure in Form eines flexiblen Einsatz (das heißt moderate bis niedrige Volllaststunden je nach dominanter Erneuerbarer-Energien-Stromquelle, um einen Beitrag zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung zu leisten).

75 Prozent – für eine jährliche Bereitstellung von 150 TWh³⁶ Wasserstoff Elektrolyseure mit einer Kapazität von rund 70 GW errichtet werden, für eine Erzeugung von 200 TWh pro Jahr müssten es rund 90 GW sein.³⁷ Die Bundesregierung strebt im Rahmen ihrer Wasserstoffstrategie (Bundesregierung 2020b) hingegen bis 2035 eine Kapazität an Elektrolyseuren in Höhe von maximal 10 GW an.³⁸

Die Kosten des Imports synthetischer Energieträger (und geringer Mengen an Wasserstoff) werden im Szenario TM95 (dena 2018) für das Jahr 2050 mit 77 Mrd. Euro angegeben. Für den 95 %-Pfad lassen sich aus den Angaben der Studie (BDI 2018) PtX-Importkosten im Jahr 2050 in Höhe von ca. 50 Mrd. Euro ableiten. Im Szenario 95 (FZJ 2019) liegen die Importkosten 2050 bei nur rund 40 Mrd. Euro – hier werden gegenüber den anderen beiden genannten Szenarien geringere Importmengen angenommen. Diesen Studien zufolge könnten die Importkosten für ein klimaneutrales Energiesystem damit in der Größenordnung der derzeitigen Kosten für die Importe fossiler Energieträger nach Deutschland liegen (63 Mrd. Euro im Jahr 2018, nach FZJ 2019).

Um mögliche Kostenvorteile der inländischen Wasserstoff-Erzeugung zu nutzen und die Unsicherheit über die Verfügbarkeit großer PtX-Importmengen bereits bis 2035 zu berücksichtigen³⁹, erscheint ein bedeutender inländischer Elektrolyseur-Zubau angebracht. Ein solch starker Zubau erfordert aus Gründen des Klimaschutzes aber in jedem Fall einen frühzeitigen und starken inländischen Ausbau von Wind- und Photovoltaik-Anlagen, voraussichtlich mindestens im Umfang der oben erwähnten rund 27 GW pro Jahr.

Grundsätzlich erscheint ein Zubau von Elektrolyseuren in Höhe von rund 70 bis 90 GW auch bis 2035 machbar, wenn in den nächsten Jahren die Herstellung dieser Anlagen erfolgreich hochgefahren wird. Aufgrund des relativ frühen Entwicklungsstands und der derzeit wenigen Hersteller ist für eine solche Entwicklung aber ein schneller und entschiedener Einstieg notwendig, denn das Hochfahren bis zur Massenherstellung wird sicherlich einige Jahre in Anspruch nehmen.

Der zusätzlich notwendige Import von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern erfordert eine frühzeitige Kooperation mit anderen Ländern. Diese Länder sollten von Deutschland und anderen Industrieländern beim Aufbau von Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Elektrolyseuren sowie bei der Errichtung der notwendigen Export-Infrastruktur finanziell, technisch und logistisch unterstützt werden. Dabei sollte beachtet werden, dass es sinnvoll ist, zunächst zumindest einen Großteil der im Ausland erzeugten PtX-Mengen zu nutzen, um in den jeweiligen Herkunftsländern den Einsatz fossiler Energieträger zu substituieren.

³⁶ Alle Angaben zu Wasserstoff beziehen sich auf den unteren Heizwert (ca. 33 kWh/kg H₂).

³⁷ Sollten sich zukünftig höhere durchschnittliche jährliche Volllaststunden der Elektrolyseure von zum Beispiel 5000 realisieren lassen, so könnte der Bedarf auf 40 GW (für 150 TWh pro Jahr) bzw. rund 55 GW (für 200 TWh pro Jahr) reduziert werden.

³⁸ In vorliegenden Szenarien, die ein klimaneutrales Energiesystem bis 2050 beschreiben, werden bis 2035 maximal rund 20 GW an Elektrolyseuren in Deutschland angenommen.

³⁹ Kostenvorteile könnten sich durch den Verzicht auf lange Transportwege sowie die in Deutschland gegenüber vielen anderen Ländern geringeren Kapitalkosten ergeben (Schindler 2019).

Aufgrund der vielen unterschiedlichen Möglichkeiten, Wasserstoff zu erzeugen, wird zukünftig insbesondere im Fall eines bedeutenden Imports von Wasserstoff oder auf Grundlage von Wasserstoff erzeugter synthetischer Energieträger ein zuverlässiges Zertifizierungssystem wichtig sein, um Klimaneutralität und gegebenenfalls weitere Nachhaltigkeitsstandards gewährleisten zu können.

Skizzierung möglicher politischer Instrumente für die Transformation der Energiewirtschaft

Vor dem Hintergrund der zuvor durchgeführten Analysen ist eine deutliche Anhebung der Erneuerbaren-Ziele bis 2030 sowie eine einhergehende Anhebung der Ausschreibungsmengen von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen dringend notwendig, sofern ein klimaneutrales Energiesystem bis 2035 angestrebt wird. Um dieses Ziel mit hinreichender Wahrscheinlichkeit erreichen zu können, ohne auf die aus heutiger Sicht unsichere zukünftige Realisierbarkeit großer Mengen an Importen klimaneutraler Energieträger angewiesen zu sein, scheint nach heutigem Wissensstand eine möglichst baldige Erhöhung des jährlichen Brutto-Zubaus von Wind- und Photovoltaik-Anlagen auf zusammen mindestens etwa 25 bis 30 GW sinnvoll zu sein.

Allerdings ist eine reine Anhebung der Ziele und auch der Ausschreibungsmengen insbesondere bei der Onshore-Windenergie nicht ausreichend, da es dort derzeit eine Knappheit genehmigungsfähiger Projekte gibt und mitunter auch erhebliche Akzeptanzprobleme vor Ort zu überwinden sind. Im September 2019 haben Verbände der Energiewirtschaft gemeinsam mit Umweltverbänden verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen, um den Onshore-Windenergieausbau wieder zu beleben (BDEW et al. 2019). Auch das Bundeswirtschaftsministerium (BMWi 2019b) hat einen Monat später einen 18 Punkte umfassenden Maßnahmenplan für eine Stärkung des Onshore-Ausbaus vorgelegt, der aktuell in die Umsetzung überführt wird. Eine wichtige Maßnahme ist dabei eine stärkere Beteiligung der Anwohnenden sowie der Kommunen am Betrieb von Windenergieanlagen bzw. an den von diesen generierten Einnahmen. Hinzu kommen muss eine stärkere und beschleunigte Abstimmung zwischen Arten beziehungsweise Naturschutz auf der einen und Klimaschutz auf der anderen Seite sowie die Bildung entsprechender Allianzen.

Eine Beschleunigung des Onshore-Ausbaus könnte auch durch einen teilweisen Verzicht auf die Pflicht zur Teilnahme an Auktionen erreicht werden. So erlaubt die EU die Anwendung entsprechender Ausnahmen („De-minimis-Regelung“) für Projekte mit wenigen Anlagen und einer Gesamtkapazität von bis zu 18 MW. Dies könnte vor allem kleineren Windkraftprojekten wie Bürgerwindparks neuen Schwung geben.

Als ein Element für eine deutliche Steigerung des Ausbaus von Photovoltaik-Dachanlagen könnte eine Installations- bzw. Nutzungspflicht für Photovoltaik und/oder Solarthermie beim Neubau sowie bei Dachsanierungen beziehungsweise beim Eigentümerwechsel gesetzlich verankert werden, um die immer noch erheblichen Potenziale der Solarenergienutzung auf bestehenden Gebäuden schneller erschließen zu können.⁴⁰

⁴⁰ Gebäudebesitzerinnen und -besitzern könnte als Alternative angeboten werden, dass die Dachflächen für die Installation von Anlagen durch Dritte bzw. den Staat (gegen Entgelt) zur Verfügung gestellt werden müssen.

Mit Blick auf den knappen Zeitrahmen bis zum Jahr 2035 sollten aber auch ganz neue Ansätze geprüft werden. Grundsätzlich denkbar ist beispielsweise der Aufbau einer staatlichen Gesellschaft, die – mit hoher finanzieller Ausstattung – in Erneuerbare-Energien-Anlagen investiert, neue Vorhaben mit hoher Transparenz und unter Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern aussucht und umsetzt und deren Tätigkeit regelmäßig von einem wissenschaftlichen Beirat evaluiert wird.

Ein gegenüber heute deutlich höherer CO₂-Preis – in Richtung der 180 Euro pro Tonne, die Fridays for Future Deutschland auf Grundlage wissenschaftlicher Schätzungen der Klimafolgenkosten (UBA 2019b) fordert – würde den Betrieb von Erneuerbare-Energien-Anlagen im Vergleich zu dem dann stark verteuerten Betrieb von Kohle- und Gaskraftwerken wesentlich wettbewerbsfähiger machen. Dies könnte die Investitionstätigkeit im Bereich der erneuerbaren Energien deutlich erhöhen und nicht zuletzt auch dafür sorgen, dass Unternehmen der konventionellen Energiewirtschaft früher als geplant auf ein rein erneuerbares Portfolio umsteigen.⁴¹

Zur Ermöglichung einer Bereitstellung ausschließlich klimaneutraler Brennstoffe bis 2035 könnte über eine umfassende Beimischungsquote nachgedacht werden. So könnte beispielsweise ab 2026 für die Unternehmen der Gas- und Ölwirtschaft eine Beimischungsquote für CO₂-neutrale Kraftstoffe und Gase in Kraft treten – im Idealfall auf europäischer Ebene. Diese Quote könnte um 10 Prozentpunkte pro Jahr ansteigen, so dass im Jahr 2035 dann 100 Prozent der auf den Markt gebrachten gasförmigen und flüssigen Energieträger klimaneutral sein müssten. Die Quote könnte sich auf die gesamte Bereitstellung von Öl und Gas beziehen, also auch das Gas für Kraftwerke einschließen. Einhergehen müsste eine solche Quote mit der Definition und zuverlässigen Prüfung von Nachhaltigkeitsstandards, insbesondere auch für importierte Kraftstoffe und Gase.

Für einen deutlich beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und die Gewährleistung einer sicheren Stromversorgung ist grundsätzlich eine Stärkung der europäischen Zusammenarbeit von hoher Bedeutung. Deutschland sollte hier insbesondere mit den skandinavischen Ländern, den Niederlanden, Frankreich und Polen eng zusammenarbeiten und nach gemeinschaftlichen Lösungen suchen.

Schließlich ist auch eine frühzeitige und intensive Kooperation mit den in Frage kommenden Exportländern von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern (zum Beispiel Marokko) wichtig. Die im Ausland für die Deckung der deutschen Energienachfrage benötigten Erneuerbare-Energien-Anlagen und Elektrolyseure müssten in diesen Ländern finanziert und eine frühzeitige Umsetzung der für den Import notwendigen Infrastruktur (zum Beispiel Wasserstoff-Fernleitungspipelines) kurzfristig in die Wege geleitet werden. Von zentraler Bedeutung ist dabei ein auf Partnerschaft ausgerichteter Vorgehen, das gleichermaßen die Versorgungssituation in den Exportländern im Blick hat und sozio-ökonomische Impactanalysen einschließt.

⁴¹ Die Einführung eines solch hohen CO₂-Preises sollte zur Abfederung ökonomischer und sozialer Härten durch angemessene flankierende Instrumente ergänzt werden (Wuppertal Institut 2019).

6 Industrie

Klimaneutralität bereits bis 2035 stellt für den Industriesektor eine **besondere Herausforderung** dar: Zum einen sind bestimmte für Klimaneutralität **benötigte Technologien bzw. Prozess noch nicht kommerziell verfügbar** bzw. technisch ausgereift, zum anderen sind insbesondere in der Grundstoffindustrie die üblichen **Anlagenlebensdauern sehr lang**, was für eine Transformation innerhalb von lediglich fünfzehn Jahren eine enorme zu überwindende Hürde darstellt.

Der vollständige und schnelle Ersatz fossiler Energien und fossiler chemischer Grundstoffe in der Industrie erfordert insbesondere den **Ersatz der fossilen Kraftwerke** der Industrie durch erneuerbare Energien, die Elektrifizierung der Dampf- und Wärmeerzeugung – zum Beispiel über Elektrokessel und Hochtemperatur-Wärmepumpen – und den Ersatz fossiler Grundstoffe in der chemischen Industrie durch Kreislaufführung und biogene Materialien (unter Beachtung von deren begrenzter Verfügbarkeit).

Wegen des bestehenden hohen Reinvestitionsbedarfs sollten dabei **ab sofort ausschließlich THG-Neutralitäts-kompatible Neuinstallationen** erfolgen, da sonst aufgrund der langen Anlagenlebensdauern lock-in-Situationen entstehen würden.

Der **konsequente und schnelle Aufbau einer Kreislaufwirtschaft** (circular economy) verringert den Bedarf der energieintensiven Primärmaterial-Produktion. Aufeinander aufbauende Strategien sind hierbei die Verringerung der Nachfrage nach Gütern und die Steigerung der Materialeffizienz inklusive des Einsatzes alternativer und leichter recyclebarer Materialien (Reduce), die Weiternutzung von Produkten oder Komponenten (Reuse), sowie das mechanische sowie chemische Kunststoffrecycling.

Die **schnelle Einführung von (weitgehend) treibhausgasneutralen Technologien und dafür notwendigen Infrastrukturen im Bereich der Grundstoffindustrie** erfordert forcierte Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen (Demo- und Pilotanlagen), eine schnelle Markteinführung und flächendeckendes Ausrollen von nicht-fossilen Prozesstechnologien (zum Beispiel Wasserstoff-basierte Stahlerzeugung), den Einstieg in eine branchenübergreifende Wasserstoffwirtschaft inkl. Aufbau von Elektrolyseuren und Wasserstoff-Pipelines sowie den Aufbau eines CO₂-Transportnetzes für die Nutzung oder Endlagerung unvermeidbarer Restemissionen an CO₂.

Die Umsetzung einer schnellen Transformation der Industrie erfordert eine **Reihe von Maßnahmen**. Ein **ambitionierter CO₂-Mindestpreis** ist ein wichtiges Instrument, jedoch nicht alleine ausreichend, um notwendige innovative Schlüsseltechnologien ökonomisch attraktiv werden zu lassen. Von hoher Bedeutung sind der **Aufbau von grünen Produktmärkten** (zum Beispiel grüner Stahl) sowie **flankierende Maßnahmen zur Sicherstellung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit** der Unternehmen, um eine Verlagerung von Produktion und damit verbundenen Emissionen ins Ausland („carbon leakage“) zu vermeiden.

Sektorbeschreibung

Im Jahr 2019 emittierte die Industrie nach vorläufigen Angaben des Umweltbundesamts Treibhausgase in Höhe von 188 Mt CO₂-Äquivalente (UBA 2020b). Dies waren ca. 23 Prozent der gesamten deutschen THG-Emissionen. Hinzu kommen noch die indirekten Emissionen des Strombezugs, die im Bereich der Kraftwerke und damit im Sektor Energiewirtschaft bilanziert werden. In den letzten Jahren nahm der Anteil der Industrie an den Gesamtemissionen leicht zu, im Jahr 2012 betrug er 22 Prozent mit circa 200 Mt von insgesamt 884 Mt. Innerhalb der Industrie dominieren die Emissionen der drei Branchen Eisen und Stahl (29 Prozent), Grundstoffchemie (19 Prozent) und Zement (10 Prozent), wie in Abbildung 6-1 dargestellt (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a). Eine detaillierte Aufstellung findet sich in Tabelle 6-1

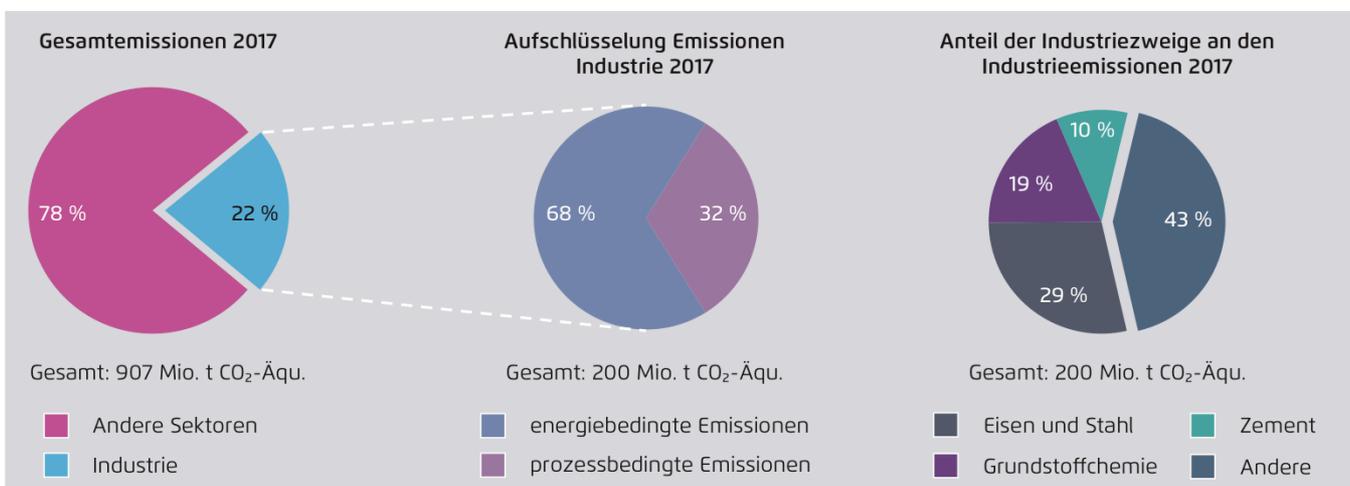


Abbildung 6-1 Treibhausgas-Emissionen der deutschen Grundstoffindustrie im Jahr 2017

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019a).

Zwei Drittel der Emissionen der Industrie entstehen energiebedingt und können daher grundsätzlich durch den Einsatz von treibhausgasneutralen Energieträgern in Kombination mit den dafür benötigten Technologien vermieden werden. Ein Drittel sind allerdings prozessbedingte Emissionen, deren Vermeidung eine tiefere Umstellung der entsprechenden Prozessrouten erfordert. Allerdings sind nicht für alle Produkte potenziell klimaneutrale Ersatzrouten verfügbar oder es fallen auch bei diesen noch – wenn auch in zumeist deutlich geringerem Umfang – Treibhausgasemissionen an, so dass auch weiterhin Restemissionen bestehen bleiben. Diese müssten – soweit die Prozesse unvermeidbar sind und keine Substitutionsmöglichkeiten für die Produkte bestehen – entsprechend entweder abgetrennt und genutzt bzw. abgelagert werden oder anderweitig kompensiert werden.

Seit 1990 sind die Emissionen der Industrie um 34 Prozent gesunken. Während die Industrie vor allem in den 1990er-Jahren überdurchschnittliche Emissionsminderungen aufwies, lagen diese seitdem eher unterhalb des Trends der übrigen Sektoren. Wesentlichen Anteil an der Verringerung der Emissionen hatte die Vermeidung von klimarelevanten Nicht-CO₂-Emissionen wie Lachgas in der Chemieindustrie sowie in den letzten Jahren die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien.

Zentrale Strategien im Bereich der emissionsintensiven Industrien sind heute die Umstellung der Produktionsverfahren auf den Einsatz erneuerbarer Energieträger (zum Beispiel wasserstoffbasierte Stahlerzeugung) und Rohstoffe und die weitere Optimierung von Prozessketten. Ersteres kann insbesondere durch Technologien zur Umwandlung von Wasserstoff in Grundstoffchemikalien und synthetische (vor allem flüssige) Energieträger erfolgen, durch die Elektrifizierung von Prozessen, entweder in direkter Form oder indirekt über elektrolytisch hergestellten Wasserstoff sowie durch Technologien zur Verwendung und Bindung von CO₂ (Carbon Capture and Use: CCU) oder durch Technologien zum Auffangen und Endlagern von CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS) geleistet werden. Weitere zentrale Strategien sind verstärkte Kreislaufführung (Circular Economy) und gesteigerte Materialeffizienz auf allen Weiterverarbeitungsstufen, wodurch die Bedarfe an Primärmaterialien mit den damit einhergehenden Energiebedarfen und Emissionen deutlich gesenkt werden können sowie die Substitution emissionsintensiver Güter durch klimafreundlichere Alternativen auf der Produktseite. Einspareffekte entstehen außerdem durch eine intensivere Nutzung von Produkten beispielsweise im Rahmen der sharing economy.

Tabelle 6-1 Auflistung der Treibhausgas-Emissionen der deutschen Grundstoffindustrie im Jahr 2017

Branche	Direkte Emissionen in Mt CO ₂ -Äquivalente	Davon prozessbedingte Emissionen in Mt CO ₂ -Äquivalente	Endenergiebedarf in TWh
Eisen und Stahl	57,0	18,1	150
Nichteisen-Metalle und Gießereien	3,1	1,1	36
Grundstoffchemie	37,2	6,8	160
Zement	20,5	13,4	28
Kalk und Gips	7,4	4,8	8
Glas und Keramik	6,4	2,0	24
Zellstoff, Papier und Pappe	9,4	-	62
Hier aufgeführte Branchen der Grundstoffindustrie	141,0	46,2	470
Industrie gesamt (verarbeitendes Gewerbe)	200	64,5	740

Quelle: Basierend auf Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019a).

Der Energiebedarf der Industrie wird in den betrachteten Szenarien als tendenziell rückläufig erachtet, was vorrangig durch angenommene Effizienzsteigerungen zustande kommt⁴², jedoch weisen sie eine große Bandbreite auf (siehe Abbildung 6-2). Eine Produktionsausweitung findet in den Szenarien im Wesentlichen nicht statt, aber auch kein starker Produktionsrückgang. In der Industrie gibt es eine starke Verschiebung von fossilen Energieträgern insbesondere hin zu Strom und Wasserstoff.

⁴² Rebound-Effekte werden dabei implizit als entweder nur schwach ausgeprägt oder als durch äußere Bedingungen vermieden angesetzt.

Das dena-Szenario setzt bis 2050 außerdem vermehrt auf synthetische Gase, während der BDI den Einsatz großer Mengen an Biomasse vorsieht, die den Ersatz fossiler Energieträger mit möglichst geringen Eingriffen in bestehende Anlagenparks ermöglichen soll. Die Biomasse spielt in den UBA-Szenarien wiederum aus Gründen der Ressourcenschonung keine nennenswerte Rolle.⁴³

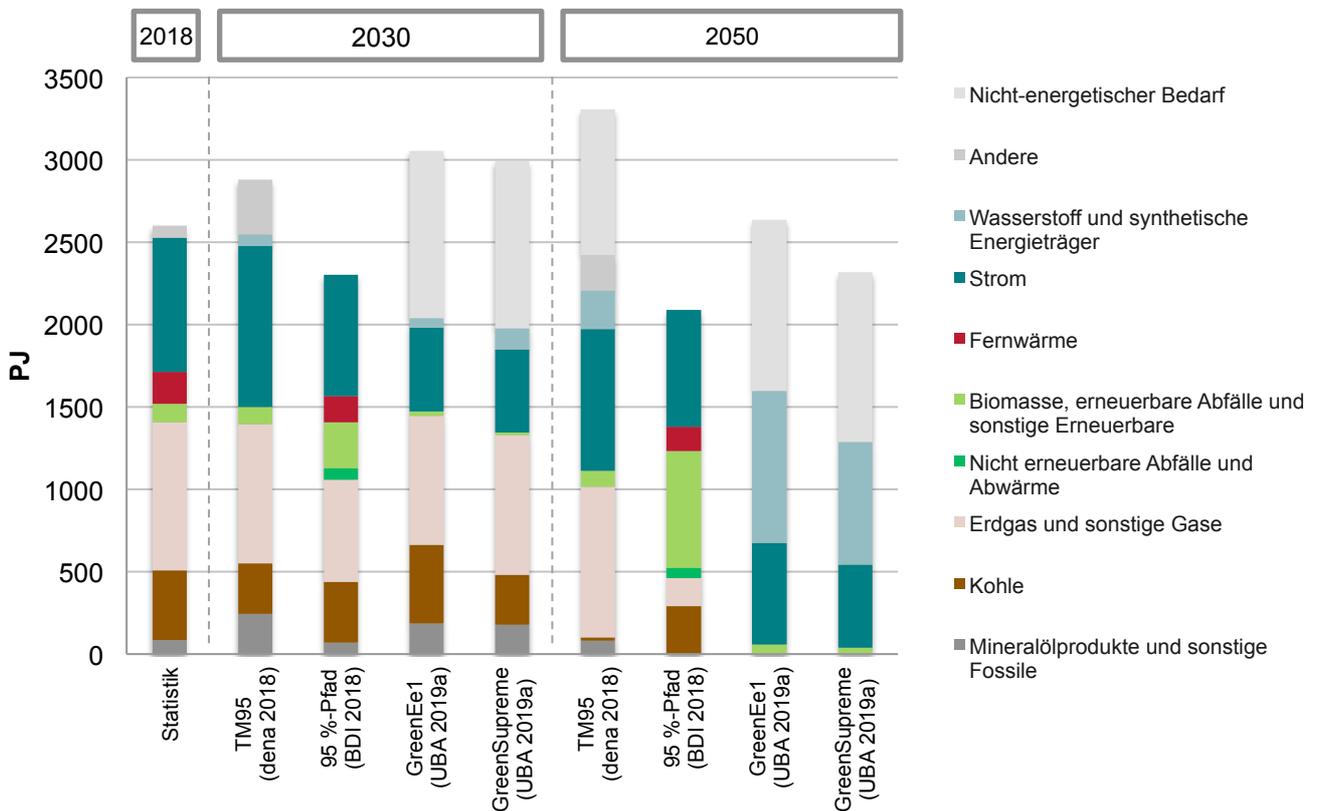


Abbildung 6-2 Endenergieverbrauch der Industrie nach Energieträgern im Szenarienvergleich (in PJ)

Quellen: Basierend auf AG Energiebilanzen (2020a) und den zitierten Szenariostudien.

Um ein Bild von den Größenverhältnissen zu bekommen, ist für einige Szenarien außerdem der nicht-energetische Bedarf ausgewiesen, das heißt die stoffliche Verwendung von zum Beispiel Rohöl oder Erdgas (überwiegend in der Chemieproduktion), die ebenfalls nach und nach durch erneuerbare Rohstoffe (etwa synthetisches Gas) ersetzt werden müssen. Der Import von energieintensiv produzierten Grundstoffen wie beispielsweise Aluminium, Eisen oder Basischemikalien stellt damit zugleich einen indirekten Energieimport dar.⁴⁴

⁴³ Diese unterschiedlichen Strategien im Industriesektor gehen einher mit unterschiedlichen Strategien zur Verwendung von CCS. Im BDI-Szenario ist – im Sinne einer Erhaltung bestehender Produktionstechnologien – die Abscheidung und Speicherung großer CO₂-Mengen notwendig. Im dena-Szenario sind es hingegen geringere Mengen und die UBA-Szenarien verzichten gänzlich auf CCS.

⁴⁴ Auch kann beim Einsatz dieser Stoffe teilweise wieder Energie freigesetzt oder nur in geringerem Maß zugegeben werden als dies bei niederenergetischen Stoffen der Fall wäre. Als Beispiel sei die Weiterverarbeitung von Wasserstoff oder Methan zu anderen chemischen Verbindungen genannt (zum Beispiel Ammoniak, Düngemittel oder Olefine wie Ethylen und Propylen).

Für die Zukunft sind bei aktueller Produktionsmenge nur leichte Rückgänge im Energiebedarf möglich, da viele Optionen zur Effizienzsteigerung aus Kostengründen schon umgesetzt worden sind. Eine Bedarfsreduktion an neuem Primärmaterialien durch eine verstärkte Kreislaufwirtschaft kann hier allerdings grundsätzlich weitere Potenziale heben, die für die verschiedenen Branchen und Stoffe unterschiedlich stark ausgeprägt sind, in manchen Bereichen allerdings bis ca. 50 Prozent betragen können (Material Economics & Wuppertal Institut 2019). Einen weiteren künftigen starken Hebel zur Effizienzsteigerung (und Reduktion der einzusetzenden Primärenergie) stellt die Elektrifizierung dar, allerdings ist diese nicht für alle Prozesse und alle Temperaturbereiche gleichermaßen möglich. Dementsprechend ist es z. T. erforderlich, auf die Verbrennung von Wasserstoff für die Prozessdampferzeugung überzugehen. Wasserstoff (und zuvor aufgefangenes CO₂) stellen zudem wichtige Bausteine für die künftigen Feedstocks in der Industrie dar. Durch die Nutzung von Fernwärme können darüber hinaus weitere Teile des Industriebedarfs an Niedertemperaturwärme gedeckt werden und teilweise – wo noch nicht geschehen – die Abwärme von Industrieprozessen auch wiederum ins Wärmenetz eingespeist werden (s. auch die Infobox „Konversion zu grüner Nah- und Fernwärme“).⁴⁵

Somit ist davon auszugehen, dass hohe Mengen an Strom und Wasserstoff erforderlich werden. Ein Teil dieses Zusatzbedarfs kann alternativ über synthetische Energieträger bereitgestellt und ggf. importiert werden, jedoch geht dies durch die unvermeidlichen Umwandlungsverluste wiederum stark zu Lasten der Energieeffizienz. Angesichts der Tatsache, dass die Möglichkeit großer Importe synthetischer Energieträger bis bereits 2035 unklar ist, empfiehlt es sich allerdings, möglichst stark auf Elektrifizierung und inländischen Wasserstoff zu setzen.

Wesentliche zu überwindende Hindernisse und Risiken für die Transformation der Industriebranchen sind auf der einen Seite der Bedarf an Neuanlagen mit treibhausgasneutralen bzw. mit Treibhausgasneutralität kompatiblen neuen Technologien. Viele dieser Schlüsseltechnologien sind derzeit technisch allerdings noch nicht vollständig ausgereift. Die großskalige technische Verfügbarkeit mancher Technologien bis 2035 ist nur bei einem schnellen Tempo der Aktivitäten in Forschung und Entwicklung gewährleistet (siehe auch Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a; DLR et al. 2016). Über die Stufe von Labor- oder Pilotanlagen hinaus müssen Demonstratoren und Anlagen kommerzieller Größe entwickelt und errichtet werden. Um eine umfassende Durchdringung der Industrie mit diesen derzeit und in naher Zukunft nicht wettbewerbsfähigen Technologien zu erreichen, sind zudem umfangreiche finanzielle oder regulatorische Unterstützungsmaßnahmen nötig. Zudem braucht es Zeit, um die – nach erfolgreicher Demonstrationsphase – verfügbaren kommerziellen Anlagen auch flächendeckend zu errichten und in Betrieb zu nehmen. Insofern ist für eine Zielerreichung der Treibhausgasneutralität bis 2035 eine drastische Beschleunigung der Innovations- und Entwicklungsdynamik auf der einen Seite sowie der Erprobungs- und Umsetzungsdynamik auf der anderen Seite nötig. Dies ist

⁴⁵ Es sei hierbei allerdings darauf hingewiesen, dass die bislang nicht gehobene Restpotenziale oftmals entweder aufgrund bestehender technischer Hürden oder auch durch einander entgegenlaufende Interessen der potenziellen Akteure zumindest unter aktuellen Rahmenbedingungen nur schwer ökonomisch attraktiv zu realisieren sein dürften.

grundsätzlich technisch denkbar, allerdings müssen dafür große organisatorische und ökonomische Hürden überwunden werden (inklusive Beschleunigung der Planungs- und Genehmigungsverfahren, Umsetzung von Fördermaßnahmen für Unternehmen im globalen Wettbewerbsmarkt).

Durch die langen Anlagenlebensdauern und (Re-)Investitionszyklen von typischerweise mindestens 20, teilweise über 50 Jahren erfolgt der Austausch zentraler Prozesstechnologien in der Grundstoffindustrie in der Regel vergleichsweise langsam, eine frühere Anlagenstilllegung vor dem Erreichen der technischen Lebensdauer ist mit zusätzlichen Kosten verbunden. Das bedeutet zudem auch, dass alle in den kommenden Jahren neu errichteten Anlagen weit über das Jahr 2035 (und meist auch über 2050) hinaus in Betrieb bleiben werden. Sollen diese in einer treibhausgasneutralen Industrie noch in Betrieb bleiben, aber nicht von vornherein treibhausgasneutral umgesetzt werden können, besteht die Notwendigkeit, dass sie zumindest schon kompatibel mit einem später möglichen treibhausgasneutralen Betrieb errichtet werden. In den kommenden zehn Jahren stehen ohnehin wesentliche Reinvestitionen in den zentralen Branchen der Grundstoffindustrie – also Stahl, Chemie und Zement – an, wodurch ein wichtiges Investitionsfenster existiert, das für Investitionen in treibhausgasneutrale, oder damit zumindest kompatible Prozesse genutzt werden müsste. Der Reinvestitionsbedarf umfasst ca. 50 Prozent der aktuellen deutschen Hochofenkapazitäten in der Stahlbranche, 50 bis 70 Prozent der aktuellen Steamcracker-Kapazitäten in der Grundstoffchemie (wobei derartige Anlagen in der Regel komponentenweise überarbeitet werden) und ca. 30 Prozent der Kapazitäten der aktuellen Zementöfen. (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a)

Ein großes Problem der Industrie bei Investitionen in klimaneutrale Technologien stellt die Unklarheit dar, welche Technologien eingesetzt bzw. optimal kombiniert werden sollen. Diese Unsicherheit entsteht einerseits aufgrund der fehlenden politischen Rahmensetzungen und andererseits aufgrund des teilweise noch fehlenden Wissens zur sinnvollen Gestaltung klimaneutraler Systeme. Die verschiedenen technologischen Entwicklungsrouten beeinflussen die Industrietechnologien bis weit in die Zukunft (Rootzén & Johnsson 2013). So erfordert eine stark auf Elektrifizierung und inländische Stromerzeugung ausgerichtete Gesamtstrategie andere Anlagen und Infrastrukturen als eine stärker auf Importe von Wasserstoff und wasserstoffbasierte Energieträger oder Rohstoffe ausgerichtete Strategie respektive eine Strategie, die im größeren Umfang CCS als Lösungsoption favorisiert. Für eine hinreichende Investitionssicherheit wäre es also wichtig eine kohärente Strategie aus den verschiedenen Optionen zu entwickeln, die auch europäisch abgestimmt sein müsste beziehungsweise diesen Rahmen zumindest mitberücksichtigt.

Zugleich müssen die Veränderungen ausreichend tiefgehend erfolgen, um einen 100-Prozent-Minderungspfad zu ermöglichen. Dies kann bedeuten, dass vergleichsweise kurzfristig umsetzbare Optimierungen von fossil basierten Prozessen mit den damit verbundenen Investitionen mittelfristig zu gestrandeten Investitionen – also dass Anlagen vor Ende ihrer Lebensdauer abgeschaltet werden müssen – oder zu Lock-In-Situationen führen (etwa dem Gefangensein in ungünstigeren Pfaden), die dann einer schnelleren Erreichung vollständiger Treibhausgasneutralität im Wege stehen könnten. Dieses Risiko wäre beispielsweise bei einem kurzfristigen Fokus auf neue, hocheffiziente fossile Steamcracker gegeben.

Bislang sind zudem noch keine – für die hohen konzentrierten Energiebedarfe einer klimaneutralen Grundstoffproduktion ausreichenden – Infrastrukturen für erneuerbaren Strom, Wasserstoff und CO₂ vorhanden. Deren zeit- und kapitalaufwändiger Aufbau erfordert eine branchen- und sektorübergreifende Abstimmung sowie aufgrund der typischen Henne-Ei-Problematik eine vor allem von der politischen Ebenen ausgehende Koordination und muss zudem europaweit abgestimmt sein.

Da die Unternehmen der Grundstoffindustrie sich zum weit überwiegenden Anteil im globalen Wettbewerbskontext bewegen, besteht die Gefahr von Carbon-Leakage-Effekten. Diese besteht dann, wenn auf globaler Ebene konkurrierende Unternehmen (nahezu) identische Grundstoffe aufgrund schwächerer Umweltauflagen mit niedrigeren Kosten erzeugen können. Es kann dementsprechend zu einer Produktionsverlagerung zu Standorten mit schwächerem Klimaschutz führen, falls die jeweiligen anderen Länder nicht ähnlich ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen umsetzen. Um dieser Gefahr zu begegnen sind verschiedene Lösungsoptionen in der Diskussion. Flankierend zum bestehenden Europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS) wären dies für von Leakage bedrohte Branchen entweder eine Fortsetzung der kostenlosen Zuteilung von Emissionsrechten oder ein CO₂-Grenzausgleich, etwa im Rahmen einer Border Adjustment Tax. Hinzu kommen die Kompensation klimaschutzbedingter Mehrkosten für klimaneutrale Investitionen (zum Beispiel über Carbon Contracts for Difference) sowie die Schaffung inländischer Märkte für klimaneutrale Produkte, zum Beispiel über entsprechende Einsatzquoten oder Qualitätsstandards für Produkte (beispielsweise für grünen Stahl). Dies kann durchaus mit dem begleitenden Verteuern treibhausgasintensiver Produktionsweisen verbunden werden, wo dies den Transformationsprozesse unterstützt (Agora Energiewende und Becker Büttner Held 2019; Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a).

Die Umstellung auf nicht-fossile Prozesse erfordert allen bestehenden Szenarien folgend einen signifikant erhöhten Bedarf an regenerativem Strom und grünem Wasserstoff; bislang ist allerdings keine ausreichende Verfügbarkeit dieser Energieformen gegeben. Die THG-Neutralität zusätzlicher stromverbrauchender Anlagen ist allerdings nur dann gewährleistet, wenn für diese Anlagen zusätzliche Wind- und Solaranlagen errichtet werden, die über den aktuellen Strombedarf hinausgehen (siehe auch das Kapitel zur Energiewirtschaft). Sollte es hierzulande zu einer begrenzten inländischen Verfügbarkeit von (günstigem) Strom aus erneuerbaren Energien kommen, sind entsprechende Standortnachteile für Unternehmen zu erwarten. In der Diskussion über Ausbaupfade erneuerbarer Energien müssen deshalb die Bedarfe der (Grundstoff-)Industrie Berücksichtigung finden.

Bei einer ungenügenden Versorgung mit inländischen erneuerbaren Energien könnten alternativ bzw. begleitend zu einem möglichen Strom- oder Wasserstoffimport auch energieintensiv zu produzierende Grundmaterialien importiert werden. Dies könnte etwa Methanol, Olefine und Eisenschwamm als Vorprodukt der Stahlerzeugung betreffen. Damit wäre allerdings eine teilweise Verlagerung der in Deutschland angesiedelten Wertschöpfung in Weltregionen mit besonders hoher und kostengünstiger Verfügbarkeit erneuerbarer Energien verbunden. In volkswirtschaftlichen Analysen ist dies zu berücksichtigen. Zu welchem Zeitpunkt es Weltregionen mit einer dafür nötigen Überabdeckung an erneuerbarer Energieerzeugung geben könnte ist

allerdings noch unklar. Insofern lässt sich eine Minderungsstrategie mit dem Zieljahr 2035 nicht umfassend auf dieser Strategie aufbauen.

Stahlindustrie

Die direkten CO₂-Emissionen der Stahlindustrie beliefen sich im Jahr 2017 auf ca. 57 Mt CO₂, was 6,4 Prozent der gesamten deutschen THG-Emissionen entsprach. Dabei wurde der Hauptteil von ca. 50 Mt CO₂ von der kohlebasierten Primärstahlerzeugung über die Hochofen-Konverter-Route verursacht, bei der rd. 1,7 t CO₂ pro t Rohstahl⁴⁶ emittiert werden und über die im Jahr 2017 29,5 Mt Rohstahl produziert wurden. Die Sekundärstahlerzeugung über die Elektrolichtbogenofen-Route⁴⁷ machte im selben Jahr 29 Prozent der Gesamt-Stahlproduktion (12 Mt) aus und emittierte bei einer Intensität von 0,13 t CO₂ pro t Rohstahl insgesamt knapp 2 Mt CO₂. (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a, Mantzos et al. 2019)

Bis 2030 erreicht über die Hälfte der Hochofen-Kapazitäten das Ende ihrer Lebensdauer (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a). Zur Erreichung von Klimaneutralität 2035 dürften Reinvestitionen nur in Anlagen erfolgen, die sich klimaneutral betreiben lassen, auch wenn in den ersten Jahren ggf. noch fossile Ausgangsstoffe genutzt werden. Über diese bis 2030 ohnehin anstehenden Reinvestitionen hinaus müssten die verbleibenden Hochöfen bis 2035 ebenfalls stillgelegt und ersetzt werden.

Als CO₂-arme Schlüsseltechnologie für eine (weitgehend) treibhausgasneutrale Stahlproduktion steht bis 2035 im Wesentlichen nur die Direktreduktion mit Wasserstoff (Direct Reduced Iron, DRI) und anschließender Weiterverarbeitung des erzeugten Eisenschwamms zu Rohstahl im Elektrolichtbogenofen zur Verfügung. Mit diesem Verfahren können ca. 97 Prozent der CO₂-Emissionen vermieden werden. Mit der großskaligen kommerziellen Verfügbarkeit der Technologie ist zwischen 2025 und 2030 zu rechnen. Bei Umstellung auf wasserstoffbasierte Primärstahlproduktion würde eine Produktionsmenge von Primärstahl auf heutigem Niveau ca. 75 TWh Wasserstoff für die Direktreduktion zur Eisenerzeugung erfordern, dies entspräche zusätzlich ca. 100 TWh Elektrizitätsbedarf in Deutschland, sofern der Wasserstoff nicht importiert würde. Für die Direktreduktion und Weiterverarbeitung in Lichtbogenöfen wären darüber hinaus 27 TWh Elektrizität erforderlich. Durch eine Verstärkung der Kreislaufführung von Stahl wären diese Bedarfe im Prinzip um rund ein Drittel reduzierbar (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a; b). Hierfür sind allerdings umfangreiche Veränderungen an den heute international etablierten Recyclingstrukturen erforderlich.

Alternative Technologien zur wasserstoffbasierten Stahlerzeugung erscheinen für die Zielsetzung THG-Neutralität im Jahr 2035 nicht hinreichend. Sie ermöglichen entweder keine ausreichende Reduktion der CO₂-Emissionen oder werden voraussichtlich erst nach 2035 verfügbar sein. (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a)

⁴⁶ bei der Primärstahlerzeugung wurde eine Schrottbeimischung von 12 Prozent angenommen

⁴⁷ mit 95 Prozent Schrottverwendung

Die Bereitstellung der benötigten Mengen grünen Wasserstoffs ist inländisch allerdings herausfordernd, der zusätzliche Strombedarf bei heutiger Primärstahlproduktionsmenge würde ca. 50 Prozent der aktuellen jährlichen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland entsprechen. Biomethan würde in dieser Betrachtung nur in dem Maß genutzt, wie es als prozessrelevante Kohlenstoffquelle erforderlich ist, also circa 10 Prozent im DRI-Prozess. Wegen des großen, wohl erst in einigen Jahren deckbaren Bedarfs an Wasserstoff erscheint ein Einstieg in die DRI Technologie mit Erdgas und eine anschließende Umstellung auf Wasserstoff wahrscheinlich.⁴⁸

Für den Ersatz der deutschen Hochofenkapazitäten durch wasserstoffbetriebene DRI-Anlagen würde ein Kapitalbedarf von ca. 20 Mrd. Euro (CAPEX) für neue DRI-Anlagen entstehen (DEEDS 2020). Hinzu kämen die benötigten Elektrolichtbogenöfen sowie die Betriebskosten (OPEX), die stark durch die Energiekosten (Wasserstoff und Strom) beeinflusst werden.

Neben der Entwicklung der DRI-Technologie ist der zeitnahe Aufbau einer Wasserstoffversorgung vor allem über Pipelines, gegebenenfalls aber auch über Elektrolyse direkt am Standort erforderlich. Dieser erfolgt idealerweise parallel zum Aufbau der Direktreduktionsanlagen und erfordert entsprechend vorausschauende Planungen. Die Versorgung der Stahlstandorte mit ausreichend Strom und Wasserstoff kann damit nicht allein von den Industrieunternehmen bewerkstelligt werden, sondern benötigt staatliche Planung, finanzielle Unterstützung und gesellschaftliche Akzeptanz der Infrastrukturen sowie eine Abstimmung mit anderen Branchen als weitere potenzielle Nachfrager von Wasserstoff in der Zukunft.

Chemische Industrie

Die direkten CO₂-Emissionen der Grundstoffchemie beliefen sich im Jahr 2017 auf ca. 37 Mt CO₂ (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a), etwa 4,1 Prozent der gesamten deutschen THG-Emissionen. Diese Emissionen werden von einer Vielzahl von Prozessrouten mit ihren zugehörigen Produkten verursacht; besonders relevante Grundstoffchemikalien sind Chlor, Olefine (vor allem Ethylen und Propylen), Aromaten wie BTX (Benzol, Toluol, Xylole), Ammoniak, sowie künftig zunehmend auch Methanol. Die Routen haben einen hohen Bedarf an (Hochtemperatur-) Prozesswärme (bis ca. 500 °C) und Dampf, sowie zunehmend an Elektrizität für elektrochemische Prozesse. Der Energiebedarf wird zurzeit zu einem großen Teil über die zugleich auch stofflich genutzten fossilen Rohstoffe (Feedstocks)⁴⁹ gedeckt. Deshalb bedeutet der Übergang zu erneuerbaren Energien und der Nutzung von nicht fossilen und damit überwiegend „energiearmen“ Feedstocks wie CO₂ einen deutlichen Anstieg des Bedarfs an Elektrizität und anderen Energieträgern.

⁴⁸ Eine Alternative wurde derzeit von der Salzgitter-AG angekündigt, die plant, Eisenschwamm direkt an der Küste in Wilhelmshaven herzustellen. Dort würde die Produktion von der direkten Verbindung zu den großen Windkraftpotenzialen an der Küste und offshore sowie von Hafenanlagen zur Belieferung mit Erzen profitieren. Der Eisenschwamm könnte dann zum Beispiel per Bahn zu den Stahlwerken transportiert werden.

⁴⁹ das heißt vor allem das von den Raffinerien als Nebenprodukt erzeugte Naphtha

Bis 2030 stehen in der Grundstoffchemie Reinvestitionsbedarfe von ca. 60 Prozent der Gesamtkapazität der bestehenden Steamcracker an.⁵⁰

Aufgrund der Komplexität der chemischen Industrie ist eine Vielzahl von CO₂-armen Schlüsseltechnologien vonnöten, um eine (weitgehend) treibhausgasneutrale Chemieproduktion zu erreichen.⁵¹ Die nachfolgende Auflistung umfasst daher lediglich die wesentlichsten Technologien (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a; b; DLR et al. 2016; DECHEMA 2017):

- Wärme- und Dampferzeugung mit Elektrodenkesseln und Wärmepumpen (Power-to-Heat) bieten gegenüber fossil befeuerten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) eine potenziell vollständige CO₂-Einsparung und sind für viele Anwendungen schon heute großskalig kommerziell verfügbar. Für Hochtemperaturanwendungen besteht speziell bei den besonders energieeffizienten Wärmepumpen allerdings noch weiterer Entwicklungsbedarf. Sofern der derzeitige Wärme- und Dampfbedarf der Chemischen Industrie zu 65 Prozent mit Elektrodenkesseln und zu 35 Prozent mit Wärmepumpen gedeckt würde, entstünde ein zusätzlicher Strombedarf von ca. 55 TWh_{el}.⁵²
- Zur Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energien stehen mehrere Technologien zur Verfügung, die auch noch weiterentwickelt und damit energieeffizienter werden. Entsprechende Anlagen dürften zwischen 2025 und 2035 großskalig kommerziell verfügbar werden und können grundsätzlich emissionsfrei betrieben werden, solange genügend CO₂-freier Strom zur Verfügung gestellt werden kann
- Für die Methanolsynthese aus Wasserstoff ist mit der großskaligen kommerziellen Verfügbarkeit bei Nutzung von Kohlenmonoxid (CO) als Kohlenstoffquelle zwischen 2025 und 2030 zu rechnen, während sie bei Nutzung von CO₂ zwischen 2030 und 2035 erreicht werden dürfte. Hierbei können Negativemissionen von 0,8 bis 1,4 t CO₂ pro produzierter Tonne Methanol realisiert werden, sofern das Methanol dauerhaft in chemischen Produkten gebunden wird, und der Kohlenstoff aus nachhaltig angebaute Biomasse stammt oder aus der Luft abgetrennt wurde.
- Alternative Verfahren wie die Methanol-to-Olefin/-Aromaten-Route (MTO/MTA) oder elektrochemische Prozesse zur Olefin- und Aromaten-Produktion können ebenfalls klimaneutral betrieben werden und dürften zwischen 2025 und 2030 großskalig kommerziell verfügbar werden.
- Sofern die Basischemikalien für die Kunststoffproduktion im heutigen Umfang (9,4 Mt Olefine und 2,9 Mt BTX im Jahr 2017) mittels der MTO/MTA-Route erzeugt werden sollen, das heißt sowohl die stoffliche als auch die energetische Nutzung fossiler Energieträger komplett durch diese elektrisch

⁵⁰ Auch wenn Steamcracker normalerweise kontinuierlich gewartet und modernisiert und somit nicht an einem Zeitpunkt komplett ausgetauscht werden, vermitteln die Reinvestitionsbedarfe einen groben Eindruck des Modernisierungsbedarfs an Altanlagen.

⁵¹ Technologien mit angenommener großskaliger kommerzieller Verfügbarkeit nach 2035 werden hierbei als nicht für das 2035-Ziel relevant erachtet. Jedoch kann es ggf. zu stärker beschleunigten Entwicklungen kommen als angenommen, so dass auch weitere Technologien zur Verfügung stehen könnten.

⁵² 55 TWh_{el} entsprechen ca. einem Viertel der aktuellen deutschen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.

basierte Routen ersetzt würden, würde daraus ein Strombedarf von circa 319 TWh⁵³ (davon 302 TWh für grünes H₂, ggf. aus Import) entstehen.⁵⁴

- Eine zumindest teilweise Alternative zur zuvor skizzierten Kunststoffherzeugung auf Wasserstoffbasis bietet neben dem nach wie vor ausbaubaren mechanischen Recycling das chemische Recycling mittels Pyrolyse oder Gasifizierung von Altplastik für die stoffliche Nutzung. Je nach Verfahren können hierbei bis zu 93 Prozent des bislang in der Erzeugung und letztendlichen Verbrennung der (nicht recycelten) Kunststoffe emittierten CO₂ vermieden werden. Eine großskalige kommerzielle Verfügbarkeit entsprechender Verfahren ist zwischen 2025 und 2030 möglich. Bei aus heutiger Sicht denkbarer (idealer) Kombination diverser einer Kreislaufwirtschaft ermöglichender Verfahren könnte der Strombedarf für eine weitgehend klimaneutrale „Petrochemie“ auf heutigem Produktionsniveau dann auf ca. 104 TWh reduziert werden. Sowohl mechanische als auch chemische Recyclingverfahren würden dabei stark davon profitieren, wenn die Komplexität und Vielfalt der verwendeten Kunststoffe reduziert würde, was speziell für Verbundmaterialien aus verschiedenen Kunststoffen gilt.

Zusammenfassend würde eine vollständig erneuerbar-synthetische Grundstoffchemie mit Wasserstoff, elektrischer Wärme- und Dampferzeugung und CCU, sowie z. T. biogenen Rohstoffen (vor allem als Kohlenstoff-Feedstock) bis zu ca. 300 TWh Wasserstoff (entspreche ca. 400 TWh Elektrizitätsbedarf, sofern nicht importiert), und 100 TWh Elektrizität benötigen. Durch starke Kreislaufwirtschaft und zum Teil biogene Kunststoffrouten könnte der Wasserstoffbedarf aber um bis zu zwei Drittel auf rund 100 TWh verringert werden.

Zement- und Baustoffbranche

Die direkten CO₂-Emissionen der Zementindustrie betragen im Jahr 2017 20,5 Mt CO₂, wovon circa zwei Drittel prozessbedingt und ein Drittel energiebedingt entstanden.

Durch den effizienten Einsatz von Beton in Bauteilen sowie durch den effizienten Einsatz von Zement bei der Herstellung von Beton kann im Jahr 2035 die gleiche Bauleistung mit bis zu 20 Prozent weniger Zement erbracht werden (eigene Abschätzung, basierend auf Cembureau 2020). Durch Änderungen beim Design von Bauwerken, wie etwa das Bauen ohne Keller, können darüber hinaus weitere Einsparungen von Beton und Zement erzielt werden.

In einigen Anwendungen kann Beton auch vollständig durch klimaneutrale alternative Baustoffe ersetzt werden, was zu einer weiteren Reduktion des Zementbedarfs führt. Beispiele hierfür sind der Holzbau und der Lehm- oder Lehmputz. Der Gesamtanteil des Baustoffbedarfs, der auf nachhaltigem Niveau durch solche alternativen Baustoffe gedeckt werden kann, ist allerdings begrenzt.

⁵³ Dies entspricht ca. 130 Prozent der aktuellen deutschen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.

⁵⁴ Allerdings unter der Annahme, dass keine synthetischen Kohlenwasserstoffe für die Chemieindustrie importiert, sondern diese inländisch aus Wasserstoff synthetisiert werden.

Schlüsseltechnologien für die Vermeidung von CO₂-Emissionen bei der auch zukünftig erforderlichen Zementproduktion lassen sich den folgenden drei Bereichen zuordnen (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a):

- Verschiedene neue Bindemittel und innovative Zemente⁵⁵, deren Herstellung im Vergleich zu herkömmlichem Portlandzement mit bis zu 50 % geringeren CO₂-Emissionen pro Tonne Bindemittel verbunden ist, befinden sich in einer frühen Phase der Markteinführung bzw. dürften in den nächsten zehn Jahren am Markt verfügbar werden. Ihr Einsatz ermöglicht die Kompensation des heute in der Zementproduktion in großen Mengen eingesetzten Hüttensands aus Hochöfen der Stahlindustrie, der heute einen großen Beitrag zur CO₂-Minderung im Zementsektor leistet, aber im Zuge der Transformation des Stahlsektors zukünftig nicht mehr verfügbar sein wird.
- Verbleibende Emissionen durch die Herstellung von klassischem Zement können des Weiteren durch veränderte Bereitstellung von Hochtemperaturwärme an den Öfen sowie CO₂-Abscheidung in Verbindung mit einer Nutzung bzw. Speicherung des CO₂ (CCS/CCU) stark reduziert oder sogar gänzlich vermieden werden. Für die mit zusätzlichem Energiebedarf verbundene CO₂-Abscheidung sind unterschiedliche Verfahren mit Minderungspotenzialen von bis zu 90 Prozent in der Entwicklung. Diese werden voraussichtlich zwischen 2025 und 2035 großskalig kommerziell verfügbar. Zur Minderung der brennstoffbedingten Emissionen ist zudem entweder eine (Teil-)Elektrifizierung der Öfen oder der Einsatz von Wasserstoff für die Wärmeerzeugung denkbar. Auch nachhaltig produzierte Biomasse und nicht anderweitig recyclingfähige Reststoffe können als Brennstoff dienen. In Kombination mit CCS werden bei Verwendung biogener Brennstoffe negative Emissionen erzeugt, die verbleibende fossile und prozessbedingte Emissionen kompensieren können, und somit eine Klimaneutralität der Zementherstellung prinzipiell ermöglichen.
- Der Reinvestitionsbedarf der Zementindustrie bis 2030 beträgt ca. 30 Prozent der Gesamtkapazität und damit Öfen mit einer Kapazität von 10,5 Mt Zementklinker pro Jahr. Sollte es gelingen, den Zementbedarf um ein Viertel zu reduzieren, wären für den flächendeckenden Einsatz von Oxyfuel-CCS an den verbleibenden Öfen noch ca. 2,5 TWh Strom erforderlich. Die Mahlprozesse und weitere mechanische Anwendungen erfordern ca. 3 TWh Elektrizität. Für eine Teilelektrifizierung der Öfen wären ca. 14 bis 18 TWh Elektrizität erforderlich (inkl. CCS), sowie ca. 8,5 TWh über Wasserstoff und Biomasse bereitzustellende Hochtemperaturwärme. Alternativ könnten bis zu 9 TWh Wasserstoff und 11 TWh nachhaltig produzierte Biomasse (ggf. in Teilen durch anderweitig nicht nutzbare Reststoffe ersetzbar) eingesetzt werden, dafür dann mit stark verringertem direkten Elektrizitätsbedarf. Je nach Brennstoffeinsatz und CO₂-Abscheiderate müssten ca. 8 bis 14 Mt CO₂ endgelagert werden. Bei gleichbleibender Produktionsmenge lie-

⁵⁵ „Neue Bindemittel“ sind hier solche, die keinen Portlandzementklinker enthalten. „Innovative Zemente“ bezeichnen solche, die zwar noch Portlandzementklinker enthalten, aber eben deutlich weniger davon bzw. die den durch ein Ende der Hochofenroute in der Stahlerzeugung wegfallenden Hüttensand nicht benötigen.

gen diese Bedarfe wie in Tabelle 6-2 dargestellt um ein Drittel höher als hier beschrieben.

„Restliche“ Grundstoffindustrie und weiterverarbeitende Industrie

Zentrale Ansätze sind auch hier die Elektrifizierung (ggf. auch über Wasserstoff) des Wärme- und Dampfbedarfs, die Ausrichtung auf Kreislaufwirtschaft sowie weitere intensive Effizienzmaßnahmen zur Entlastung der Stromerzeugung.

Must-Dos

Die Defossilisierung der Industrie bzgl. Rohstoffen und Energieerzeugung leistet entscheidende Beiträge auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen Industrie. Hierzu gehört die Elektrifizierung von Industrie-Heizsystemen für Dampf und Wärme (besonders herausfordernd für Hochtemperaturwärme bis über 500 °C), der Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft inkl. dem sukzessiven Aufbau einer adäquaten Infrastruktur (Elektrolyseure, Pipelines), so dass schon spätestens 2025 erste technologisch reife H₂-basierte Prozesse großskalig betrieben werden können, der Ersatz der Industrieheizkraftwerke (Kohle) durch Strom aus erneuerbaren Energien und Power-to-Heat. Aufgrund der verschiedenen Nutzungspfade für CO₂ ist auch der Aufbau eines CO₂-Transportnetzes erforderlich (Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019a).

Wesentlich ist dabei, dass für eine Klimaneutralität bis 2035 wegen der langen Anlagen-Lebensdauern schon ab heute nur noch ausschließlich mit Klimaneutralität kompatible Neuinstallationen erfolgen dürften, auch wenn zumindest ein Teil dieser Anlagen anfangs noch fossil betrieben werden würde.

Der Ausbau der Kreislaufwirtschaft dient neben der Abfallvermeidung der Reduktion der energieaufwändigen Produktion von Primärmaterialien und damit der Verminderung des sonst schwer stemmbaren Bedarfs an erneuerbaren Energien. Hierbei sind als Teilstrategien Reduce (Vermeidung & Effizienz, alternative Materialien), Reuse (Komponenten-Weiternutzung) und Recycle (mechanisches Recycling durch Trennen und Aufbereiten & chemisches Recycling auf Molekülebene) zu nennen. Die diesem Strategiebündel zugeschriebenen, vor allem durch Energieeinsparungen bedingten THG-Einsparungspotenziale reichen bis ca. 50 Prozent und sind in der aktuellen Diskussion bisher noch nicht adäquat aufgegriffen und belastbar analysiert (Material Economics & Wuppertal Institut 2019).

Bei alledem muss die Entwicklung und der Einsatz von treibhausgasneutralen Technologien durch eine verstärkte Innovationsdynamik vorangetrieben werden, indem Demo- und Pilotanlagen gefördert werden und durch Markteinführungsmechanismen ein flächendeckender Aufbau vorangetrieben wird.

Zusätzliche Maßnahmen zur Ambitionssteigerung für CO₂-Neutralität bis 2035

Mit Blick auf zusätzliche Maßnahme für den Klimaschutz liegt der Fokus zunächst auf einer weiteren Intensivierung der Kreislaufwirtschaft, um den Bedarf an Primärmaterialien zu minimieren. Eine beschleunigte Einführung konkreter Einzeltechnologien ist in folgenden Bereichen notwendig: wasserstoffbasierte Primärstahl-

produktion⁵⁶, vollständige synthetische Grundstoffchemie auf der Basis von Wasserstoff oder Wasserstoffderivaten, elektrischer Wärme- und Dampferzeugung, CCU sowie verstärkte Nutzung biogener Rohstoffe (vor allem als Kohlenstoff-Feedstock). Die Nutzung von alternativen Bindemitteln (statt Zement) kann deutlich gesteigert werden, an den restlichen (dann soweit möglich weitgehend elektrifizierten) Zementöfen muss CCS/CCU zum Einsatz kommen.

Nahezu alle alternativen Prozesse und Verfahren sind direkt oder indirekt strombasiert. Der zusätzliche Bedarf an auf erneuerbaren Energien basierendem Grünstrom und grünem Wasserstoff ist in Tabelle 6-2 dargestellt.⁵⁷

Tabelle 6-2 Endenergiebedarfe in der Industrie bei vollständiger Klimaneutralität und heutiger Primärproduktion

	Strom absolut (in TWh)	H ₂ absolut (in TWh)	Biomasse* absolut (in TWh)	Endenergiebedarf (inkl. Umwandlungsverlust) in TWh
Zement	22–28 // 9	4 // 12	5 // 14	33–40
Stahl	27	74	2–20 (Biometan als Kohlenstoffquelle)	125
Chemie	100	100–300	1–50 (vor allem stofflich genutzt)	230–500
Industrie gesamt, inkl. Rest	200–300	320–400	100–134 (ohne BDI 2018)	600–750

*) Die Biomasse kann dabei nur als klimaneutral angesehen werden, wenn deren nachhaltige Produktion sichergestellt wird. Auch kann ein Teil der Biomasse ggf. durch anderweitig nicht recyclebare Reststoffe ersetzt werden.

Sofern der Zusatzbedarf über Elektrizität bereitgestellt wird (für direkte Stromnutzung und zur Elektrolyse), ist er vergleichbar mit dem aktuellen deutschen Elektrizitätsbedarf in Höhe von ca. 600 TWh. Sofern ein Teil der energieintensiven Grundmaterialien wie Methanol, Olefine oder Eisenschwamm importiert wird, sinkt der Elektrizitätsbedarf entsprechend. Gleiches gilt für die heimische Stromnachfrage, wenn ein Teil des benötigten Wasserstoffs importiert wird.

Implikationen und Risiken

Insgesamt ist von einem hohen Bedarf an erneuerbar erzeugter Elektrizität und an Wasserstoff auszugehen, welcher aufgrund der begrenzten heimischen Potenziale zumindest teilweise durch Importe gedeckt werden müsste. Werden die Reinvestitionszyklen typischer Industrieanlagen nicht genutzt und in Technologien investiert, die nicht mit einer THG-Neutralität kompatibel sind, besteht bei einem Festhalten an dem Ziel der Erreichung der THG-Neutralität im Jahr 2035 die Gefahr, dass eine deutlich erhöhte Anzahl an Anlagen vor dem Erreichen ihrer technischen oder ökonomischen Lebensdauer abgeschrieben werden müssen.

⁵⁶ ggf. in Verbindung mit einer Biometan-Beimischung für das Einbringen des benötigten Kohlenstoffs in den Produktionsprozess

⁵⁷ Basierend auf den vorab dargestellten Szenarien, sowie Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019a; b)

Das Vorziehen der Vorgabe Treibhausgasneutralität auf das Jahr 2035 impliziert insgesamt starke Eingriffe in über Jahrzehnte gewachsenen Strukturen und eine entsprechend notwendige Lenkungswirkung sowie den Einsatz teilweise bislang nicht großskalig erprobter Technologien. Ebenso stellt der massive Infrastrukturaufbau, vor allem die notwendigen H₂- und CO₂-Transportsysteme, eine große Herausforderung dar. Der Aufbau muss den realen Bedarfen teilweise vorausgehen und kann nicht erst „mitwachsen“. Aufgrund der kurzen Zeitspanne steht nur begrenzte Zeit für die Erkundung neuer Technologien und Märkte zur Verfügung. Die üblicherweise angestrebte Zielsetzung der Technologieoffenheit ist daher teilweise nicht umsetzbar. Stattdessen muss eine Festlegung auf bestimmte Technologien mit dem in Kauf zu nehmendem Risiko von zumindest temporär suboptimalen Lösungen durch politische Vorgaben respektive das Setzen entsprechender Anreize erfolgen. Die Erreichung der benötigten technologischen Reife von Schlüsseltechnologien (teils erst auf nach 2030 geschätzt) lässt hier keine großen zeitlichen Spielräume und erfordert intelligente Maßnahmen zur Beschleunigung der Entwicklung und Marktdiffusion. Auch wenn die Risiken technologischer Fehlentscheidungen durch das Einbinden der industriellen Expertise reduziert werden können sind substanzielle Fehlinvestitionen nicht auszuschließen. Dementsprechend ist eine teilweise öffentliche Risikoübernahme beziehungsweise -absicherung angeraten.

Kosten der Industrietransformation

Die Kosten werden maßgeblich durch die notwendigen Investitionen in neue Anlagen und die Energiekosten geprägt. Der Investitionsbedarf der Grundstoffindustrie wird sich dabei Abschätzungen zufolge mindestens verdoppeln. Die Produktionskosten für Materialien und darunter vor allem aber die Energiekosten steigen erheblich. Dies gilt insbesondere für die Übergangsphase, in der besonders grüner Wasserstoff noch mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden sein dürfte. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Kosten für die Ausgangsmaterialien in der Regel einen nur sehr geringen Anteil an den Kosten der Endprodukte ausmachen und die Mehrkosten entsprechend auf die Endprodukteebene nur anteilmäßig durchschlagen. Die aus der Industrietransformation resultierenden Kosten für Gesellschaft und Verbraucher sind damit grundsätzlich relativ moderat. Selbst wenn die Kosten für die Ausgangsprodukte wie etwa grünem (treibhausgasneutralem) Stahl mit 50 bis 60 Prozent sehr deutlich ansteigen, führt dies Berechnungen zufolge etwa für ein Mittelklassefahrzeug zu Kostensteigerungen von deutlich unter 1 Prozent. (Material Economics & Wuppertal Institut 2019)

Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft erscheinen für die Industrietransformation als potenziell starke und vor allem kosteneffiziente Hebel, benötigen aber die Entwicklung und Einführung vieler neuer Wertschöpfungsketten und die Etablierung neuer Geschäftsmodelle. In den meisten der heute vorliegenden Szenarioanalysen ist diese Option bisher kaum behandelt worden. Hinsichtlich der Einführung neuer Technologien ist die aktuelle CO₂-Bepreisung (rund 25 Euro pro Tonne CO₂ im EU-ETS, Stand: Anfang Oktober 2020) nicht ausreichend, um weiterreichende Transformationen anzustoßen. Eine deutliche Erhöhung des CO₂-Preises, ergänzende flankierende Instrumente und eine soweit wie möglich langfristig klare und vorhersehbare Kostenentwicklung sind daher von hoher Bedeutung.

Die CO₂-Vermeidungskosten wesentlicher Technologien unterscheiden sich stark und sind in Abbildung 6-3 dargestellt. Aufgrund der erheblichen Unsicherheiten über die zukünftigen Kosten und deren bestimmende Größen werden jeweils plausible Spannweiten angegeben, dabei wird das gegenwärtige, also inflationsbereinigte Preisniveau als Referenz angesetzt. Ein CO₂-Preis von ca. 180 Euro, wie er von Fridays for Future Deutschland gefordert wird, würde zumindest bei den getroffenen optimistischen Annahmen sämtlichen klimaneutralen Prozessen einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen, wobei damit noch nicht notwendigerweise alle Hürden für Aufbau und Betrieb der entsprechenden Anlagen überwunden sind (siehe auch Wuppertal Institut 2019). Ein wirksamer Schutz vor Carbon Leakage, also vor der Abwanderung von Investitionen und damit Produktionskapazitäten in Länder mit geringeren Klimaschutzauflagen und dementsprechend geringeren CO₂-Kosten, ist dabei essenziell.

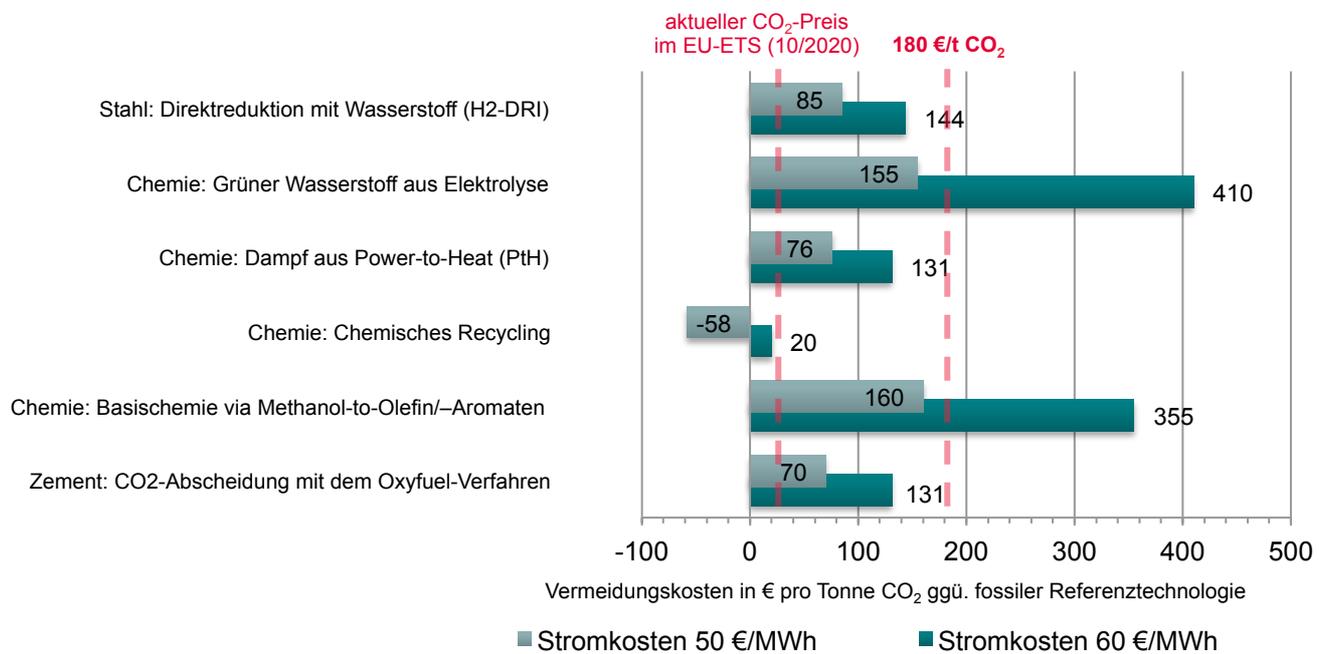


Abbildung 6-3 CO₂-Vermeidungskosten wesentlicher Technologien für eine klimaneutrale Grundstoffindustrie

Quelle: Basierend auf Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019b).

Die CO₂-Vermeidungskosten sind jeweils als Zusatzkosten gegenüber einer konventionellen Referenztechnologie berechnet worden und vor allem stark von den Annahmen zu den Stromkosten abhängig; für die Berechnung dieser Werte wurde eine Stromkostenspanne von 50 bis 60 Euro pro MWh⁵⁸ angenommen, wie sie heute üb-

⁵⁸ Zur Plausibilisierung der Annahme von 50 bis 60 Euro pro MWh: Netzentgelte, Umlagen und weitere Strompreiskomponenten wurden dabei gegenüber der heutigen Situation als unverändert angenommen und fließen in diesen Strompreis mit ein, während andere Förderungen wie der derzeitige Bonus für die KWK-Erzeugung, deren Beibehaltung mittel- bis langfristig nicht gesichert erscheint ausgenommen wurden.

lich ist⁵⁹. Ein abgesicherter Strompreis von 40 Euro pro MWh, wie er häufig von Industrievertretern gefordert wird, würde die Vermeidungskosten je nach Technologie und Energieintensität weiter verringern. Die in Tabelle 6-3 aufgelisteten Referenztechnologien wurden dabei betrachtet.

In den Berechnungen werden nur die – in der Regel klar dominierenden – direkten Emissionen berücksichtigt, vorgelagerte Emissionen (die zum Beispiel bei der Förderung fossiler Energieträger oder bei dem Bau beziehungsweise der Errichtung der unterschiedlichen Anlagen anfallen) und nachgelagerte Emissionen werden nicht berücksichtigt. Betrachtet werden zudem keine Anlagenkombinationen (zum Beispiel die Verbindung von chemischem Recycling und methanolbasierten Verfahren), die sich in der Praxis aber als sinnvoll herausstellen könnten. Ferner ist zu beachten, dass in den Jahren vor 2035 aufgrund der noch notwendigen technologischen Weiterentwicklung mit höheren CO₂-Vermeidungskosten zu rechnen ist.

Tabelle 6-3 Referenztechnologien zur Ermittlung der CO₂-Vermeidungskosten

Neue Technologie	Referenztechnologie
Direktreduktion mit Wasserstoff	konventionelle kohlebasierte Hochofen-Route
Grüner Wasserstoff aus Elektrolyse	Dampfmethanreformierung zur Aufspaltung von Methan in Wasserstoff und (emittiertes) Kohlendioxid
Dampf aus Power-to-Heat	erdgasbasierte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)
Basischemikalien via Methanol-to-Olefin/-Aromaten	bestehende (fossil betriebene) Naphtha-Steamcracker zur Olefinproduktion
Chemisches Recycling	weitgehend lineare, erdölbasierte Produktion inkl. angenommener Reinvestition in konventionelle Steamcracker, sowie heutiger Recyclingrate und End-of-Life-Verbrennung der nicht recycelten Kunststoffe („thermische Verwertung“)
CO ₂ -Abscheidung mit dem Oxyfuel-Verfahren	konventionelle Zementproduktion

Politikinstrumente

Insgesamt ist ein komplexer Werkzeugkasten mit vielen einzelnen Ansätzen erforderlich, unter anderem Carbon Contracts for Difference (Übernahme der Mehrkosten in der Produktion durch einen spezifischen Vertrag) sowie die Förderung von Einstiegsmärkten für grüne Produkte, etwa durch öffentliches Beschaffungswesen.

Ein wesentliches „Markt“-Werkzeug zur Umsetzung der Maßnahmen ist die Einführung eines ambitionierten und langfristig absehbaren CO₂-Preises, da der Einstieg in die notwendigen innovativen Prozesse je nach Branche in der Regel erst ab einem CO₂-Preis von etwa 70 bis 160 Euro ökonomisch attraktiv wird – sofern Stromkosten

⁵⁹ Da angenommen wird, dass die Anlagen, wie in der Grundstoffindustrie üblich rund um die Uhr betrieben werden verringert sich der Anteil der Anlagenkosten, jedoch können keine Niedrigpreisphasen für den Strombedarf genutzt werden.

von 50 Euro pro MWh zugrunde gelegt werden, es sind nach Erneuerbaren-Ausbau und Rahmenbedingungen allerdings auch höhere oder auch niedrigere Stromkosten möglich. Dieser CO₂-Preis müsste mit einem wirksamen Schutzmechanismus gegen Carbon-Leakage gekoppelt werden. Allerdings dürfte ein CO₂-Preis aufgrund der langsamen Reaktionszeiten und teilweise komplexen Strukturen des Sektors alleine nicht genügen. Neben innovativen Einstiegen müssen zum Teil auch Ausstiege aus klimaschädlichen Prozessen gestaltet werden, mit entsprechenden (auch hinsichtlich technischer Lebensdauer vorzeitigen) Stilllegungen.

Mögliche (teilweise zu kombinierende) Ansätze und Instrumente für die Industrietransformation sind:

- Externe Kosten internalisieren, beispielsweise über den stark gegenüber heute zu steigenden CO₂-Zertifikatspreis (EU-ETS), kombiniert mit teilweise kostenloser Zuteilung, einen CO₂-Preis oder eine Klima-Umlage auf Endprodukte (Wuppertal Institut 2019)
- Finanzielle Unterstützung, zum Beispiel über Carbon Contract for Difference (weitgehende Übernahme der Mehrkosten der klimaneutralen Produktion) oder andere adäquate grüne Finanzierungsinstrumente,
- Sicherung von Absatzmärkten für klimaschonende Produkte, wie etwa durch Quoten für grünen Wasserstoff, Quoten für CO₂-arme Materialien, und nachhaltige öffentliche Beschaffung,
- Förderung der Kreislaufwirtschaft durch Standards und/oder Quoten, beispielsweise Änderungen von Bau- und Produktnormen und Vorgabe von Standards für rezyklierbare Produkte,
- Proaktive unterstützende Begleitung des mit dem Transformationsprozess entlang der gesamten Prozesskette verbundenen regionalen Strukturwandels, etwa durch Qualifizierungsmaßnahmen.

7 Verkehr

Die **THG-Emissionen im Verkehr stagnierten** in den letzten 30 Jahren auf hohem Niveau – ihr Anteil an den gesamten THG-Emissionen in Deutschland ist auf inzwischen rund 20 Prozent gestiegen. Die **erzielten Effizienzgewinne** und (geringen) Verlagerungen auf den Umweltverbund wurden **kompensiert durch gestiegene Verkehrsaufwände** im Personen- und Güterverkehr sowie **größere und stärker motorisierte Pkw**.

Um im Verkehrssektor bis 2035 Klimaneutralität erreichen zu können, müssen verschiedene weitgehende Maßnahmen schnell umgesetzt werden.

Verkehr reduzieren: Verkehrsvermeidende Stadt- und Raumplanung, Anreize gegen Zersiedelung, die Förderung virtueller Mobilität (zum Beispiel Homeoffice) sowie die Verteuerung von Flugverkehr könnten eine **Reduzierung der Personenverkehrsleistung gegenüber heute um rund 20 Prozent** ermöglichen. Der **Güterverkehr** könnte durch eine Förderung regionaler Wirtschaftskreisläufe und eine Verteuerung von Lkw-Transporten gegenüber heute **um rund 5 bis 10 Prozent verringert** werden.

Verkehr verlagern: Durch massiven Ausbau und Attraktivierung von öffentlichem Verkehr, Radinfrastrukturen und Sharing-Angeboten kann eine Verlagerung **vom motorisierten Individualverkehr auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel** erreicht werden, wenn zugleich der **Autoverkehr unattraktiver gestaltet** wird – durch Push-Faktoren wie Tempolimit, höhere Preise und eine Umwidmung von Straßenraum. So könnte sich die Verkehrsleistung des Umweltverbunds aus Fuß- und Radverkehr sowie öffentlichem Verkehr bis 2035 verdoppeln, während der Pkw-Verkehr um die Hälfte reduziert würde. Engpassbeseitigungen im Schienennetz, die Reaktivierung von Gleisanschlüssen und automatisierte Hubs für den kombinierten Güterverkehr können den **Lkw-Verkehr zugunsten der Schiene um 30 Prozent reduzieren**.

Effizienz verbessern: Weiterentwickelte CO₂-Flottengrenzwerte können zusammen mit progressiven Kfz-Steuern eine Trendwende bei Pkw-Gewicht und Motorisierung herbeiführen, wodurch die **Fahrzeugeffizienz um rund 30 Prozent steigen** kann. Im **Lkw-Verkehr sind Effizienzsteigerungen um ca. 25 Prozent möglich**.

Alternative Antriebe einsetzen: Ein **Verbot von Verbrennungsfahrzeugen** und ein davor stattfindender **Phase-Out** würden eine schnelle Elektrifizierung der Pkw-Flotte ermöglichen. Beim Ausstiegsdatum ist zu berücksichtigen, dass der Großteil der Pkw-Flotte bis 2035 aus Elektrofahrzeugen bestehen muss und Pkw mit Verbrennungsmotor ab Zulassung ca. 10 Jahre in Betrieb bleiben. Im Güterverkehr könnte bei leichten Nutzfahrzeugen ein Umstieg auf batterieelektrischen Antrieb erfolgen, bei Lkw ein Umstieg vor allem auf Wasserstoffantrieb, während für Sattelzüge eine **Oberleitungs-Infrastruktur auf Autobahnen** aufgebaut werden sollte. Die Kraftstoffe für die verbliebenen Verbrennungsfahrzeuge sowie den Luft- und Schiffsverkehr sollten bis 2035 schrittweise auf strombasierte synthetische Energieträger umgestellt werden.

Charakteristik des Verkehrssektors

Im Verkehrssektor sind die Herausforderungen des Klimaschutzes besonders groß. Während in anderen Sektoren die Emissionen in der Tendenz sinken, stagnieren die THG-Emissionen des Verkehrssektors auf hohem Niveau, seit 1990 konnten die Emissionen nicht reduziert werden.

Treiber hierfür sind insbesondere gestiegene Verkehrsaufwände im Personen- und Güterverkehr, welche die erzielten technischen Effizienzgewinne überkompensieren. So ist die Fahrleistung von Pkw und Lkw zwischen 1990 und 2018 um rund 30 Prozent von 574 auf 751 Mrd. km gestiegen (DIW et al. 2019). Größere Pkw mit höherem Gewicht und stärkerer Motorisierung tragen dazu bei, dass sich die Effizienzverbesserungen in der Technik nicht in einem geringeren Energiebedarf und geringerem Treibhausgasausstoß widerspiegeln – in den letzten 15 Jahren ist die Motorleistung neuer Pkw um 29 Prozent gestiegen (KBA 2020). Die THG-Emissionen werden durch den nahezu ausschließlich fossil betriebenen Straßenverkehr dominiert, der für über 90 Prozent der Emissionen verantwortlich ist. Der Modal Split, also die Verteilung von Verkehrsaufkommen und Verkehrsaufwand auf die einzelnen Verkehrsmittel, hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten nur geringfügig verändert. Im Personenverkehr dominiert der motorisierte Individualverkehr mit einem Anteil von 75 Prozent am Verkehrsaufwand (vgl. Abbildung 7-1).

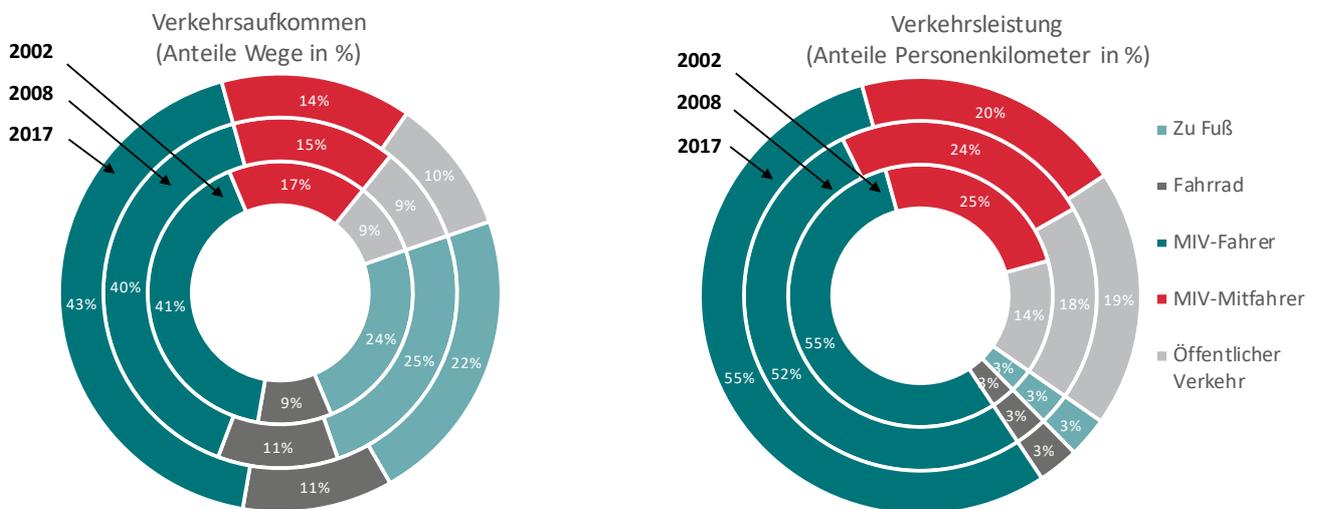
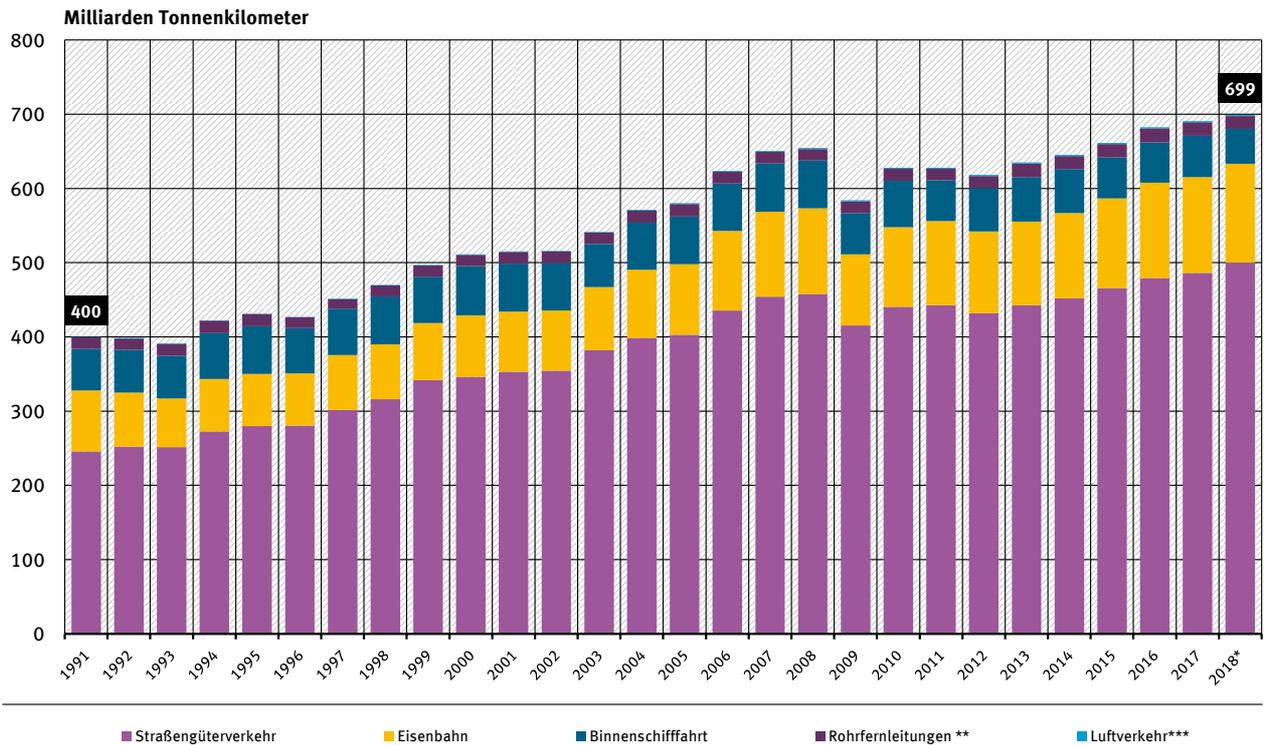


Abbildung 7-1 Modal Split des Personenverkehrs in Deutschland: Verkehrsaufkommen (Wege) und Verkehrsaufwand (Personenkilometer) im zeitlichen Vergleich

Quelle: Basierend auf Nobis & Kuhnimhof (2018).

Im Güterverkehr, der bedingt durch wachsende Güterproduktion und Handel sowie einer zunehmend überregional, EU- und weltweit verflochtenen Ökonomie noch stärker als der Personenverkehr gewachsen ist, macht der Transport im Lkw ebenfalls mehr als 70 Prozent des Verkehrsaufwands aus (vgl. Abbildung 7-2).

Güterverkehrsaufwand nach Verkehrsträgern



* zum Teil vorläufige Werte
 ** ab 1996 nur Rohöl

Quelle: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Verkehr in Zahlen 2019/2020, S. 244f. und vorherige Jahrgänge

Abbildung 7-2 Verkehrsaufwand und Modal Split im Güterverkehr

Quelle: UBA (2020e) nach DIW et al. (2019).

Auch im Luftverkehr hat der Verkehr stark zugenommen; das Passagieraufkommen im deutschen Luftverkehr hat binnen 10 Jahren um rund 40 Prozent zugenommen (Destatis 2019), Prognosen gehen von einem weiteren starken Wachstum um rund 4 bis 5 Prozent pro Jahr aus. Treiber hierfür sind neben einem wachsenden Tourismusmarkt und der internationalen ökonomischen Verflechtung auch bestehende Politikinstrumente zur Förderung des Luftverkehrs – etwa die internationale Steuerbefreiung von Flugbenzin, die Liberalisierung der Luftfahrtmärkte mit der dadurch begünstigten Preiskonkurrenz von Low-cost-Airlines sowie die staatliche Subventionierung von Regionalflughäfen. Bedingt durch die Corona-Epidemie wird es 2020 zwar einen starken Rückgang geben, dieser wird aber ohne weitere Maßnahmen voraussichtlich wieder in ein starkes Wachstum übergehen. Der aktuell weiterhin global zunehmende Güterverkehr per Hochseeschiff erzeugt zudem eigene weitere Herausforderungen (siehe unter anderem Wuppertal Institut 2018a).

Strategien und Herausforderungen

Die notwendige massive Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist nur durch die Kombination verschiedener Strategieansätze erreichbar: Im Rahmen der Verkehrswende sind drei Ansätze von Bedeutung: 1. eine Verringerung des Verkehrsaufkommens, 2. die Verlagerung auf möglichst energieeffiziente und klimafreundliche Verkehrsmittel (Fuß- und Radverkehr, ÖV und Sharing-Mobilität) sowie 3. Verbesserungen der spezifischen Effizienz von Fahrzeugen und Verkehrssystem. Zusammen

führen diese zu einem geringeren Energiebedarf des Verkehrssektors. Für eine THG-Minderung und langfristig vollständige Dekarbonisierung ist zudem eine Energiewende im Verkehr erforderlich: Diese ermöglicht durch den Umstieg auf Elektromobilität und andere alternative Antriebe in Kombination mit erneuerbarem Strom sowie daraus erzeugten klimaneutralen Energieträgern eine Reduzierung der THG-Emissionen je Energieeinheit (vgl. Abbildung 7-3).



Abbildung 7-3 Strategien der Verkehrswende und der Energiewende im Verkehr

Quelle: Schneidewind (2018).

Obwohl in vielen Handlungskonzepten sowie Szenarien der Optimierung der Fahrzeugeffizienz und der Energiewende im Verkehr die größte Bedeutung zugemessen wird, sind die Strategien der Vermeidung und Verlagerung von Verkehr nicht zu unterschätzen. So sind etwa durch eine Verlagerung von der Straße auf die Schiene deutlich größere Effizienzgewinne möglich als durch eine reine Fokussierung auf die Fahrzeugeffizienz von Pkw und Lkw: Die Bahn ist (bei durchschnittlichem Besetzungs-/Auslastungsgrad) um den Faktor 4,8 energieeffizienter als der Pkw und den Faktor 5,6 effizienter als der Lkw. (vgl. BDI 2018). Die vielfach als gering eingeschätzten Potenziale sind dagegen den vielfach zurückhaltend getroffenen Annahmen zu Maßnahmen und Instrumenten für Verkehrsvermeidung und -verlagerung geschuldet. Nur eine sehr ambitionierte Kombination aller Strategieansätze ist schließlich in der Lage, eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis 2035 umzusetzen.

Dabei bestehen große Herausforderungen, die Energieeffizienz zu steigern und THG-Emissionen zu reduzieren, ohne dabei die Mobilität einzuschränken: Die Alternativen zum fossilen motorisierten Individualverkehr sind lückenhaft, etwa mit Blick auf

Netz und Takt im Öffentlichen Verkehr, eine sichere Radverkehrsinfrastruktur sowie die Verfügbarkeit konkurrenzfähiger alternativ angetriebener Fahrzeuge. Engpassbedingte Verzögerungen machen den Schienengüterverkehr im Wettbewerb mit dem Lkw-Transport unattraktiv. Fehlende Vernetzungen zwischen den Verkehrsträgern verhindern einen komfortablen und schnellen Personen- wie auch Güterverkehr von Tür zu Tür. Um diese und andere Mängel zu beseitigen, sind hohe Investitionen notwendig. Die spezifischen Kosten der Energie- und THG-Einsparung sind im Verkehrssektor daher vergleichsweise hoch. Zugleich sind Marktinstrumente nur bedingt wirksam – im Alltagsverkehr besteht eine geringe Preissensitivität, wenn keine adäquaten Alternativen bestehen, da Mobilität ein Grundbedürfnis darstellt; das eigene Auto ist zudem mit hoher emotionaler und symbolischer Bedeutung aufgeladen, weshalb ökonomisch rationales Handeln oft in den Hintergrund tritt. Die Akzeptanz für Verhaltensänderungen, die mit der Verkehrswende einhergehen, ist daher nicht einfach herzustellen. Bestehende Mobilitätsroutinen erschweren Änderungen des Mobilitätsverhaltens, und außerhalb von großen Städten sowie im ländlichen Raum verhindern zudem eine disperse Raumstruktur sowie der fehlende ÖPNV den Verzicht auf das Auto. Die Machtkonzentration bei wenigen Akteuren – sowohl aufgrund der staatlichen Finanzierung und Regulierung des öffentlichen Verkehrs als auch mit Blick auf die Struktur der Automobilindustrie – macht zudem eine „Verkehrswende von unten“ nur in Teilbereichen möglich.

Zugleich gibt es relevante Treiber, die eine Umsetzung der Verkehrswende sowie der Energiewende im Verkehr beschleunigen können. Digitalisierung und Mobiles Internet ermöglichen komfortable, individuell buchbare Sharing-Mobilität, die künftig gemeinsam mit dem Umweltverbund zu Integrierten Mobilitätssystemen weiterentwickelt werden können. In Städten hat die Transformation von autogerechten Städten hin zu einer nachhaltigen Mobilität vielerorts bereits begonnen, da mit ihr neben dem Klimaschutz viele Co-Benefits einhergehen – mit einer Verbesserung der Luftqualität, der Minderung von Lärm und Unfällen sowie eine neue Nutzung öffentlichen Raumes mit mehr Lebensqualität für Bürgerinnen und Bürger.

Verkehrswende im Personenverkehr

Der ersten strategischen Säule, einer **Reduzierung des Verkehrsaufwands** (= Verkehrsleistung; in Personenkilometern, Pkm), stehen starke Wachstumstreiber entgegen: So wird beispielsweise durch Aus- und Neubau von Straßen der Raumwiderstand verringert, so dass längere Strecken in gleicher Zeit zurückgelegt werden können. Der Bundesverkehrswegeplan 2030 (BMVI 2016) sieht unter anderem den Ausbau von 2000 Autobahnkilometern vor. Im Ergebnis werden dadurch etwa Pendlerdistanzen länger.

Die betrachteten Szenarien gehen davon aus, dass weiteres Wachstum gestoppt wird (anders als in aktuellen Prognosen), einzelne Szenarien (UBA GreenSupreme) sehen die Möglichkeit einer Verringerung des Verkehrsaufwands um rund 20 Prozent bis 2050 (vgl. Abbildung 7-4).

Notwendig dafür sind verschiedene Maßnahmen: Neben der deutlichen Reduzierung von Neu- und Ausbau von Straßen ermöglicht eine Siedlungsverdichtung und stärkere Nutzungsmischung kürzere Wege, insbesondere in Städten. Aufgrund langer Planungs- und Umsetzungszeiten in der Stadtentwicklung ist hier eine frühere Realisie-

zung des für 2050 anvisierten Potenzials nur durch zusätzliche Maßnahmen möglich – etwa die verstärkte Umsetzung von Homeoffice. Wenn 30 Prozent der Beschäftigten an jedem zweiten Arbeitstag im Homeoffice arbeiten, können rund 5 Prozent des Verkehrsaufwands eingespart werden.

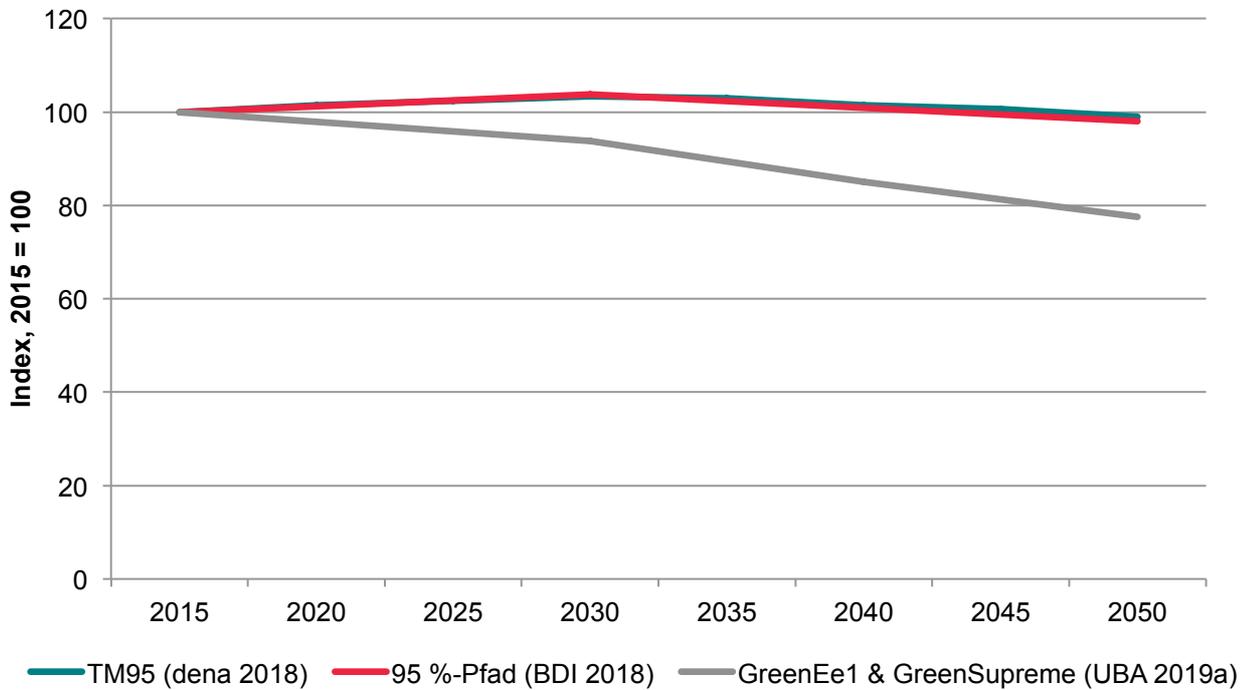


Abbildung 7-4 Szenarienvergleich der Entwicklung des Verkehrsaufwands im Personenverkehr

Quellen: Basierend auf den zitierten Szenariostudien.

Große Potenziale für einen THG-neutralen Verkehr liegen in der **Verkehrsverlagerung** vom motorisierten Individualverkehr (vor allem Pkw) auf den Umweltverbund aus Öffentlichem Verkehr, Rad- und Fußverkehr sowie Sharing-Angeboten.

Die Annahmen über die Umsetzung dieses Potenzial variieren stark zwischen den betrachteten Szenarien: Verlagerte Verkehrsanteile von Pkw auf den Umweltverbund bis 2050 zwischen 7 Prozent (BDI 95 %-Pfad) und 47 Prozent (UBA GreenSupreme), vgl. Abbildung 7-5.

Notwendig für eine starke Verlagerung ist ein massiver Ausbau des Öffentlichen Verkehrs (sowohl im Nah- und Regionalverkehr als auch im Fernverkehr), um zum einen hinreichende Kapazitäten bereitzustellen, zum anderen durch ein dichteres Netz und einen höheren Takt die Attraktivität des ÖV zu erhöhen. Um die für 2050 angestrebte Verlagerung bereits 2035 zu erreichen, ist eine Beschleunigung der Planung und Umsetzung notwendig. Notwendig ist zudem die Umsetzung aller Projekte aus dem Bundesverkehrswegeplan aus den Kategorien vordringlicher Bedarf und vordringlicher Bedarf mit Engpassbeseitigung. (vgl. Agora Verkehrswende 2019)

Daneben geht das in Bezug auf Verlagerung ambitionierteste Szenario GreenSupreme davon aus, dass Ridepooling-Dienste im (sub)urbanen Raum Fahrten mit privaten Pkw ab 2025 sukzessive ersetzen können; bis 2050 wird rund ein Drittel des Verkehrsaufwands von Pkw durch Ridesharing erbracht. Für eine Attraktivierung

der Nutzung dieser Sharing-Dienste, die durch hohen Besetzungsgrad annähernd die Effizienz des öffentlichen Verkehrs erreichen, ist es notwendig, sie mit dem Öffentlichen Verkehr zu verknüpfen (räumlich sowie tariflich). Ridepooling bietet zudem durch die wesentlich höheren Einsatzzeiten gegenüber privaten Pkw die Chance, die Anzahl von Fahrzeugen insgesamt stark zu reduzieren und damit den urbanen Raum zu entlasten (OECD & ITF 2016).

Insgesamt muss sich der Verkehrsaufwand des Umweltverbunds aus Fuß- und Radverkehr und öffentlichem Verkehr bis 2035 etwa verdoppeln, während die des Pkw-Verkehrs sich etwa halbiert. Innerhalb des Pkw-Verkehrs wird dabei wiederum rund ein Drittel des Verkehrsaufwands durch Ridepooling erbracht.

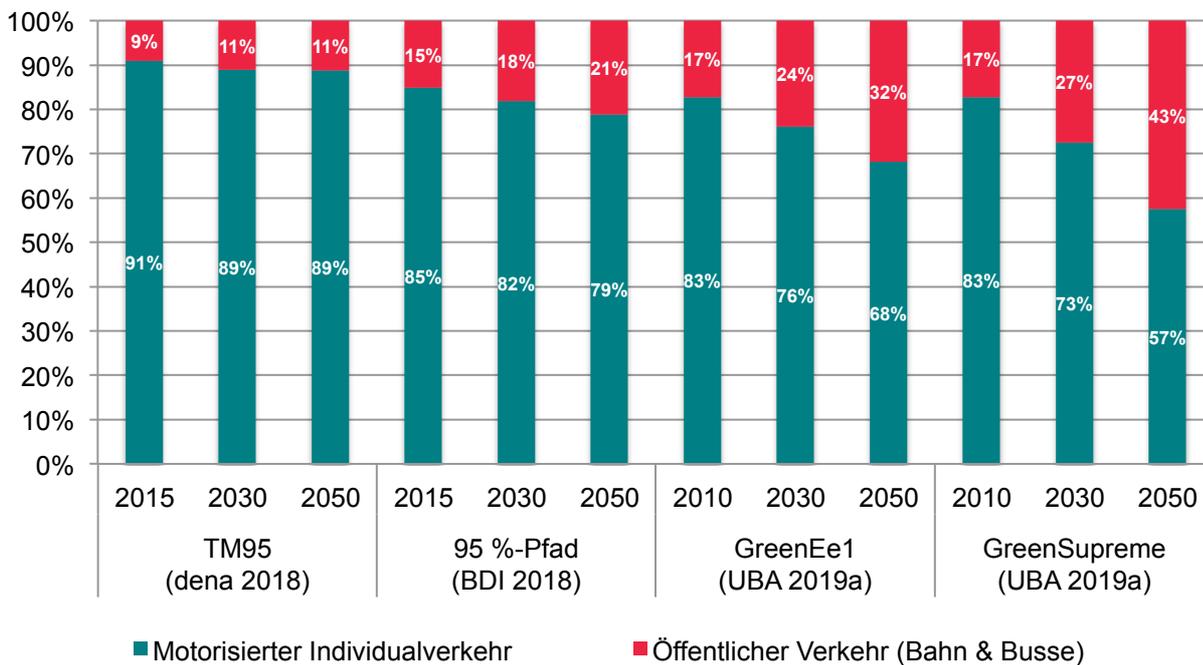


Abbildung 7-5 Szenarienvergleich der Modal Shift-Entwicklung zwischen MIV und ÖV im Personenverkehr

Quellen: Basierend auf den zitierten Szenariostudien.

Zugleich muss hierfür die Nutzung von privaten Pkw in Städten unattraktiver gestaltet werden, etwa durch höhere Parkgebühren (stärkere Bepreisung von Anwohnerparken), Reduzierung von Fahrspuren für Kfz und von Parkraum, Citymaut (vgl. London, Stockholm) sowie Tempo 30 innerorts. Damit könnte in Städten die Anzahl der Pkw je 1000 Einwohner von heute ca. 500 auf knapp ein Drittel sinken, das heißt auf 150 Fahrzeuge (einschließlich Ride-/Carsharing und Taxi). (UBA 2019a)

Um eine Reduzierung des Flugverkehrs zu erreichen, gehen die UBA-Szenarien von einer vollständigen Einstellung des innerdeutschen Flugverkehrs bis 2050 aus – das Vorziehen dieser Verlagerung wäre möglich, wenn der Ausbau von Schnellfahrtrassen im Schienenfernverkehr bis 2030 verstärkt wird. Internationaler Flugverkehr wird in den Szenarien um 25 Prozent reduziert und weitgehend durch Schienenverkehr ersetzt.

Die dritte Säule der Verkehrswende ist die **Verbesserung der Effizienz** der Verkehrsmittel. Aufgrund der dominierenden Bedeutung des Straßenverkehrs wird hier der Fokus auf Pkw gelegt.

Insbesondere bei konventionellen Fahrzeugen, aber auch bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben gehen die Szenarien von einem großen Potenzial für Effizienzverbesserungen aus.

Für konventionelle Pkw werden etwa bis 2050 Effizienzverbesserungen um 25 Prozent (dena) bis 37 Prozent (BDI) angenommen, UBA GreenSupreme sieht bis 2040 ein Effizienzpotenzial von 31 Prozent (danach keine Zulassung von Verbrennern mehr). Neben technischen Effizienzmaßnahmen (Motor, Getriebe und Reduzierung von Fahrwiderständen) erfordert eine Ausschöpfung der Potenziale eine deutliche Trendwende bei Fahrzeuggewicht und -leistung. Durch Leichtbau, verstärkten Einsatz aktiver Sicherheitssysteme und Downsizing in Verbindung mit reduzierten Geschwindigkeiten ist dies erreichbar. Hierfür müssen allerdings die bestehenden CO₂-Flottengrenzwert-Regulierungen auf EU-Ebene entsprechende Anreize bieten – während heute aufgrund weniger strenge Grenzwerte für Fahrzeuge mit hohem Gewicht nur ein minimaler Anreiz zur Gewichtsreduktion besteht. (vgl. ICCT 2018)

Ein weiteres Instrument für eine Attraktivierung effizienter, wenig verbrauchender Fahrzeuge ist eine stark gespreizte Kfz-Steuer, die als Bonus-Malus-System ausgestaltet wird. Frankreich erhebt beispielsweise für Fahrzeuge, die mehr als 185 g CO₂ pro km ausstoßen, eine einmalige Zulassungssteuer von 20.000 Euro, darunter sind die Aufschläge gestaffelt bis zum Schwellenwert von 110 g CO₂ pro km. Verbrennungsfahrzeuge unterhalb dieses Werts sind steuerfrei, für E-Fahrzeuge wird ein Bonus gezahlt. Neben dieser hohen Zulassungssteuer gilt ein ähnliches Anreizsystem auch für die jährliche Kfz-Steuer, allerdings auf niedrigerem Niveau.

Energiewende im Personenverkehr

Die Umstellung der Fahrzeugflotten auf alternative Antriebe kann einen bedeutenden Anteil an der THG-Reduzierung des Verkehrs leisten. Hier gehen alle Szenarien von einer fast vollständigen Umstellung der Pkw-Flotten bis 2050 aus – für eine Erreichung der Klimaneutralität bis 2035 ist ein ähnliches Niveau notwendig. Bis 2030 nehmen die Szenarien sehr unterschiedliche, aber deutlich niedrigere Potenziale an – abhängig von der unterstellten Preisentwicklung der Fahrzeuge, der Produktionskapazitäten und der Rahmenbedingungen, insbesondere der Ladeinfrastruktur.

Die Szenarien unterscheiden sich zudem stark hinsichtlich der Anteile batterieelektrischer, Hybrid- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge, siehe Abbildung 7-6.

Sinnvoll ist dabei ein starker Fokus auf batterieelektrische Fahrzeuge, da diese mit Abstand am energieeffizientesten sind – rund 3 bis 4 Mal effizienter als Brennstoffzellenfahrzeuge und rund 6 Mal effizienter als synthetische Kraftstoffe für Verbrennungsfahrzeuge.

Wenn ein weitgehender Flottenaustausch hin zu alternativen Antrieben bis 2035 umgesetzt werden soll, müssen – bei gleichzeitiger Verkleinerung der Flotte – 47 Mio. konventionelle Pkw innerhalb von 15 Jahren durch 28 Mio. Fahrzeuge mit alternativen Antrieben – vor allem Elektroautos – ersetzt werden. Dies entspricht ab heute bis 2035 jährlich rund 2 Mio. neuer Fahrzeuge mit alternativen Antrieben.

Zum Vergleich betrug die Anzahl der 2019 insgesamt zugelassenen Pkw 3,6 Mio. (KBA 2020). Ein solcher Umschwung ist nur erreichbar, wenn zusätzliche Fertigungskapazitäten aufgebaut, der Ausbau der Ladeinfrastruktur beschleunigt und weitere Preisanreize gesetzt werden.

Das Beispiel Norwegen zeigt, wie durch hohe Preisanreize ein schneller Flottenumbau gelingen kann: Elektroautos sind befreit von der Mehrwertsteuer (25 Prozent), der dort bestehenden Importsteuer und Kfz-Steuer; insgesamt machen die Steuern je nach Fahrzeug etwa die Hälfte des Kaufpreises aus, so dass E-Fahrzeuge dort einen deutlichen Preisvorteil haben. Dies hat zu einem starken Anstieg der zugelassenen E-Fahrzeuge geführt, 2019 machten diese über 42 Prozent der Neuzulassungen aus.

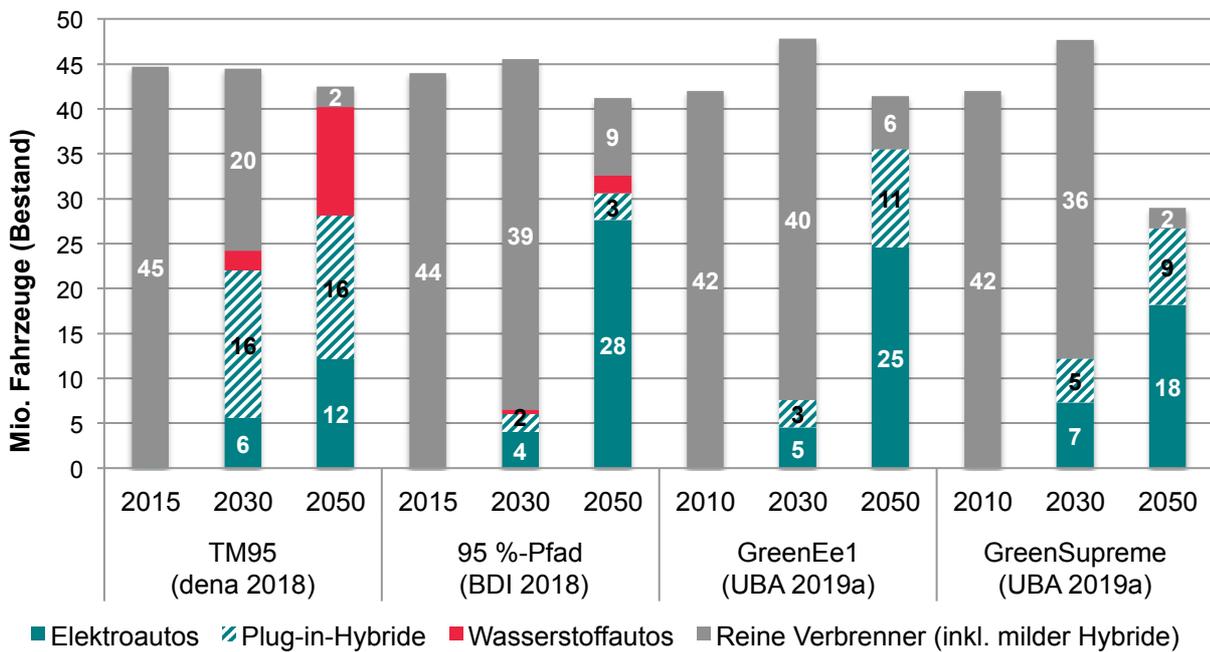


Abbildung 7-6 Szenarienvergleich der Antriebsarten im Personenverkehr

Quellen: Basierend auf den zitierten Szenariostudien.

Ausgehend von einer durchschnittlichen Lebensdauer eines Pkw von 12 Jahren ist aber davon auszugehen, dass selbst bei forcierten Anreizen für Elektrofahrzeuge 2035 noch ein relevanter Anteil von Verbrennungsfahrzeugen auf den Straßen ist.

Flankierend wäre daher ein Phase-out der Zulassung von Verbrennungsfahrzeugen durch Quoten für alternative Antriebe sowie ein Phase-out von fossilen Kraftstoffen durch eine Beimischungsquote für Synfuels denkbar. Für verbleibende Verbrennungsfahrzeuge werden dann 2035 zu 100 Prozent Synfuels eingesetzt. Durch deren hohe Kosten kann auf ein früheres Ausscheiden dieser Fahrzeuge aus dem Bestand hingewirkt werden. Im GreenSupreme-Szenario werden im Jahr 2050 im Personenverkehr 26 TWh synthetische Kraftstoffe benötigt, was sich bei forcierter Umsetzung der dort vorgesehenen Maßnahmen auf das Jahr 2035 übertragen lässt.

Kombination der Strategien der Verkehrs- und Energiewende im Verkehr

Die oben beschriebenen Strategien müssen jeweils in ihrer ambitioniertesten Ausprägung kombiniert werden, damit das Ziel der Klimaneutralität bereits 2035 statt

2050 erreichbar ist (vgl. Rudolph et al. 2017). Hier ist UBA GreenSupreme mit Blick auf Verkehrsvermeidung und -verlagerung das weitestgehende Szenario. Zur Effizienzverbesserung wären die ambitionierteren Zielgrößen des 95-Prozent-Szenarios des BDI anzustreben.

Während die Verkehrsverlagerung durch eine beschleunigte Planung und Umsetzung neuer Verkehrsinfrastrukturen sowie Regulierung und Anreize zugunsten der Nutzung des Umweltverbundes bis 2035 durchaus erreichbar ist, könnte der Umfang der Verkehrsvermeidung bis 2035 aufgrund der langfristigen raumstrukturellen Änderungen schwer zu erreichen sein.

Deshalb ist es für eine Dekarbonisierung bis 2035 notwendig, die Energiewende im Verkehr gegenüber den Szenarien nicht nur zu beschleunigen, sondern auch im Ziel konsequenter umzusetzen. Hier wäre der Fokus auf E-Mobilität wie in den UBA-Szenarien und dem 95 %-Pfad des BDI einzuschlagen, mit dem Ziel noch höherer Anteile für BEV. Dies ist nicht nur durch deren höhere Effizienz begründet, sondern auch dadurch, dass in den für eine Beschleunigung der Verkehrswende entscheidenden Jahren 2020 bis 2030 H₂-Fahrzeuge noch zu teuer sein werden. (vgl. dena 2018)

Verkehrswende im Güterverkehr

Der Wachstumstrend im Güterverkehr ist noch stärker ausgeprägt als im Personenverkehr. Global arbeitsteilige und damit verkehrsaufwändige Produktion und Handel bei gleichzeitigem Wachstum von Produktion und Konsum bedingen dieses Wachstum auf hohem Niveau ebenso wie verstärkter Online-Handel durch individuelle Warenlieferungen. Die meisten Szenarien (siehe Abbildung 7-7) sehen für eine **Verkehrsvermeidung** hier nur die Möglichkeit geringer Trendabschwächungen, bei denen der Güterverkehr bis 2050 weiterhin ansteigt: um 48 Prozent (BDI 95 %-Pfad) 28 Prozent (dena TM95) beziehungsweise 9 Prozent (UBA GreenEe1) gegenüber 2015; allein GreenSupreme geht von einem leichten Rückgang um 9 Prozent aus.

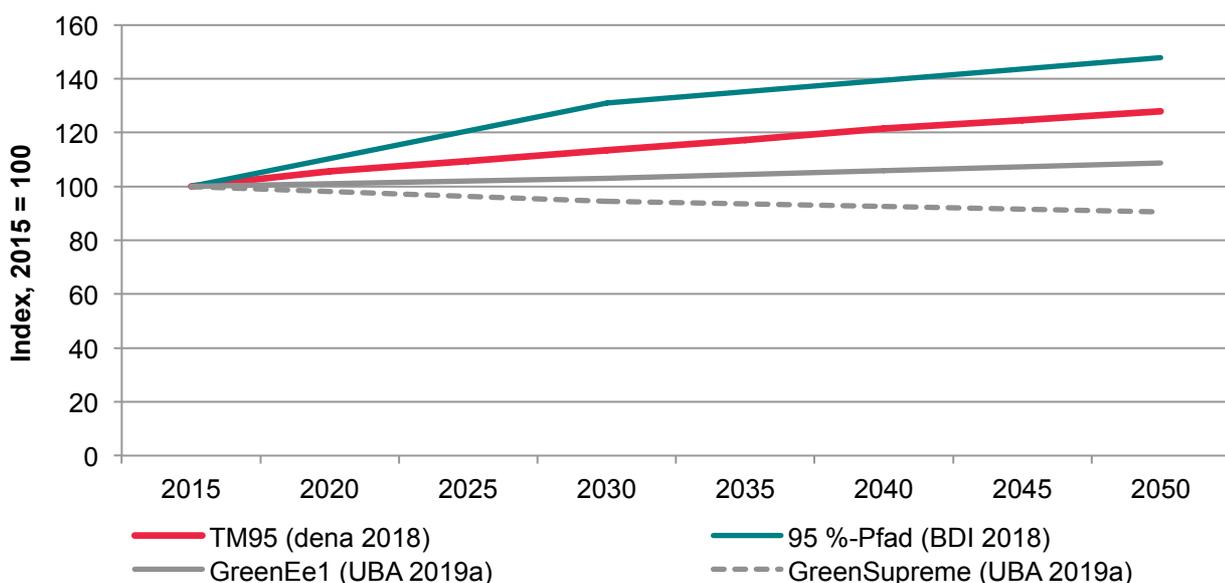


Abbildung 7-7 Szenarienvergleich des Verkehrsaufwands im Güterverkehr

Quellen: Basierend auf den zitierten Szenariostudien.

Erreicht wird dieser Rückgang des Güterverkehrs zum einen durch eine Reduzierung der Gütermengen, was durch eine Erhöhung der Ressourceneffizienz erreicht wird. Zum anderen werden verstärkt regionale Wirtschaftskreisläufe insbesondere in der Nahrungsmittelproduktion angenommen.

Mit Blick auf eine mögliche **Verlagerung** des Güterverkehrs reichen die Szenarioergebnisse wie in Abbildung 7-8 erkennbar von 10 Prozent (BDI 95 %-Pfad) bis 30 Prozent (UBA GreenSupreme) der Güterverkehrsleistung des Lkw, die bis 2050 auf Schiene und Binnenschiff verlagert werden.

Für die ambitionierte Verlagerung insbesondere auf die Schiene geht das GreenSupreme-Szenario von massiven Investitionen in das Schienennetz für den Güterverkehr aus, die das Netz nicht nur erweitern, sondern auch die Abläufe beschleunigen und vereinfachen. Notwendig sind hierfür unter anderem Netzlückenschlüsse, die Herstellung internationaler Interoperabilität, eine Reaktivierung von Gleisanschlüssen, der Ausbau von Schnittstellen des kombinierten Verkehrs, Automatisierung bei Verladung und Zugbildung.

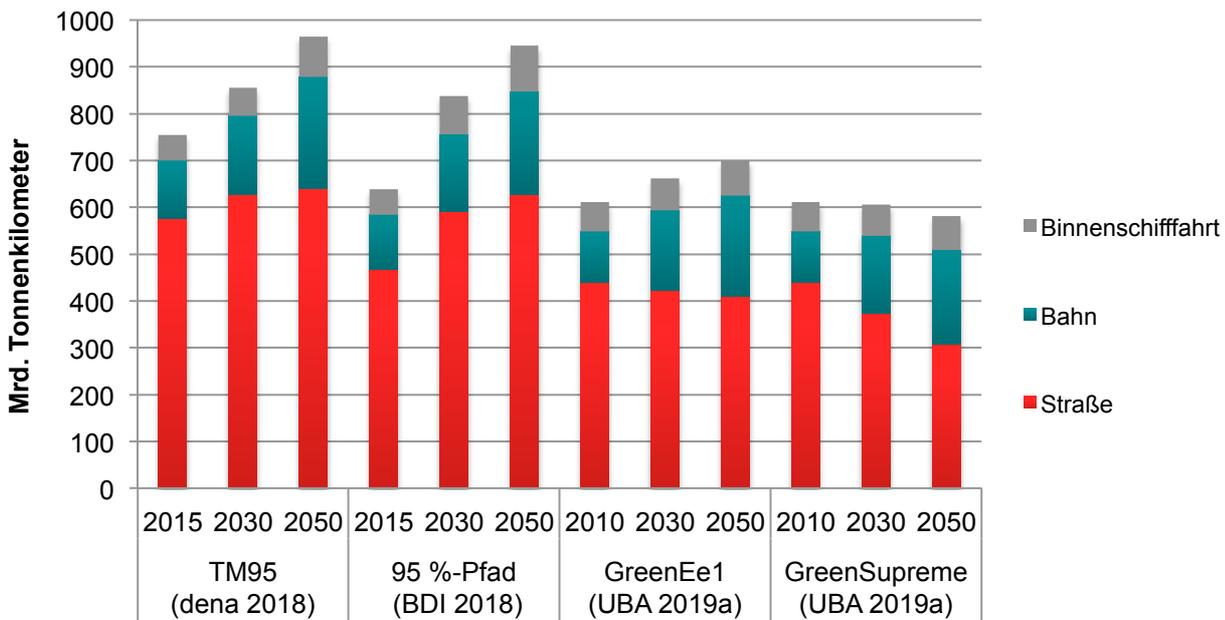


Abbildung 7-8 Szenarienvergleich des Verkehrsaufwands je Verkehrsträger im Güterverkehr

Quellen: Basierend auf den zitierten Szenariostudien.

Da der Güterverkehr stärker als der Personenverkehr durch monetäre Anreize steuerbar ist, sind zur Erreichung der Verlagerungsziele eine Senkung von Trassenpreisen im Schienenverkehr, eine Subventionierung von kombiniertem Verkehr sowie eine Erhöhung der Lkw-Maut zielführend.

Zudem kann ein gesetzliches Verlagerungsziel dazu beitragen, die Priorisierung des Infrastrukturausbaus der Schiene und die preisliche Attraktivierung des Güterverkehrs auf der Schiene zu harmonisieren, wie das Beispiel der Schweiz zeigt: Das Ziel der Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene wurde 1994 in der Verfassung verankert. Darauf basierend wurden Güterbahnstrecken massiv ausgebaut und der Lkw-Verkehr stark verteuert – die Mauteinnahmen werden zu zwei Dritteln für den

Ausbau der Schiene verwendet. Im Ergebnis wird heute über 40 Prozent des Güterverkehrsaufwands auf der Schiene abgewickelt.

Für eine Übergangszeit bis zur vollständigen Umstellung des Güterverkehrs auf erneuerbare Antriebe ist die Verbesserung der Effizienz der Verbrennungsantriebe notwendig. Bei der **Fahrzeugeffizienz** konventioneller Lkw sehen die Szenarien geringeres Optimierungspotenzial im Vergleich mit Pkw, da hier Fahrzeuggröße und -Leistung bereits aus betriebswirtschaftlicher Perspektive optimiert werden. Die UBA-Szenarien sehen für Diesel-Sattelzüge bis 2040 (ab dann keine reinen Verbrenner mehr) ein Effizienzsteigerungspotenzial von 25 Prozent, das durch Effizienzvorgaben der EU forciert wird. Daneben bietet eine starke emissionsabhängige Spreizung der Lkw-Maut weitere Anreize.

Energiewende im Güterverkehr

Alle Szenarien sehen eine Diversifizierung der Lkw-Flotten – bei kleineren Lkw sind eher BEV und PHEV sinnvoll, bei größeren Fahrzeugen Oberleitungs-BEV oder Oberleitungs-Diesel-Hybrid-Lkw und gegebenenfalls H₂-Brennstoffzellen.

Sowohl in einer dena-Szenarienvariante als auch im BDI 95 %-Pfad wird als energie- und kosteneffizienteste Option der Einsatz von Oberleitungs-Diesel-Hybrid Lkw vorgeschlagen; Hierfür wird bis 2050 eine Elektrifizierung von bis zu 8000 km Autobahn angenommen; diese wäre bei einer beschleunigten Planung und Umsetzung auch bis 2035 umsetzbar. Dafür müssten durchschnittlich jedes Jahr rund 550 km Oberleitungen an Autobahnen installiert werden.

Da eine vollständige Elektrifizierung im Lkw-Verkehr nicht umsetzbar ist, werden ergänzend auch synthetischer Kraftstoffe benötigt. Im GreenSupreme-Szenario (mit den geringsten Güterverkehrsaufwänden) werden 60 Prozent des Energiebedarfs des Güterverkehrs strombasiert abgewickelt, für die restlichen 40 Prozent sind 26 TWh Synfuels notwendig.

Must-Dos für die Mobilitätswende im Personen- und Güterverkehr

Um eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis 2035 erreichen zu können, müssen sehr ambitionierte Maßnahmen ergriffen werden, die alle strategischen Handlungsansätze kombinieren: die Reduzierung des Verkehrsaufwands, eine Verlagerung von Verkehr auf klimafreundlichere Verkehrsmittel, die Verbesserung der Effizienz von Fahrzeugen und Verkehrssystemen und eine Energiewende im Verkehr zu alternativen Antrieben und Kraftstoffen.

Um eine Verkehrsreduzierung zu erreichen, muss eine kompakte Stadt- und Raumentwicklung gefördert werden, die Städte und Regionen der kurzen Wege ermöglicht. Dabei müssen Versorgungsangebote insbesondere im ländlichen Raum verdichtet werden. Die Förderung einer regionalen Wirtschaft kann zu kürzeren Lieferketten führen, Energiewende und Ressourceneffizienz machen geringere Rohstofftransporte möglich. Die in der Corona-Krise stark gestiegene Nutzung virtueller Mobilität durch Homeoffice, Online-Veranstaltungen, Online-Shopping oder digitale Ämter muss verstetigt werden. Insgesamt kann so bis 2035 der Verkehrsaufwand im Personenverkehr um bis zu 20 Prozent gegenüber 2015 verringert werden, im Güterverkehr, der bislang einem Wachstumstrend unterliegt, scheinen Reduktionen um rund 5 bis 10 Prozent realisierbar.

Für eine Verlagerung von Verkehr auf den Umweltverbund und den Schienengüterverkehr ist eine Kombination von Push- und Pull-Maßnahmen notwendig, um eine hinreichende Anreizwirkung zu erzeugen und praktikable Alternativen zum motorisierten Individualverkehr und Straßengüterverkehr zu schaffen. Dazu müssen die Schienennetze und die Angebote im öffentlichen Verkehr massiv ausgebaut, die Takte verdichtet und Verspätungen abgebaut werden. Insgesamt kann sich so bis 2035 die Verkehrsleistung von Radverkehr, Öffentlichem Nah- und Fernverkehr, Car-Sharing und Ridepooling verdreifachen. Durch den Aufbau von mit dem ÖV integrierten Ridepooling-Angeboten kann jede dritte Autofahrt in Städten auf diese Dienste verlagert und dort die Zahl der benötigten Kfz auf etwa ein Drittel reduziert werden.

Eine Abkehr des lange verfolgten Paradigmas „autogerechter“ Städte und eine offensive Ausweitung autofreier Zonen, die Reduzierung von Parkplätzen und Fahrspuren und reduzierte Geschwindigkeit machen zugleich die Nutzung des Autos unattraktiver. So wird eine Halbierung des Pkw-Verkehrs möglich (GreenSupreme).

Durch Engpassbeseitigungen im Schienennetz, die Reaktivierung von Gleisanschlüssen und automatisierte Hubs für den kombinierten Güterverkehr kann der Lkw-Verkehr zugunsten der Schiene um 30 Prozent reduziert werden (GreenSupreme).

Der Flugverkehr kann bis 2035 innerhalb Deutschlands vollständig auf den Bahnverkehr verlagert werden.

Instrumentenmix

Um die genannten Maßnahmen umzusetzen, ist eine aufeinander abgestimmte Kombination verschiedener Instrumente notwendig, die hier stichworthaft dargestellt werden:

Stadt- und Verkehrsplanung

- Anreize für dichte Siedlungsstrukturen, Umwidmung von Straßenraum zugunsten von Rad- & Fußverkehr
- Ca. 36 Mrd. Euro pro Jahr für den öffentlichen Nah- und Fernverkehr, Kapazität verdoppeln bis 2035, Deutschlandtakt, Digitalisierung: Die aktuellen jährlichen Investitionen des Bundes in die Schieneninfrastruktur liegen bei rund 6 Mrd. Euro; Bund, Länder und Kommunen wenden jährlich zudem rund 12 Mrd. Euro für Investitionen und Betrieb des ÖPNV auf. Diese Förderung muss auf jährlich etwa 12 Mrd. Euro für Schieneninfrastruktur und 24 Mrd. Euro für den öffentlichen Nahverkehr verdoppelt werden. Die hierzu nötigen Mittel könnten unter anderem durch den Abbau von Subventionen des Autoverkehrs sowie durch eine Drittnutzerfinanzierung (etwa eine ÖV-Abgabe für Handel, Arbeitgebende oder Immobilieneigentümer/-innen) finanziert werden.
- Mittelumschichtung im Bundesverkehrswegeplan: Moratorium für Straßenneubau, Umverteilung auf Schienen-, Wasserstraßen- und Radinfrastruktur
- City-Logistik, Mikro-Hubs für Kurier-, Express- und Paketdienste, Terminals im kombinierten Verkehr mit automatisierter Verladung fördern
- Umsetzungszeit: min. 10 Jahre, daher Weichenstellungen sofort notwendig

Ordnungsrecht

- Tempo 30 in Städten, Tempolimit auf Autobahnen
- Zufahrtbeschränkungen (autofreie Innenstädte, Umweltzonen für Nullmissionsfahrzeuge)
- Umsetzungszeit: unmittelbar möglich, aber zeitliche Koordination der ordnungsrechtlichen „Push“-Faktoren mit Angebotsseitigen „Pull“-Maßnahmen wichtig, um Akzeptanz zu sichern

Organisation: Nahtlose Verknüpfung verschiedener Verkehrsmittel

- Car-/Bikesharing und Ridepooling mit ÖV vernetzen durch Reform des Personenbeförderungsgesetzes,
- Integration von Angeboten in ÖV-Tarife, verbundübergreifende Tickets,
- einheitliche Datenschnittstellen und anbieterübergreifende Buchungssapps sowie Mobilstationen als räumliche Verknüpfungspunkte,
- kombinierter Güterverkehr (automatisierte Verladung, digitale Steuerung)
- Mobilität neu organisieren: Mobilitätsroutinen im Alltagsverkehr können durch Mobilitätsmanagement verändert werden, indem Beschäftigte, Schülerinnen und Schüler, Neubürgerinnen und Neubürger und andere Zielgruppen direkt adressiert und integrierte Lösungen aus Motivation, Anreizen und adäquaten Mobilitätsangeboten geschaffen werden
- Umsetzungszeit: ca. 5 Jahre, wichtig ist dabei koordiniertes Vorgehen, sonst „Flickenteppich“, daher sofortiger Planungsbeginn erforderlich

Preisreize

- Parkraumbewirtschaftung ausweiten und deutlich verteuern, City-Maut, Kfz-Steuerniveau erhöhen, starke Erhöhung der Lkw-Maut, deutliche Reduzierung der Trassenpreise im Schienenverkehr, Reduzierung von Ticketpreisen
- Abbau aller nicht-nachhaltigen Subventionen: Kraftstoffe (Diesel, Flugbenzin), Infrastruktur (Straßen, Flughäfen), Fahrzeuge (Dienstwagen), Pendlerpauschale
- Umsetzungszeit: unmittelbar, aber koordiniert mit Pull-Faktoren, um Akzeptanz zu steigern und soziale Verträglichkeit sicherzustellen

Must-Dos für die Energiewende im Personen- und Güterverkehr: neue, effizientere Antriebe und THG-neutrale Kraftstoffe

Selbst bei einer umfassenden Verlagerung auf den Umweltverbund und den Schienengüterverkehr verbleiben bis 2035 relevante Verkehrsanteile im MIV und im Straßengüterverkehr – je Szenario mindestens die Hälfte des Verkehrs. Daher ist eine massive Flottenwende hin zu erneuerbaren Antrieben und effizienteren Fahrzeugen notwendig. Diese können allerdings nicht die alleinige Lösung sein, da selbst Elektrofahrzeuge noch deutlich mehr Energie benötigen als der öffentliche Verkehr oder der Schienengüterverkehr. Klimaneutralität ist ohne eine tiefgreifende Verkehrswende dann nur mit zusätzlichen bis 2035 bereitzustellenden Mengen erneuerbaren Stroms erreichbar, was die Dekarbonisierung anderer Sektoren bis 2035 noch weiter erschweren würde.

Um große Teile der Pkw-Flotte bis 2035 zu elektrifizieren, sollten deutlich vor 2035 keine Neuzulassungen von Verbrennungsfahrzeugen mehr erlaubt sein (Climact und NewClimate Institute 2020). Beim Ausstiegsdatum ist zu berücksichtigen, dass der Großteil der Pkw-Flotte bis 2035 aus Elektrofahrzeugen bestehen muss und Pkw mit Verbrennungsmotor ab Zulassung durchschnittlich gut 10 Jahre in Betrieb bleiben. Bei gleichzeitiger Verkleinerung der Pkw-Flotte entspricht der Aufbau der Elektrofahrzeugflotte im Schnitt ca. 2 Mio. neuen Elektroautos pro Jahr. Parallel ist ein schneller Ausbau der Ladeinfrastruktur in Deutschland sowie grenzüberschreitend in europaweite Kooperation nötig. Hierfür müssen die Produktionskapazitäten für E-Fahrzeuge und Stromspeicher in Deutschland stark ausgeweitet werden. Im Güterverkehr können leichte Nutzfahrzeuge ebenfalls weitgehend elektrifiziert werden. Für eine Elektrifizierung von Lkw ist der Ausbau eines Oberleitungssystems auf Autobahnen sinnvoll – bis 2035 auf 8.000 Autobahnkilometer. Das entspricht durchschnittlich 550 km Oberleitungsbau pro Jahr.

Um konventionelle Fahrzeuge effizienter zu machen, ist eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs konventioneller Antriebe um 30 Prozent durch Reduzierung von Fahrzeuggewicht und Motorisierung notwendig.

Parallel dazu wird ein Phase-out verbleibender fossiler Kraftstoffe umgesetzt. Erneuerbar erzeugte synthetische Kraftstoffe für Bestandsfahrzeuge werden in einer schrittweise steigenden Quote beigemischt. So wird ein Ausstieg aus fossilem Benzin und Diesel bis 2035 erreicht.

Diese Maßnahme ist jedoch aufgrund der deutlich geringeren Effizienz synthetischer Kraftstoffe nur für den Übergang zu alternativen Antrieben sinnvoll und wird flankiert durch Regulierung und stärkere Bepreisung, um Lock-In auf Verbrennungsmotoren zu verhindern.

Instrumentenmix für die Energiewende im Personen- und Güterverkehr

- EU-Flottenemissionslimits für Pkw weiterentwickeln: Anreize zur Gewichtsreduktion, realistische Anrechnung Elektromobilität – nicht als Nullemissionsfahrzeuge, sondern realverbrauchsorientierte Life-Cycle-Emissionen; die explizite Förderung von E-Mobilität sollte über andere Instrumente erfolgen, um die Zielerreichung von Flottenemissionslimits nicht zu konterkarieren.
- Lkw-Effizienzstandards einführen
- Kfz-Steuer als CO₂-orientiertes Bonus-Malus-System mit starker Spreizung zwischen Nullemissionsfahrzeugen und hochemittierenden Verbrennern (Beispiel: Frankreich), Ausgestaltung als Zulassungsteuer kann subjektiv den Preisanreiz verstärken (Beispiel: Norwegen)
- höhere Energiesteuer für fossile Kraftstoffe entsprechend signifikant höherem CO₂-Preis
- Dienstfahrzeug-Besteuerung nach CO₂-Emissionen
- Quoten für Neuzulassungen alternativer Antriebe, Phase-out Verbrennungsfahrzeuge, um Richtungssicherheit für Antriebswende zu gewährleisten
- Beimischungsquote für erneuerbar erzeugte Kraftstoffe, Phase-out fossiler Kraftstoffe

8 Gebäude

Die THG-Emissionen im Gebäudesektor sind zwischen 1990 und 2014 um rund 40 Prozent gesunken. **Seitdem ist jedoch kein abnehmender Trend mehr erkennbar.**

Für das Erreichen von THG-Neutralität bis 2035 ist im Gebäudesektor eine **deutliche Reduktion des Wärmebedarfs v. a. im Gebäudebestand** sowie ein schneller und **umfassender Wechsel zu Heiztechnologien auf Basis erneuerbarer Energien** nötig.

Die **energetische Sanierungsrate** für Gebäude, die in den vergangenen Jahren bei ca. 1 Prozent des Bestands pro Jahr lag, ist deutlich zu niedrig für das Erreichen einer zeitnahen oder auch nur mittelfristigen Treibhausgasneutralität. Vor allem, wenn ein treibhausgasneutraler Gebäudebestand ohne einen nur schwer zu deckenden Mehrbedarf an erneuerbaren Energieträgern bis 2035 erreicht werden soll, muss die jährliche Sanierungsrate auf eine **beispiellose Höhe von etwa 4 Prozent** gebracht werden.

Bei ungenügender Sanierungsrate oder -tiefe müsste ein großer Teil der aktuellen fossilen Bedarfe zukünftig durch **synthetische Energieträger** gedeckt werden, deren ausreichende Verfügbarkeit bis 2035 als unsicher angesehen werden muss und deren Erzeugung mit **erheblichen Umwandlungsverlusten** und für die Bewohner mit starken Energiepreiserhöhungen verbunden wäre.

Eine **verbesserte Gebäudeenergieeffizienz erlaubt auch eine energieeffiziente und wirtschaftliche Elektrifizierung der Wärmebereitstellung über Wärmepumpen**. Der Anteil von Wärmepumpen an allen Heizsystemen müsste Szenarien zufolge in einem klimaneutralen Energiesystem auf etwa 60 bis 80 Prozent ansteigen. Vor allem in urbanen Räumen sollte zudem die **auf erneuerbare Energien umzustellende Nah- und Fernwärme** ausgebaut werden. Schließlich kann auch die **Solarthermie** einen relevanten Beitrag von etwa 10 Prozent zur klimaneutralen Wärmeversorgung beitragen.

Zusätzlich wird im Gebäudebereich auch **Suffizienz** einen wichtigen Beitrag für das Erreichen von Klimaneutralität leisten müssen. Es gilt, den Trend des wachsenden Wohnraumbedarfs pro Kopf durch intelligente und flexible Nutzungsformen zu stoppen bzw. umzukehren.

Für den Gebäudebereich ist für das Erreichen von Treibhausgasneutralität ein **Policy-Mix aus Anreizen, Regulation sowie Information und Beratung** notwendig. Unter anderem sollten **anlassbezogene energetische Sanierungen** zur Verpflichtung gemacht werden, etwa bei Vererbung oder Verkauf und es sollte ein verbindlicher schrittweiser Abbau (**phase-out**) **fossiler Heizsysteme** beschlossen werden und finanzielle Anreize erhöht sowie an Zielgruppen angepasst werden, um Sanierungen wirtschaftlich attraktiv zu machen. Eine Verursacher- und **sozial gerechte, wirkungsvolle CO₂-Bepreisung** kann dabei eine wichtige unterstützende Rolle spielen. Um die energetische Sanierungsrate deutlich zu erhöhen, bedarf es auch einer **Ausbildungs- und Qualifizierungsoffensive im Handwerk**. Die Digitalisierung kann durch serielles, vorgefertigtes Sanieren die notwendige Bestandssanierung beschleunigen und deren Qualität sichern.

Sektorbeschreibung

Der Gebäudesektor war 2018 für 15 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich (UBA 2020b). Am Endenergieverbrauch haben Wohn- und Nichtwohngebäude sogar einen Anteil von rund 40 Prozent, mit einem Verbrauch von gut 1000 TWh im Jahr 2018. Rund zwei Drittel entfallen dabei auf den Wohn- und ein Drittel auf den Nichtwohngebäudebestand (AG Energiebilanzen 2020a).

Bezogen auf die Energieanwendungen wird deutlich, dass die Herausforderung im Gebäudebestand vor allem in der Dekarbonisierung des Wärmebedarfs liegt. Rund 74 Prozent der Endenergie entfallen auf die Bereitstellung von Raum-/Prozesswärme und Warmwasser (AG Energiebilanzen 2019). In diesem Kapitel wird folglich auch auf die Dekarbonisierung des Wärmebedarfs fokussiert.

Der Gebäudesektor hat seit 1990 durchaus Erfolge zu verzeichnen. So sind die CO₂-Emissionen im Gebäudesektor zwischen 1990 und 2019 um rund 40 Prozent gesunken (UBA 2020b). Bis 2030 sollen sie laut Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung um 66 bis 67 Prozent sinken. Dem Gebäudesektor wird damit das ambitioniertere CO₂-Minderungsziel aller Sektoren beigemessen (BMUB 2016). Insgesamt flachte sich der Reduktionspfad in der letzten Dekade jedoch ab. So blieb der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser seit 2010 beispielsweise weitgehend konstant (dena 2019). Ebenso verbleibt die energetische Sanierungsrate bei ca. 1 Prozent pro Jahr und ist damit deutlich unter dem politischen Ziel der Bundesregierung von 2 Prozent pro Jahr (Cischinsky & Diefenbach 2018; Diefenbach et al. 2010). Auch das Investitionsvolumen in energetische Sanierungsmaßnahmen nahm sowohl absolut als auch relativ zum gesamten Bestandsmarktvolumen ab (BBSR 2016)⁶⁰. Der Ausbau erneuerbarer Heizungstechnologien hatte insbesondere in den Boom-Jahren hoher Ölpreise gewisse Fortschritte gemacht. Dennoch lagen bei den Absatzzahlen für Wärmeerzeuger im Jahr 2018 die fossilen Heiztechnologien mit 78 Prozent deutlich vor den erneuerbaren (dena 2019). Im Jahr 2019 wurden nach wie vor rund 75 Prozent der Wohnungen mit den fossilen Energieträgern Erdgas oder Öl beheizt (BDEW 2020, S.23), siehe hierzu auch Abbildung 8-1.

Hinsichtlich der Beheizungsstruktur fand in den letzten Jahren ein Wechsel von Heizöl zu Erdgas und von Niedertemperatur- zu Brennwertkesseln statt. Dadurch konnten in begrenztem Umfang CO₂-Emissionen reduziert werden. Dennoch nutzten wie in Abbildung 8-2 illustriert sowohl im Jahr 1999 als auch – fast unverändert – im Jahr 2018 mit knapp 80 Prozent die Mehrzahl aller neu installierten Wärmeerzeugungsanlagen noch fossile Energien (dena 2019). Es ist offensichtlich, dass eine Fortschreibung dieses Trends nicht näherungsweise in den Bereich der Klimaneutralität führen wird.

⁶⁰ Insgesamt sank das energetische Sanierungsvolumen zwischen 2010 und 2014 von 38,8 Mrd. Euro auf 32,5 Mrd. Euro. Der absolute Rückgang dokumentiert sich auch in einem relativen Rückgang. Der Anteil am Bestandsmarktvolumen sinkt von 36 Prozent auf 28 Prozent. Der Rückgang basiert zum einen auf rückläufigen Zahlen im Segment der meist selbstgenutzten Ein-/Zweifamilienhäuser, zum anderen auf rückläufigen Sanierungen der Gebäudehülle/Außenfassade. Energetische Einzelmaßnahmen gewinnen an Bedeutung (12,2 Prozent (2010); 14,2 Prozent (2014)), während komplexere Teil- oder Vollmodernisierungen an Bedeutung verlieren.

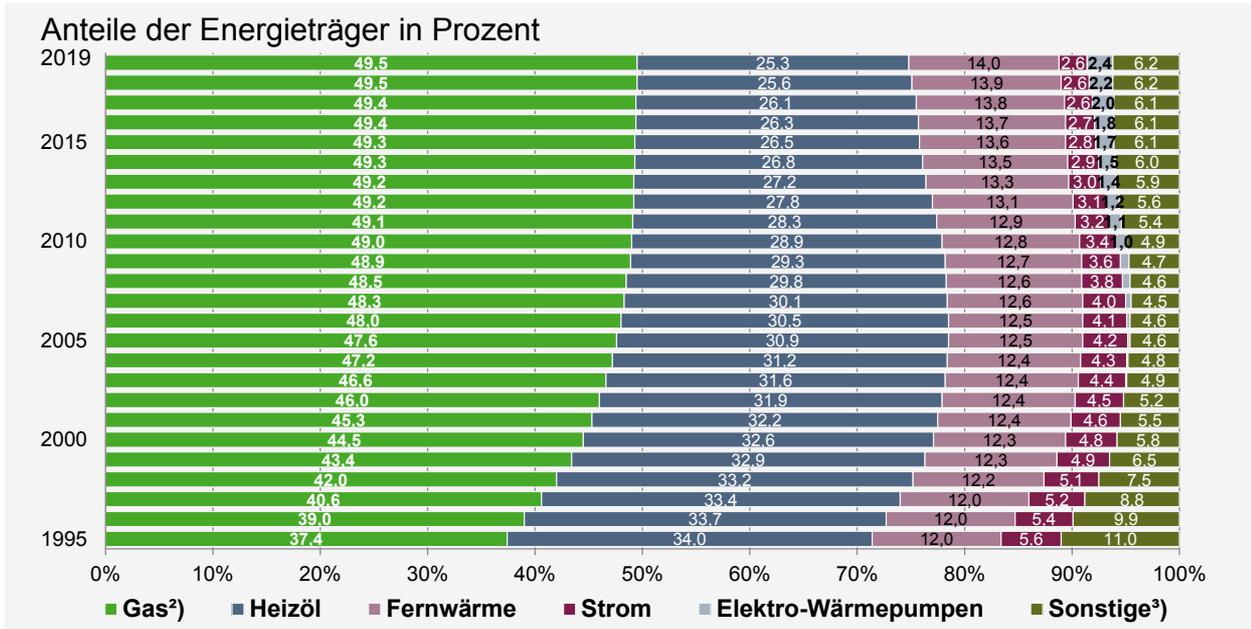


Abbildung 8-1 Beheizungsstruktur im deutschen Wohnungsbestand¹⁾⁶¹

Quelle: BDEW (2020).

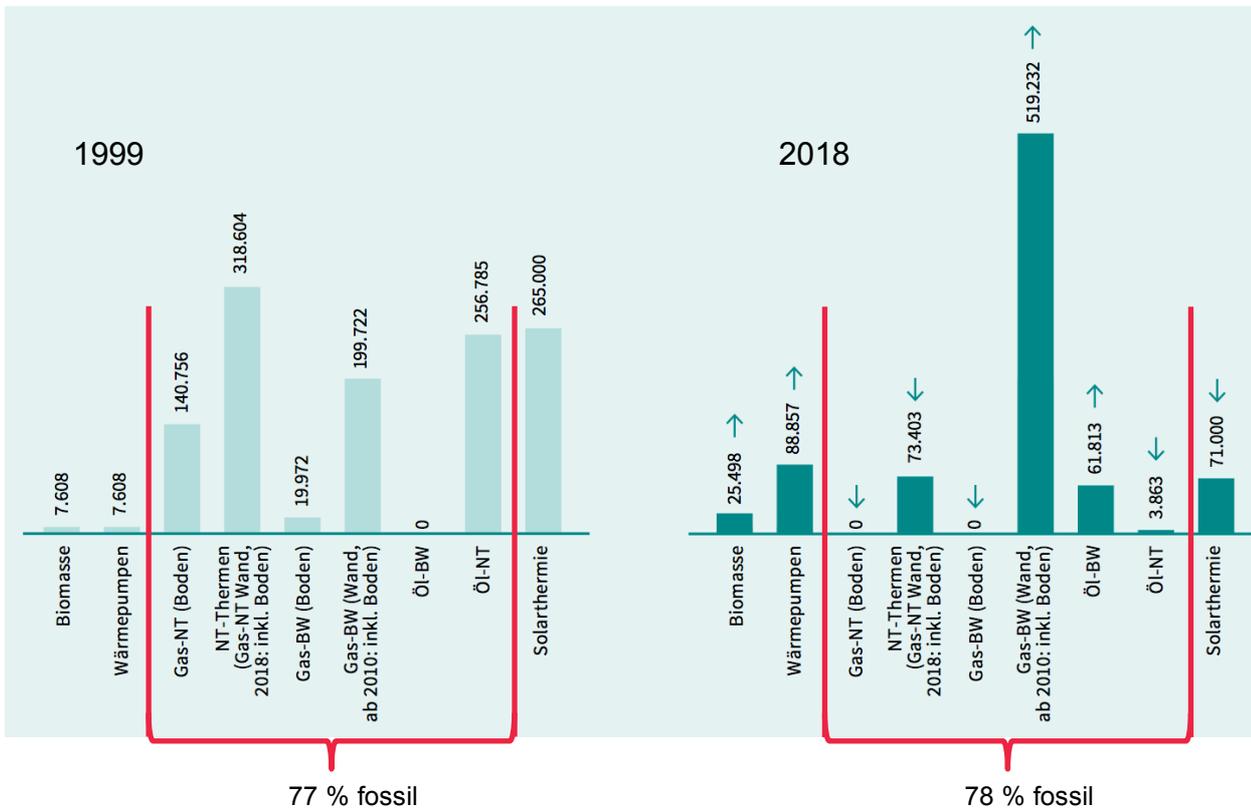


Abbildung 8-2 Anteil fossil befeuerter Heizungen im Absatzmarkt 2018 im Vergleich zu 1999

Quelle: dena (2019), mit eigenen Ergänzungen.

⁶¹ 1) Anzahl der Wohnungen in Gebäuden mit Wohnraum; Heizung vorhanden; 2) einschließlich Bioerdgas und Flüssiggas; 3) Holz, Holzpellets, sonstige Biomasse, Koks/Kohle, sonstige Heizenergie

Im Jahr 2019 wurden 71,1 Prozent des Wärmeverbrauchs in Gebäuden über Erdgas und Öl bereitgestellt und nur 16,3 Prozent über erneuerbare Energien, weitere 9,7 Prozent über Fernwärme (BDEW 2020). Über den gesamten Wärmesektor betrachtet (Haushalte, GHD und Industrie, also inklusive industrieller Prozesswärme⁶²) sieht die erneuerbare Bilanz noch schlechter aus: Hier ist der Ausbau erneuerbarer Wärme seit 2012 fast vollständig zum Erliegen gekommen, der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergiebedarf im Bereich Wärme (sowohl für Gebäude als auch für industrielle Prozesswärme) stagniert seit acht Jahren bei rund 14 Prozent (UBA 2020c), siehe auch Abbildung 8-3. Bei ungenügender Sanierungsrate und -tiefe müsste ein wesentlicher Teil der aktuellen fossilen Bedarfe zukünftig durch synthetische Kraftstoffe abgedeckt werden, deren Erzeugung wiederum mit erheblichen Umwandlungsverlusten verbunden ist. Eine Deckung des heutigen Energiebedarfs der Gebäude durch fast ausschließlich synthetische Energieträger erscheint bis 2035 nicht realisierbar. Deshalb ist sowohl eine beispiellos große Anstrengung bei energetischen Sanierungen als auch ein massiver Austausch von fossilen Heizungen vor allem gegen Wärmepumpen notwendig.

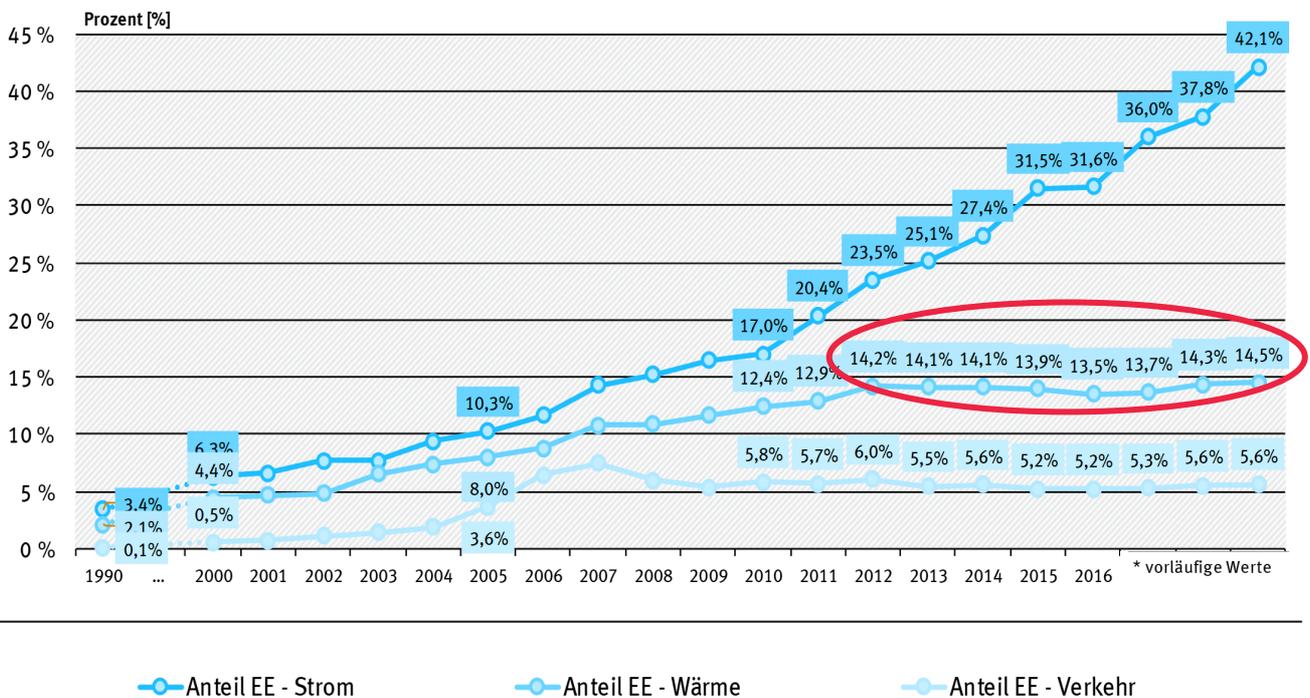


Abbildung 8-3 Stagnation des Anteils erneuerbarer Wärme: Anteile erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch und an den Endenergieverbräuchen für Wärme und Kälte sowie Verkehr

Quelle: UBA (2020d).

⁶² In der Prozesswärme im Industriesektor ist der Anteil erneuerbarer Energie dementsprechend nochmals deutlich geringer als im Gesamtdurchschnitt.

Must-dos für eine mittelfristige Dekarbonisierung

Für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors gilt es drei zentrale Leitfragen zu beantworten. Die Fragen sind dabei nicht isoliert voneinander, sondern integrativ zu betrachten.

- Wie viel Wohnfläche ist genug?
- Wie energieeffizient sollten die Gebäude sein?
- Wie sollten die Gebäude beheizt werden?

Die Pro-Kopf-Wohnfläche ist in Deutschland in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich angestiegen (siehe Abbildung 8-4), von rund 19 m² Anfang der 1960er Jahre auf 35 m² im Jahr 1990 auf knapp 47 m² im Jahr 2018. Auch die in dieser Studie betrachteten Energieszenarien gehen – bis auf das GreenSupreme-Szenario – von einem weiteren Anstieg der Pro-Kopf-Wohnfläche aus. Dies bedeutet nicht nur eine Zunahme des Flächen- und Ressourcenverbrauchs, sondern auch der zu beheizenden Wohnfläche. Dieser Zuwachs ist unter anderem wegen des Klimaschutzes problematisch. Ihn zu begrenzen und im Idealfall umzukehren wäre ein starker Hebel zur Emissionsminderung. Dies gilt analog auch für den Flächenbedarf in Nichtwohngebäuden.

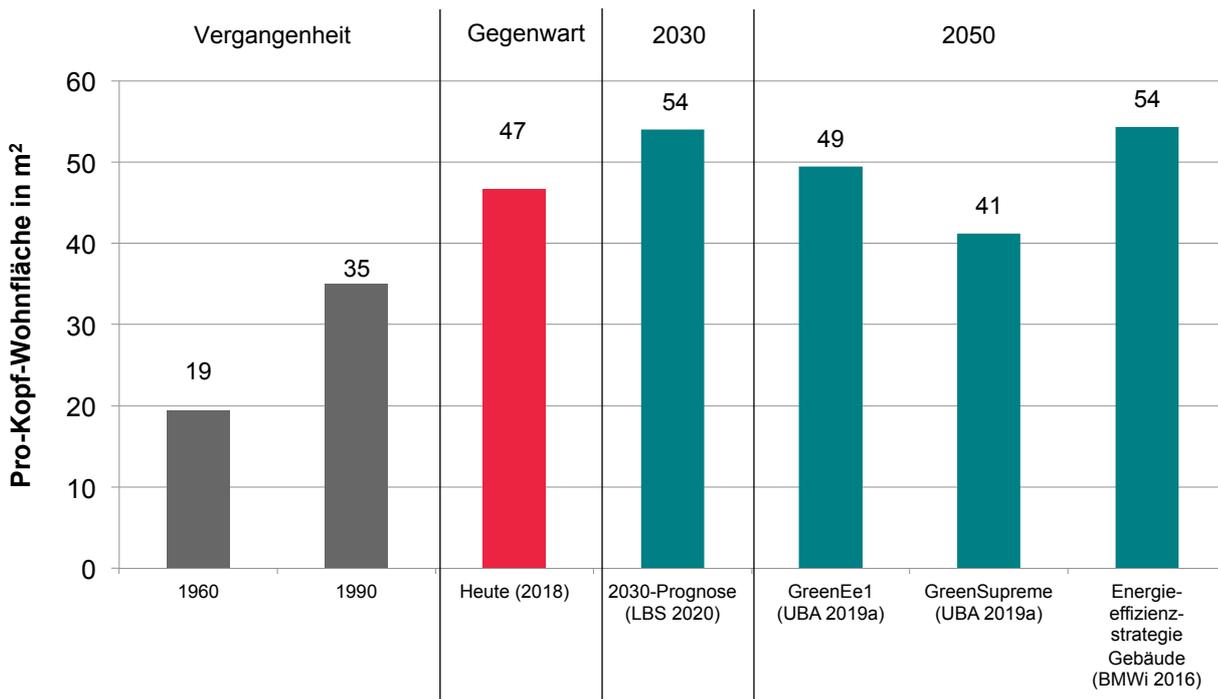


Abbildung 8-4 Spezifische Wohnflächenentwicklung pro Kopf, 1960 bis 2050

Quellen: Basierend auf Destatis (2020b) und den zitierten Szenariostudien.

Eine Schlüsselrolle hin zu einem klimaneutralen Gebäudebestand kommt der Energieeffizienz zu. Wohn- wie Nichtwohngebäude sind in den letzten Jahren deutlich energieeffizienter geworden. Der spezifische Endenergieverbrauch für Raumwärme im Wohngebäudebestand sank beispielsweise zwischen 2008 und 2017 von 151 auf 133 kWh/m²*a (BMWi 2019c). Dennoch gilt es, die in den vergangenen Jahren beobachtete energetische Sanierungsrate von ca. 1 Prozent pro Jahr in den nächsten

Jahren deutlich zu erhöhen. Klimaschutzszenarien, die bis 2050 nahezu Klimaneutralität erreichen, weisen mittlere jährliche Sanierungsraten von 1,9 bis 2,8 Prozent pro Jahr auf. Weiterhin gilt es, die Sanierungstiefe, das heißt den durch die Sanierung erreichten Effizienzstandard weiter zu erhöhen. Optimal wären der Passivhausstandard⁶³ oder der KfW-Effizienzhaus-55-Standard⁶⁴, die deutlich besser sind als der heute in der Energieeinsparverordnung (EnEV) vorgeschriebene Mindeststandard.

In den hier betrachteten Energieszenarien sind zwei zentrale Trends erkennbar (siehe Abbildung 8-5): Zum einen erlaubt die verbesserte Gebäudeenergieeffizienz eine energieeffiziente und wirtschaftliche Elektrifizierung der Beheizung durch Wärmepumpen. Der Wärmepumpen-Anteil steigt im 95 %-Pfad (BDI 2018) auf knapp 60 Prozent und in den UBA-Szenarien GreenEe1 und GreenSupreme auf knapp 80 Prozent. Gleichzeitig wird in den Szenarien – vor allem in urbanen Räumen – die Nah- und Fernwärme weiter ausgebaut. Voraussetzung dafür ist jedoch der parallele Umbau der leitungsgebundenen fossil erzeugten Wärme zu „grüner“ Fern- bzw. Nahwärme (s. Infobox „Konversion zur grünen Nah- und Fernwärme“). Im 95 %-Pfad ist außerdem die Solarthermie relevant (ca. 10 Prozent) zur klimaneutralen Wärmeversorgung.

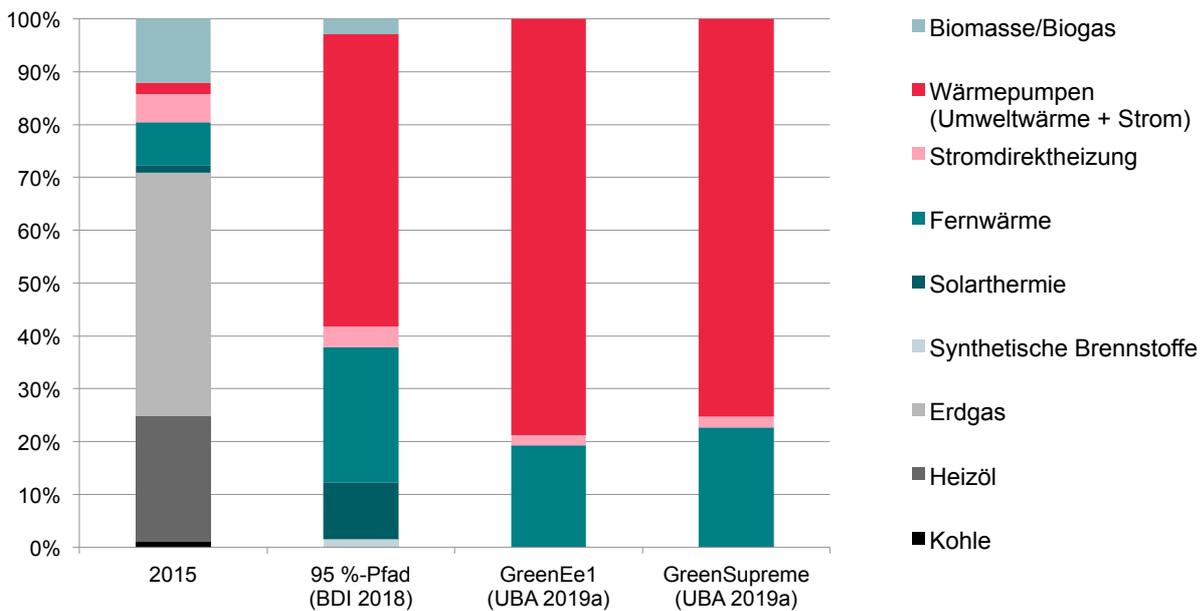


Abbildung 8-5 Beheizungsstruktur im Jahr 2050 in drei Energieszenarien mit nahezu Klimaneutralität

Quelle: Basierend auf den zitierten Szenariostudien.

⁶³ Der Passivhausstandard definiert sich über einen maximalen Nutzenergiebedarf von 15 kWh pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr.

⁶⁴ Die KfW-Effizienzhaus-Standards für die *Sanierung* liegen derzeit (Stand Aug. 2020) zwischen KfW 55 und KfW 115. Das bedeutet, dass der korrespondierende Primärenergiebedarf bei maximal 55 bis 115 Prozent und der Transmissionswärmeverlust (Wärmeverlust über die Gebäudehülle) bei maximal 70 bis 130 Prozent liegen darf, jeweils bezogen auf das Referenzgebäude der EnEV. Details siehe www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/Energieeffizient-Sanieren/Das-KfW-Effizienzhaus

Zusätzliche Maßnahmen für das frühere Erreichen der Treibhausgasneutralität

Bereits das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2050 ist unter Berücksichtigung der vergleichsweise geringen energetischen Sanierungsraten, die in den letzten Jahrzehnten trotz der Einführung verschiedener Anreizsysteme kaum gestiegen sind, sehr anspruchsvoll. Um den Gebäudebestand bis 2035 zu dekarbonisieren, sind entsprechend ganz erhebliche zusätzliche Anstrengungen notwendig. Wie schwierig dies wird, hängt unter anderem von der zu beheizenden Pro-Kopf-Wohnfläche ab. Zentraler Faktor ist aufgrund der Dominanz des Gebäudebestandes für den Heizenergiebedarf in Deutschland aber die energetische Sanierungsrate, die im Mittel von heute knapp 1 Prozent auf rund 4 Prozent pro Jahr gesteigert werden müsste⁶⁵. In der Praxis bedeutet dies, dass jedes Gelegenheitsfenster genutzt werden muss, um zielkonforme energetische Sanierungsmaßnahmen durchzuführen. Zielkonform bedeutet, nach Möglichkeit den Passivhausstandard oder mindestens alternativ den KfW55-Standard einzuhalten (s. o.). Angesichts der langen Lebensdauer von Gebäuden können nicht zielkonforme energetische Sanierungsmaßnahmen am Gebäude sehr leicht kontraproduktiv wirken, da ein späteres Anheben von einem mittelmäßigen Standard auf den notwendigen „nahezu klimaneutralen“ Standard in der Regel nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem finanziellem Aufwand möglich ist. Soll oder kann eine Sanierung nicht sofort und vollständig erfolgen, sind daher kluge und vorausschauende Sanierungsfahrpläne notwendig. Dort, wo Neubau notwendig ist, sollte dieser zwingend als Passivhaus oder im KfW40- bzw. KfW40-Plus-Standard⁶⁶ erfolgen.

Die Bundesregierung hat sich im Klimaschutzprogramm auf das Verbot der Installation von Ölheizungen ab 2026 verständigt (Bundesregierung 2019). Wird eine gegenüber den Zielen der Bundesregierung deutlich schnellere Reduktion der Treibhausgasemissionen angestrebt, muss dieses Verbot schnellstmöglich – und flankiert mit entsprechenden Unterstützungsmaßnahmen für die Gebäudebesitzerinnen und -besitzer – vorgezogen und auf alle fossilen Heizungskessel ausgeweitet werden, das heißt auch auf den Energieträger Erdgas. Übergangsweise könnten Hybridlösungen (Erdgaskessel mit Solarunterstützung oder Wärmepumpen mit erdgasbetriebenen Spitzenlastkesseln) erlaubt sein, um sinnvolle Beheizungsstrategien auch im (noch) nicht ambitionierter sanierten Bestand zu ermöglichen. Parallel dazu wären die Fertigungskapazitäten für alternative Heizungstechnologien, vor allem elektrische Wärmepumpen, deutlich auszuweiten und eine breite Ausbildungsoffensive für das Handwerk notwendig.

⁶⁵ Eigene Szenarien des Wuppertal Instituts für eine klimaneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2050 weisen jährliche Sanierungsraten von rund 2 Prozent auf, so dass in den verbleibenden 30 Jahren bis zum Zieljahr rund 60 Prozent der Bestandsgebäude saniert werden würden. Will man bis 2035, also innerhalb der halben Zeit, ebenfalls 60 Prozent saniert haben, muss die Sanierungsrate auf ca. 4 Prozent verdoppelt werden. Noch ambitioniertere Szenarien wie beispielsweise das von German Zero e.V. fordern eine schrittweise Erhöhung auf 5 Prozent pro Jahr bis 2027 (German Zero 2020).

⁶⁶ Die KfW-Effizienzhaus-Standards für den *Neubau* liegen derzeit (Stand Aug. 2020) zwischen KfW 40 und KfW 55. Das bedeutet, dass der korrespondierende Primärenergiebedarf bei maximal 40 bzw. 55 Prozent und der Transmissionswärmeverlust (Wärmeverlust über die Gebäudehülle) bei maximal 55 bzw. 70 Prozent liegen darf, jeweils bezogen auf das Referenzgebäude der Energieeinsparverordnung (EnEV). Plus-Standard bedeutet zusätzlich eine stromerzeugende Anlage (meist eine Photovoltaik-Anlage) und eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Das-KfW-Effizienzhaus

Aufgrund der heute noch unzureichend abschätzbaren Marktdynamiken in Bezug auf die Entwicklung synthetischer Brennstoffmärkte (etwa synthetisches, auf erneuerbaren Energien basierendes Gas) bleibt zu diskutieren, ob und in welcher Form Abweichungen von dem strikten Verbot sinnvoll sind, beispielsweise dann, wenn verbindlich sichergestellt werden kann, dass die Anlagen spätestens bis zum Jahr 2035 vollständig auf klimaneutrale Brennstoffe umgestellt werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bereitstellung synthetischer Brennstoffe mit einem sehr hohen Strombedarf und mit – im Vergleich zu Erdgas – voraussichtlich erheblich höheren Energiekosten verbunden sein wird und ihr Einsatz im Gebäudesektor daher nicht flächendeckend erfolgen sollte (Agora Verkehrswende et al. 2018, IEE 2020). Um eine Kilowattstunde Wärme über einen Brennwertkessel mit synthetischem (auf Strom basierendem) Gas bereitzustellen, ist im Vergleich zu einer Wärmepumpe rund die sechsfache Strommenge erforderlich. Dementsprechend wäre auch ein sechsfacher Ausbau der vorgelagerten Stromerzeugungskapazitäten erforderlich.⁶⁷ Angesichts dessen wird deutlich, dass in dem durch einen hohen Energiebedarf gekennzeichneten Gebäudesektor synthetische Gase für klimaneutrale Heizsysteme bis 2035 nur eine untergeordnete Rolle spielen können. Stattdessen muss aufgrund der langen Anlagenlebensdauern der Einbau neuer fossiler Heizungen bereits in wenigen Jahren beendet werden. Der Anteil der Wärmepumpen am Heizungsbestand muss bis 2035 von heute 2,4 Prozent auf mindestens 60 Prozent steigen. Dafür sind großskalige Heizungsaustauschprogramme notwendig.

Instrumente

Die für eine klimaneutrale Wärmeversorgung von Gebäuden notwendige sehr starke Steigerung der energetischen Sanierungsrate und Sanierungstiefe kann nur durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen realisiert werden. Insbesondere die folgenden Handlungsfelder erscheinen vielversprechend:

- Strategien zur Verringerung des Bedarfs an Wohnraum und Nichtwohngebäuden durch intelligente und flexible Nutzung,
- Weiterentwicklung von Anreizsystemen zum Fördern *und* Fordern von energetischen Sanierungsmaßnahmen,
- Schrittweise Verteuerung fossiler Energieträger durch die Fortentwicklung des CO₂-Preisregimes (Wuppertal Institut 2019) für fossile Energieträger (das für Brenn- und Kraftstoffe außerhalb des Europäischen Emissionshandelssystems von der Bundesregierung mit Beginn des Jahres 2021 eingeführt wird), um deren ökologische Schadenskosten sichtbar zu machen und für eine zunehmende Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen und erneuerbaren Heizungstechnologien zu sorgen.
- Förderung von Innovationen in der Bauwirtschaft, zum Beispiel die industrielle Vorfertigung von Bauelementen für die Sanierung und den digitalen

⁶⁷ Annahmen zu Wirkungsgradketten (s. auch Agora Verkehrswende et al. 2018) für Wärmebereitstellung:

a) über Wärmepumpe:

95 Prozent (Stromnetz) x 300 Prozent (Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe) = 285 Prozent

b) über Synthesegas im Brennwertkessel:

95 Prozent (Stromnetz) x 70 Prozent (Elektrolyse) x 80 Prozent (Methanisierung) x 99 Prozent (Gastransport) x

95 Prozent (Brennwertkessel) = 50 Prozent

Scan der zu sanierenden Gebäude nach dem niederländischem Vorbild (Energiesprong), die eine schnellere und besser qualitätsgesicherte sowie kostengünstigere Sanierung ermöglichen,

- Ganzheitliche Sanierungssteuerung und Monitoring sowie Vollzugsüberwachung durch staatlicherseits legitimierte Stellen,
- Unterstützung beim Ausbau von Produktionskapazitäten für effiziente, klimaverträgliche Heizungstechnologien
- Verbesserte Angebote zur Überwindung nicht-ökonomischer Hemmnisse im Bereich der Gebäudesanierung, wie etwa One-Stop-Shop-Ansätze
- Qualifizierungs-, Digitalisierungs- und Kommunikationsoffensiven.

Konkret werden folgende Maßnahmen bzw. Instrumente als zielführend angesehen:

- Alternative Wohn- und Nutzungskonzepte, beispielsweise Mehrgenerationen-Wohnungen, generationenübergreifender Tausch von Wohnungen und Konzepte zur flexiblen Nutzung von Wohnräumen und Gewerbeflächen, sollten auf kommunaler Ebene gefördert werden, um den Wohnflächenanstieg zu stoppen. Gleichzeitig sollte der „Landflucht“ durch eine bessere Daseinsvorsorge im ländlichen Raum begegnet werden, um den Flächenversiegelungsdruck durch Neubau im urbanen Raum zu mindern (Stichworte graue Energie bei der Errichtung neuer Gebäude und Klimawandelanpassung durch Entsiegelung von Flächen statt weiterer Versiegelung). Zudem könnten bei verringerter Neubautätigkeit die dringend benötigten Baukapazitäten vom Neubau in die energetische Bestandssanierung gelenkt werden.
- Nutzerbedingte Einsparpotenziale sollten realisiert werden durch die Förderung energiesparender Ansätze nutzerzentrierter Betriebsführung in Wohn- und Nichtwohngebäuden.
- Um die Sanierungs- und Wärmeversorgungsmaßnahmen anzustoßen und zu leiten, sollten gebäude-individuelle Sanierungsfahrpläne und Energieberatungen verpflichtend werden. Zudem gewährleisten sie, dass die Maßnahmen zielkonform sind und Lock-ins vermieden werden.
- Auf Ebene von Quartieren und Kommunen würden sie durch Wärmeverorgungspläne ergänzt.
- Die Förderprogramme für Sanierung und Heizungssysteme mit erneuerbaren Energien, wie das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm, sind aufzustocken. Vor allem sollte – angesichts der anhaltend niedrigen Zinsen auf dem Kapitalmarkt – ein Paradigmenwechsel weg von Darlehen-, hin zur Zuschussfinanzierung vollzogen werden. Damit soll die Gebäudesanierung inklusive der Umstellung der Heizung wirtschaftlich attraktiv werden. Zugleich sollten durch eine stärker industrialisierte Bauweise (s. u.) die Kosten gesenkt werden.
- Zielgruppenangepasste One-Stop-Shops, etwa durch kommunale Energieagenturen, könnten den Sanierungspfad von Information, Beratung, individuellem Sanierungsfahrplan und Förderverfahren bis zu den Sanierungsprozessen selbst beschleunigen und damit die Einstiegshürde für eine ambitionierte energetische Sanierung senken. Sie oder andere Anbieter könnten gleiche oder ähnliche Gebäude in einem Quartier bündeln und gemeinsame Ausschreibungen für die Sanierung organisieren.

- Unterstützt und wirtschaftlich ermöglicht durch die stärkeren finanziellen Anreize sollte parallel auch über die Einführung einer anlassbezogenen Sanierungsverpflichtung – beispielsweise im Vererbungs- oder Verkaufsfall – diskutiert werden (Gaßner & Neusüß 2011; Pehnt et al. 2015).
- Ein verbindlicher politischer Fahrplan für den Ausstieg aus fossilen Heizsystemen sollte erstellt und frühzeitig kommuniziert werden. Die erneuerbaren Wärmequellen Umgebungswärme (plus Wärmepumpe), Abwärme und Geothermie, Solarenergie sowie grüne Nah- und Fernwärme sollten die neuen Standards werden. In engen Grenzen können als weitere Wärmequellen nachhaltig produzierte Biomasse, Biomethan, synthetisches (erneuerbares) Methan und erneuerbarer Wasserstoff zum Einsatz kommen. Dabei sollte der Fokus auf die gesamt-systemisch besonders effiziente Elektrifizierung mit Wärmepumpen, die solare Wärme (Solarthermie) sowie die grüne Nah- und Fernwärme gelegt werden. Unter grüner Nah- und Fernwärme sind die (gemeinschaftliche) Versorgung durch Wärmepumpen, Geothermie & Umweltwärme, Solarenergie, industrielle und kommunale Abwärme, nachhaltige Reststoff-Biomasse in limitierter Menge sowie Kraft-Wärme-Kopplung (mit erneuerbaren Gasen) zu verstehen (s. Infobox „Konversion zur grünen Nah- und Fernwärme“).
- Zudem sollte verstärkt in die Ausbildung und Qualifizierung des Handwerks investiert werden, um zu erwartende Kapazitätsengpässe zu vermeiden.
- Forschung und Markteinführung innovativer Technologien und Verfahren sind zu forcieren (zum Beispiel serielles Sanieren mit digitaler Erfassung, modulare Baukastensysteme mit fabrik-vorgefertigten „PreFab“-Lösungen).
- Damit die Sanierungsmaßnahmen stets zielkonform sind, sollten zur Vermeidung von Lock-ins gebäude-individuelle Sanierungsfahrpläne und Energieberatungen verpflichtend werden.
- Eine verursacher- und sozial gerechte sowie wirkungsvoll ausgestaltete CO₂-Bepreisung kann helfen, bei Mieterinnen und Mietern wie Immobilieneigentümerinnen und -eigentümern Bewusstsein und Handlungsdruck auszulösen. Mit einem Teil der Einnahmen können zudem die nötigen Förder- und Unterstützungsmaßnahmen sowie der Fernwärmeausbau finanziert werden, was bei einer vollständigen Transformation bis 2035 prinzipiell allen zugutekommt und zudem Kosten fossiler Energien in erheblichem Umfang einsparen wird.

Mit Blick auf den kurzen Umsetzungszeitraum sollten auch weitergehende Maßnahmen und eine andere Rollenverteilung ergebnisoffen geprüft werden, wie beispielsweise die vollständige Übernahme der Verantwortung für die Durchführung von Sanierungsmaßnahmen durch den Staat (Koordinierung: Bund und Länder, Umsetzung: Kommunen) bzw. durch von diesem legitimierte Stellen. Auf Basis der gebäudeindividuellen Sanierungsfahrpläne würden diese Stellen mit dem entsprechenden Vorlauf und in Absprache mit dem Gebäudebesitzer bzw. der Gebäudebesitzerin Planung, Vorfinanzierung und Umsetzung der Sanierungsmaßnahmen übernehmen und so sicherstellen, dass eine vollständige Sanierung des Gebäudebestandes möglich ist.

Dies könnte insbesondere auch durch Nachfragebündelung und Ausschreibung für eine Vielzahl von Gebäuden erfolgen.⁶⁸

Damit die oben genannten Maßnahmen auf Verständnis und Akzeptanz stoßen, sollten Kommunikationsstrategien entwickelt werden, die zum einen auf die ökologische Notwendigkeit, zum anderen aber auch auf diese zahlreichen „Co-Benefits“ von hohen energetischen Gebäudestandards verweisen:

- Sie haben positive Effekte auf den Arbeitsmarkt und die regionale Wertschöpfung,
- sie erhöhen den Wohnkomfort (keine Zugluft, keine kalten Wände und Fenster, Schutz vor sommerlicher Überhitzung und Option, mit Erdsonden-Wärmepumpen energieeffizient und „kostenlos“ zu kühlen, permanente Frischluftzufuhr durch Lüftungsanlagen),
- sie sind eine Versicherung gegen steigende Energiepreise,
- sie erhöhen den Wert der Immobilie und
- sie schützen vor Bauschäden.

⁶⁸ Ob und inwiefern solch eine Strategie der Zielerreichung dienlicher ist, bedarf allerdings einer eingehenderen Analyse.

INFO-BOX: Konversion zur grünen Nah- und Fernwärme

Wärmenetze unterstützen die Wärmewende, vor allem durch die Möglichkeit, erneuerbare Energien, Kraft-Wärme-(Kälte-)Kopplung und Wärmespeicher in die Wärmeversorgung zu integrieren (Schüwer 2017). Gleichzeitig bieten sie die Möglichkeit, industrielle oder kommunale Abwärme zu nutzen. Niedertemperatur-Wärmenetze (in der Regel niedriger als 50 °C, teils nur 20 °C) erlauben es, Wärmequellen mit niedrigen Temperaturniveaus zu erschließen, wie beispielsweise Solarthermie, Geothermie, Abwärme und Umweltwärme (Pehnt et al. 2009).

Fernwärmebetreiber und Wärmelieferanten in Kraftwerken und Industrie stehen vor der großen Aufgabe, zunächst von der kohle- und anschließend auch von der erdgasbasierten (Fern-)Wärmeerzeugung – meist auf Basis hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen – auf nicht-fossile Wärmeerzeuger umzustellen. Nur dann ist es zukunftsfähig und sinnvoll, die leitungsgebundene Wärmeversorgung weiter zu erhalten und ggf. auch zu verdichten oder auszubauen⁶⁹. Große Potenziale für eine THG-arme und gleichzeitig ökonomisch attraktive Wärmeversorgung werden in der Nahwärme (im Sinne von Quartiersversorgung) gesehen, wenn dort konsequent die lokalen erneuerbaren Wärmepotenziale entwickelt werden (Wuppertal Institut 2020).

Zwar gibt es bereits bestehende Förderprogramme, die den beschriebenen Aus- und Umbau umfassend und aus systemischer Perspektive unterstützen (zum Beispiel Förderprogramm „Wärmenetze 4.0“, sowie verschiedene KWK-Förderprogramme), dennoch ist eine kurzfristige Ausweitung der Förderprogramme sinnvoll. Hiermit könnten der Ausstieg aus der Kohleverstromung und zugleich der Einstieg in die Nutzung industrieller und kommunaler Abwärmepotenziale flankiert werden. Die Kommunen könnten kurz- bis mittelfristig lokal konjunkturfördernde Investitionen veranlassen.

Konkret werden folgende Maßnahmen beziehungsweise Instrumente als zielführend für die Entwicklung einer zukunftsfähigen leitungsgebundenen Wärmeversorgung angesehen:

- Flächendeckende kommunale Wärme-Masterpläne entwickeln (siehe zum Beispiel Dänemark) und Fernwärmevorranggebiete ausweisen mit der klaren Möglichkeit der perspektivischen Umstellung auf grüne Fernwärme
- Auf Basis dieser Masterpläne: Ausbau weiterer und Umbau der bestehenden Wärmenetze unter anderem über eine Ausweitung bestehender Förderprogramme
- Rechtliche Hürden überwinden für energetische Gebäudesanierungen im Besitz von Wohnungseigentümergeinschaften und für die Realisierung von Quartierswärmeversorgungen
- Schaffung von Anreizen zur energetischen Sanierung auch für fernwärmeversorgte Gebäude, etwa über angepasste Primärenergiefaktoren (energate 2019, Pehnt et al. 2016)
- Einstieg in die Nutzung industrieller und kommunaler Abwärmepotenziale
- Einführung von digitalen LowEx-Abrechnungssystemen für Fernwärme mit rücklaufemperaturabhängigem Bonus-Malus-System (Belohnung von Wärmedämmmaßnahmen und Anreiz zur Nutzung von Flächenheizkörpern)

⁶⁹ Vergleiche auch die drei Szenarien in Abbildung 8-5, die gegenüber heute bis zum Jahr 2050 jeweils mehr als eine Verdopplung des Fernwärmeanteils an der Gebäude-Wärmeversorgung aufzeigen.

9 Fazit

Die in der vorliegenden Studie durchgeführten Analysen legen nahe, dass das **Erreichen von CO₂-Neutralität bis zum Jahr 2035** aus technischer und ökonomischer Sicht **zwar extrem anspruchsvoll** wäre, **grundsätzlich aber möglich** ist. Die Studie zeigt, dass in allen Sektoren Möglichkeiten gegeben sind, eine gegenüber den Zielsetzungen der Bundesregierung deutlich beschleunigte Transformation hin zu Treibhausgasneutralität umzusetzen. Sie zeigt aber auch, welche **zum Teil umfangreichen Hemmnisse** damit verbunden sind, die es für eine beschleunigte Transformation zur Klimaneutralität zu überwinden gilt.

Die skizzierten vielfältigen parallelen Herausforderungen zur Zielerreichung bis 2035 in allen Sektoren stellen jeweils für sich alleine schon große Herausforderungen dar und erfordern beispiellose politische Anstrengungen und ein hohes Maß an Bereitschaft der Unternehmen, den Transformationsprozess mitzugestalten. Angemessene Beiträge zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze, sind aber vor allem ohne eine breite Zustimmung und Teilhabe der Gesellschaft nicht möglich. Hierfür bedarf es insbesondere einer gerechten, auf soziale Aspekte und Teilhabe achtenden Gestaltung der Zielerreichung.

Diese Studie konzentriert sich auf die erforderlichen Veränderungen im Energiesystem und damit auf die Erreichung von CO₂-Neutralität, da die betrachteten Sektoren im Wesentlichen CO₂ emittieren. In Deutschland stammen die für vollständige Treibhausgasneutralität ebenfalls zu vermeidenden Nicht-CO₂-THG-Emissionen (vorwiegend Methan und Lachgas) vor allem aus der Landwirtschaft. Die ebenfalls notwendigen deutlichen Anpassungen unter anderem im Agrarbereich, im Bereich der Entwicklungszusammenarbeit und hinsichtlich der Entwicklungspfade von Technologien zur Erreichung von Negativemissionen jenseits des Jahres 2035 werden in der vorliegenden Studie nicht betrachtet. Die Darstellung dieses größeren Rahmens, müssen weitergehende Arbeiten leisten.

Für zentrale technologische Bausteine wird konkret skizziert, in welchem Ausmaß die **Umsetzungsgeschwindigkeiten zunehmen** müssten, um CO₂-Neutralität bereits im Jahr 2035 zu erreichen. Dies gilt vor allem für den **verstärkten Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien**, den **Umbau der Produktionsprozesse vieler Grundstoffindustrien** oder die **Elektrifizierung großer Teile des Verkehrs und des Gebäudesektors** und eine **beschleunigte energetische Gebäudesanierung**. Die jährlich erforderliche Anzahl an Gebäudesanierungen etwa übersteigt alles bisher Gekannte bei weitem.

Die mit einer derart beschleunigten Umstellung verbundenen **Kosten** lassen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt **nicht mit hinreichender Sicherheit abschätzen**. Die dafür notwendigen Szenarioanalysen, die konsistente Transformationspfade für das Jahr 2035 abbilden und miteinander vergleichen, liegen bisher nicht vor und waren auch nicht Untersuchungsgegenstand dieser Studie. Vorteilhaft wirkt sich sicher aus, dass für den Transformationspfad **zentrale erforderliche Technologien** in den letzten Jahren **deutliche Kostensprünge nach unten** zu verzeichnen waren. Dies gilt insbesondere für die Solar- und die Windenergietechnologien. Für die Diskussion der potenziellen Kostenbelastung ist zudem von zentraler Bedeutung, zwischen den Mehrkosten auf der Produktionsseite (beispielsweise für die Produktion

von klimaverträglichem Stahl) und der Endproduktseite (etwa das mit klimaverträglichem Stahl produzierte Auto) zu unterscheiden. Abschätzungen zeigen, dass die **Endproduktkosten** selbst bei deutlich erhöhten Produktionskosten für die klimaverträglichen Ausgangsmaterialien **nur marginal steigen**. Hinzu kommt, dass die verschiedenen Vorteile einer solchen Transformation **den potenziellen Mehrkosten gegenzurechnen** sind. Dazu gehören neben den **vermiedenen Kosten fossiler Energieträger** vor allem die **vermiedenen Klimafolgekosten**, aber auch die **geringeren Luftschadstoffemissionen**, die **ausgelöste Innovationsdynamik** und die damit verbesserten Chancen, sich auf den wachsenden globalen Klimaschutztechnologiemärkten etablieren zu können.

Grundvoraussetzung für die Realisierung eines treibhausgasneutralen Energiesystems bis zum Jahr 2035 ist umgehendes Handeln. Bereits **geplante Maßnahmen** in allen Sektoren müssten **deutlich beschleunigt** werden, Umsetzungshemmnisse in der Breite abgebaut werden und umfangreiche **ergänzende Maßnahmen** wären an vielen Stellen umzusetzen. Der Umbau des Energiesystems muss **weit über schrittweise (inkrementelle) Verbesserungen hinausgehen**, die bisher vielfach das Klimaschutzhandeln bestimmen. Diese grundsätzlichen Veränderungen weisen zum Teil auch einen stark **strukturverändernden Charakter** auf. Die Folgen solcher Veränderungen müssen sorgfältig reflektiert werden und früh Maßnahmen ergriffen werden, den notwendigen Strukturwandel proaktiv zu flankieren. Dies gilt insbesondere für die Identifikation von alternativen Beschäftigungsmöglichkeiten für die betroffenen Branchen und von Qualifikations- und Weiterbildungsmaßnahmen.

Eine Schlüsselrolle für die klimaverträgliche Gestaltung des Energiesystems spielt die starke Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung. Ohne eine schnelle Dekarbonisierung und einen solchen raschen Ausbau sind die in allen Endenergiesektoren wichtigen Strategien zur Elektrifizierung nicht (sinnvoll) umsetzbar. Dies gilt vor allem auch für die **notwendige schnelle Einführung einer Wasserstoffwirtschaft** und die damit verbundenen infrastrukturellen Herausforderungen – auch wenn sich der konkrete Umfang dieser Wasserstoffwirtschaft erst im Zuge kommender Entwicklungen klar herauskristallisieren wird.

Die deutliche Beschleunigung von Energieeffizienzverbesserungen gegenüber der Vergangenheit ist in allen Endenergiesektoren eine sehr wichtige Strategie. Insbesondere im **Gebäudesektor** spielt die Effizienz eine herausragende Rolle. Eine vollständige Reduktion der Treibhausgasemissionen der Gebäude dürfte nur mit einer gegenüber heute **sehr viel höheren energetischen Sanierungsrate von (mindestens) 4 Prozent pro Jahr** realisierbar sein (heute liegt diese Rate trotz verbesserter Anreizsysteme nach wie vor unterhalb von 1 Prozent pro Jahr). Ob bzw. unter welchen Voraussetzungen eine solch hohe Rate innerhalb weniger Jahre tatsächlich erreicht und bis 2035 aufrechterhalten werden kann, sollte durch weitere Studien näher untersucht werden.

Insbesondere im **Verkehr** scheinen für das Erreichen von Treibhausgasneutralität bis 2035 **weitgehende Verhaltensänderungen** eine wichtige Voraussetzung zu sein. Ein entscheidender Hebel ist die **Verringerung der Verkehrsleistung im Personenverkehr**. Möglichkeiten dazu ergeben sich beispielsweise über eine intel-

ligente, verkehrsvermeidende Stadt- und Siedlungsplanung mit dem verstärkten Zusammenrücken von Wohn-, Arbeits- und Freizeiträumen, aber auch durch einen verstärkten Übergang auf „mobile-office“ Lösungen und den Verzicht auf unnötige Dienstreisen – Verhaltensmuster, die sich infolge der Covid-19-Pandemie teilweise bereits etabliert haben. Gleichzeitig muss durch massiven Ausbau und Attraktivitätssteigerung von öffentlichem Verkehr, Fuß- und Radinfrastrukturen und Sharing-Angeboten eine **Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel** erreicht werden. Neben einem Rückgang des Personenverkehrs insgesamt um **rund 20 Prozent** müsste sich die **Verkehrsleistung des Umweltverbunds** aus Fuß- und Radverkehr und öffentlichem Verkehr **bis 2035 verdoppeln**, während der **Pkw-Verkehr um die Hälfte reduziert** wird. Ridepooling bietet zudem eine wichtige Möglichkeit, den Besetzungsgrad von Fahrzeugen deutlich zu erhöhen und die Zahl der Pkw für das Erbringen der gleichen Mobilitätsdienstleistung zu reduzieren. Hinzu kommt im Verkehrsbereich der konsequente **Übergang auf Elektrifizierung und Wasserstoffantriebe im Personen- und im Güterverkehr**. Für den Luftverkehr müssen synthetische Kraftstoffe zum Einsatz kommen und das Luftverkehrsaufkommen durch Verzicht auf innerdeutsche Flüge und eine Reduktion des innereuropäischen Flugverkehrs verringert werden, unter anderem durch deutlich attraktivere Bahnangebote.

Im **Industriesektor** sind, neben der auch hier **immens wichtigen Energieeffizienz, zeitnahe Ersatzinvestitionen in neuartige, vielfach noch nicht großmaßstäblich eingesetzte Technologien** beziehungsweise innovative Prozesse von entscheidender Bedeutung. Diese Investitionen können Unternehmen, die sich im globalen Wettbewerb bewegen müssen, nur unter deutlich veränderten energie- und industriepolitischen Rahmenbedingungen tätigen. Da in vielen energieintensiven Sektoren ein großer Teil der Bestandsanlagen schon in den nächsten 10 Jahren im Rahmen der Reinvestitionszyklen ersetzt werden muss, besteht jetzt die große Chance zukunftssichere Strukturen zu schaffen – sofern **ausschließlich mit Treibhausgasneutralität kompatible Neuanlagen** errichtet werden, die spätestens bis 2035 auch tatsächlich treibhausgasneutral betrieben werden. Dafür ist eine deutlich erhöhte Innovationsdynamik erforderlich und nach erfolgreicher Demonstration der neuen Technologien und Prozesse ein sofortiger, konsequenter Einsatz. Inwieweit dies gelingen kann, bleibt abzuwarten, da sich Innovationsprozesse nicht beliebig beschleunigen lassen. Durch eine konsequent umgesetzte Strategie zum Auf- bzw. Ausbau einer **umfassenden Kreislaufwirtschaft** mit den entsprechenden Teilstrategien der Vermeidung unnötig kurzlebiger Produkte, der Verlängerung von Produktlebenszeiten und Intensivierung der Produktnutzung, der Abfallvermeidung durch konsequente Anwendung der Möglichkeiten von Re-Use und Re-Manufacturing, des (mechanischen und künftig auch chemischen) Recyclings sowie der umsichtigen Einbindung von stofflichen Inputs aus der Bioökonomie können die Bedarfe an mit hohem Energieeinsatz, sowie oft hohen Treibhausgasemissionen und generell relativ großen ökologischen Fußabdrücken verbundenen **Primärmaterialien stark reduziert** werden. Solch eine Kreislaufwirtschaft kann die Zielerreichung der (weitgehenden) Treibhausgasneutralität der Industrie bis 2035 erheblich erleichtern.

Auch die internationale Vernetzung ist sehr wichtig, da für Deutschland, das **gegenwärtig über 70 Prozent seines Energiebedarfs über Importe** deckt, aller Voraussicht nach für die ausreichende Bereitstellung von Strom sowie klimaneutraler gasförmiger und flüssiger Energieträger sowie Grundstoffe für die Industrie **auch in Zukunft Importe aus anderen Ländern erforderlich** sein werden. Hierfür müssen früh internationale Partnerschaften auf Augenhöhe aufgebaut werden.

Die vorliegende Studie **untersucht die technische und in gewissem Maße auch die ökonomische Machbarkeit** einer Transformation zur CO₂-Neutralität bis 2035. **Ob sich dieses Ziel jedoch tatsächlich realisieren lässt, hängt auch maßgeblich von der gesellschaftlichen Bereitschaft und einem massiven politischen Fokus auf die notwendige Transformation ab.** Die Studie gibt somit Aufschluss darüber, inwiefern es grundlegende technologische und wirtschaftliche Hindernisse für die CO₂-Neutralität 2035 gibt; nicht jedoch ob die Umsetzung realpolitisch tatsächlich gelingen kann bzw. was dafür im Einzelnen getan werden muss. Neben den technischen und ökonomischen Herausforderungen einer Transformation hin zu CO₂-Neutralität bestehen zentrale Herausforderungen auch in institutioneller und kultureller Hinsicht, zum Beispiel bei Themen wie der Akzeptanz für einen starken Ausbau von Erneuerbaren-Energien-Anlagen und von Energieinfrastrukturen oder hinsichtlich der Notwendigkeit eines deutlich veränderten Verkehrsverhaltens.

Die hier vorliegende Studie hat das Ziel, mit der **Darstellung möglicher Bausteine** für die Erreichung von CO₂-Neutralität im Jahr 2035 Diskussionsimpulse für eine weitergehende **Auseinandersetzung mit der politischen Umsetzbarkeit** der Zielvorgabe einer CO₂-Neutralität bis 2035 zu geben. Dabei geht es vor allem um die notwendige gesellschaftliche und politische Diskussion, wie der durch den Klimawandel bedingte Handlungsdruck ganz konkret in die notwendigen Emissionsreduktionen umgesetzt werden kann. **Die fortschreitende und immer stärker spürbare globale Erwärmung kann nur durch beispielloses politisches Handeln auf unter 1,5 °C begrenzt werden.** Je stärker der Klimawandel fortschreitet, desto größere gesellschaftliche Verwerfungen sind durch ihn zu erwarten. Zugleich muss die Gefahr potenzieller Verwerfungen in Gesellschaft und Wirtschaft aufgrund schneller, teilweise disruptiver mit den Klimaschutzmaßnahmen verbundener Strukturwandelprozesse ernst genommen und ihr begegnet werden. **Die Diskussion und auch das gesellschaftliche und politische Ringen um die richtigen Lösungen für diese Situation sind notwendig und müssen mit größtmöglicher Transparenz und Ehrlichkeit in der ganzen Breite der Gesellschaft geführt werden.** Als Grundlagen dafür bedarf es an vielen Stellen weitergehende Untersuchungen und Konzepte. Die notwendigen Diskussionen und auch Abwägungsprozesse dürfen aber nicht dazu führen, dass in der Zwischenzeit beim Klimaschutz eine Pause eingelegt wird. Im Gegenteil, aufgrund der Bedeutung der kumulierten Emissionen als Treiber für den Klimawandel, **zählt jede einzelne Maßnahme**, die auch jetzt schon einen Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen leisten kann, **zumindest solange wie sie weitergehende Maßnahmen zu einem späteren Zeitpunkt nicht verhindert.**

Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen (2019). Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland, Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken, <https://ag-energiebilanzen.de/>
- AG Energiebilanzen (2020a). Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland – Daten für die Jahre von 2019 bis 2018, <https://www.ag-energiebilanzen.de/>
- AG Energiebilanzen (2020b). Pandemie schrumpft Energieverbrauch. Pressedienst Nr. 04 | 2020. <https://www.ag-energiebilanzen.de/>
- AG Energiebilanzen (2020c). Bruttostromerzeugung, https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausdruck_strez_abgabe_20200217.pdf
- Agora Energiewende (2020). Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf
- Agora Energiewende, & Becker Büttner Held (2019). Klimaneutrale Industrie. Juristische Kurzbewertung der Politikoptionen. Agora Energiewende, IKEM, BBH, Navigant, Wuppertal Institut. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/165_A-EW_Klimaneutrale_Industrie_Juristische-Kurzbewertung_WEB.pdf
- Agora Energiewende, & Wuppertal Institut (2019a). Klimaneutrale Industrie. Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Agora Energiewende, IKEM, BBH, Navigant, Wuppertal Institut. <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie/>
- Agora Energiewende, & Wuppertal Institut (2019b). Klimaneutrale Industrie. Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Agora Energiewende, Wuppertal Institut. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/166_A-EW_Klimaneutrale_Industrie_Ausfuhrliche-Darstellung_WEB.pdf
- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende & Frontier Economics (2018). Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. www.stiftung-mercator.de/media/downloads/3_Publikationen/2018/Maerz/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf
- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende & Regulatory Assistance Project (2019). Verteilnetzausbau für die Energiewende – Elektromobilität im Fokus, https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/EV-Grid/Agora-Verkehrswende_Agora-Energiewende_EV-Grid_WEB.pdf
- Bates, A. K., & Draper, K. (2018). Burn: using fire to cool the earth. Chelsea Green Publishing.
- Bastin, J.-F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76–79. <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>
- BBSR (2016). Struktur der Bestandsinvestitionen 2014. Investitionstätigkeit in den Wohnungs- und Nichtwohnungsbeständen (BBSR-Online-Publikation Nr. 03/2016). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. <https://d-nb.info/1094915890/34>

- BDEW (2020). Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland: Basisdaten und Einflussfaktoren – Foliensatz zur BDEW-Publikation. 4. aktualisierte Ausgabe Berlin, www.bdew.de/media/documents/20200525_Waermeverbrauchsanalyse_Foliensatz_2020_daQSUCb.pdf
- BDEW, BWE, VDMA, VKU, WWF, Greenpeace, Germanwatch & DUH (2019). 10 Punkte für den Ausbau der Windenergie, https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20190903_10-Punktefuer-Ausbau-Windenergie-Verbaende.pdf
- BDI (2018). Klimapfade für Deutschland. The Boston Consulting Group (BCG), Prognos, für den Bundesverband der Deutschen Industrie. https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf
- BMUB (2016). Klimaschutzplan 2050. Klimapolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf
- BMVI (2016). Bundesverkehrswegeplan 2030. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?blob=publicationFile>
- BMWi (2019a). Netzausbau geht voran, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2019/08/kapitel-1-5-netzausbau-geht-voran.html>
- BMWi (2019b). Stärkung des Ausbaus der Windenergie an Land – Aufgabenliste zur Schaffung von Akzeptanz und Rechtssicherheit für die Windenergie an Land, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/staerkung-des-ausbaus-der-windenergie-an-land.pdf?blob=publicationFile&v=16>
- BMWi (2019c). Die Energie der Zukunft. Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht-monitoring-energiewende.pdf?blob=publicationFile&v=26>
- BMWi (2020). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland, <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2019.pdf?blob=publicationFile&v=26>
- BNetzA (2020). Leitungsvorhaben. https://www.netzausbau.de/leitungsvorhaben/de.html?cms_map=2
- Brançalion, P. H. S., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F. S. M., Zambrano, A. M. A., Baccini, A., Aronson, J., Goetz, S., Reid, J. L., Strassburg, B. B. N., Wilson, S., & Chazdon, R. L. (2019). Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science Advances*, 5 (7), eaav3223. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3223>
- Brown, T. W., Bischof-Niemz, T., Blok, K., Breyer, C., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2018). Response to ‘Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems’. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 834–847. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.113>
- Bumpus, A. G., & Liverman, D. M. (2010). 10: Carbon colonialism? Offsets, greenhouse gas reductions, and sustainable development. In R. Peet, P. Robbins, & M. Watts, *Global Political Ecology* (S. 203–224). Routledge.

- Bunderegierung (2019). Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bfo5cf7498e06do3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>
- Bunderegierung (2020a). Gesetzentwurf der Bundesregierung – Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien- Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesetzentwurf-aenderung-erneuerbare-energien-gesetzes-und-weiterer-energierechtlicher-vorschriften.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Bunderegierung (2020b). Die Nationale Wasserstoffstrategie, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16
- BWE (2020a). Windenergie in Deutschland – Zahlen und Fakten, <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/>
- BWE (2020b). Halbjahreszahlen Windenergie an Land: Zubau trotz deutlichem Anstieg zu gering – Knoten bei Genehmigung lösen, Repowering-Strategie umsetzen!, <https://www.wind-energie.de/presse/pressemitteilungen/detail/halbjahreszahlen-windenergie-an-land-zubau-trotz-deutlichem-anstieg-zu-gering-knoten-bei-genehmig/>
- Cabello, J., & Gilbertson, T. (2012). A colonial mechanism to enclose lands: A critical review of two REDD+-focused special issues. *ephemera – theory & politics in organization*, 12 (1/2), 162–180.
- Chen, Y., Liu, A., & Cheng, X. (2020). Quantifying economic impacts of climate change under nine future emission scenarios within CMIP6. *Science of The Total Environment*, 703, 134950. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134950>
- Cischinsky, D. H., & Diefenbach, D. N. (2018). Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- Climact, & NewClimate Institute (2020). A radical transformation of mobility in Europe: Exploring the decarbonisation of the transport sector by 2040. Climact, NewClimate Institute, commissioned by Greenpeace. https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/transportroadmap_report_september2020.pdf
- Cembureau (2020). Cementing the European Green Deal. Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050. https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf
- DECHEMA (2017). Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry [Technologiestudie]. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., for cefic The European Chemical Industry Council. <http://www.cefic.org/Documents/RESOURCES/Reports-and-Brochure/DECHEMA-Report-Low-carbon-energy-and-feedstock-for-the-chemical-industry.pdf>
- DEEDS. (2020). Industry – Iron and Steel. Dialogue on European Decarbonisation Strategies (DEEDS). https://deeds.eu/wp-content/uploads/2020/05/Iron-and-Steel_web.pdf
- Dehm, J. (2016). Carbon Colonialism or Climate Justice: Interrogating the International Climate Regime from a TWAIL Perspective. *Windsor Yearbook of Access to Justice*, 33, 129.

- dena (2018). dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin. <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/dena-leitstudie-integrierte-energiewende/>
- dena (2019). Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand (dena-Gebäudereport kompakt 2019). Deutsche Energie Agentur GmbH. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-GEB_AEUDEREPORT_KOMPAKT_2019.pdf
- Destatis (2019). Wieder neuer Rekord: 122,6 Millionen Passagiere starteten 2018 von deutschen Flughäfen. Pressemitteilung Nr. 081 vom 7. März 2019, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/03/PD19_081_464.html
- Destatis (2020a). Bruttoinlandsprodukt für Deutschland 2019, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2020/BIP2019/pressebroschuere-bip.pdf?__blob=publicationFile
- Destatis (2020b). Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden. Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden. Lange Reihen ab 1969–2018. Statistisches Bundesamt.
- Diefenbach, N., Cischinsky, H., Rodenfels, M., & Clausnitzer, K.-D. (2010). Datenbasis Gebäudebestand: Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Bremer Energie Institut (BEI).
- DIW (2020). Klimaschutz statt Kohleschmutz: Woran es beim Kohleausstieg hakt und was zu tun ist, https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.725608.de/diwkompakt_2020-148.pdf
- DIW, DLR & KBA (2019). Verkehr in Zahlen 2019 / 2020, 48. Jahrgang. Für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2019-pdf.pdf?__blob=publicationFile
- DLR, ifeu, LBST & DBFZ (2016). Biokerosin und EE-Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft – von der Theorie zu Pilotvorhaben (Studie im Rahmen des Auftrags Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffe und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40; S. 193).
- Ekardt, F., Wieding, J., & Zorn, A. (2018). Paris Agreement, Precautionary Principle and Human Rights: Zero Emissions in Two Decades? Sustainability, 10 (8), 2812. <https://doi.org/10.3390/su10082812>
- energate (2019). energate-Interview Schüwer: „Fernwärme wird politisch schön gerechnet“. Interview vom 26.11.2019. www.energate-messenger.de/news/196921/schuewer-fernwaerme-wird-politisch-schoen-gerechnet
- Energy Brainpool (2017). Kalte Dunkelflaute – Robustheit des Stromsystems bei Extremwetter, https://www.greenpeace-energy.de/blog/wp-content/uploads/2017/06/170629_GPE_Studie_Kalte-Dunkelflaute_Energy-Brainpool.pdf
- FAO (2006). Livestock's long shadow: environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a0701e/a0701e00.htm>
- Fath, K. (2018). Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000081498/14534279>

- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, et al. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data* 11 (4), S. 1783-1838. <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/385668/3/essd-11-1783-2019.pdf>
- FZJ – Forschungszentrum Jülich (2019). Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. [Kurzfassung] https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/ Documents/Downloads/transformationStrategies2050_studySummary_2019-10-31.pdf.pdf? blob=publicationFile
- Gaßner, H., & Neusüß, P. (2011). Sanierungsvorgaben für bestehende Gebäude. Vereinbarkeit mit Eigentumsschutz und anderen Grundrechten. NABU – Naturschutzbund Deutschland e.V. https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/ggsc_rechtsgutachten_sanierungsvorgaben_final_110913.pdf
- German Zero (2020). Der 1,5-Grad-Klimaplan für Deutschland. Gemeinsamer Aufbruch gegen die Klimakrise. German Zero e.V. www.germanzero.de/gebaeude-waerme
- Gignac, R., & Matthews, H. D. (2015). Allocating a 2 °C cumulative carbon budget to countries. *Environmental Research Letters*, 10(7), 075004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/7/075004>
- Held, B. (2017). Auswirkungen der Internalisierung externer Kosten des Konsums. Eine empirische Analyse der sozialen Verteilungswirkungen [Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Wirtschaftswissenschaften (Dr. rer. pol.)]. Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- Holl, K. D., & Brancalion, P. H. S. (2020). Tree planting is not a simple solution. *Science*, 368 (6491), 580–581. <https://doi.org/10.1126/science.aba8232>
- ICCT – International Council on Clean Transport (2018). Adjusting for vehicle mass and size in European post-2020 CO₂ targets for passenger cars. By Peter Mock, Uwe Tietge, and Jan Dornoff. <https://theicct.org/publications/eu-ldv-co2-utility-parameter-20180808>
- IEE (2020). Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme. Studie zum Einsatz von H₂ im zukünftigen Energiesystem unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudewärmeversorgung. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik. www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Studien-Reports/FraunhoferIEE_Kurzstudie_H2_Gebaeudewaerme_Final_20200529.pdf
- ILO (2015). Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all. International Labour Organization. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---emp_ent/documents/publication/wcms_432859.pdf
- IPCC (2018a). 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. Genf. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>

- IPCC (2018b). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Ein IPCC Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. Bonn, Wien, Bern: Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle – DLR Projektträger, ProClim, Umweltbundesamt. https://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf
- IPCC (2018c). Mitigation Pathways Compatible with 1.5 °C in the Context of Sustainable Development. In: 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. Geneva. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- ISE – Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (2020). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>
- KBA (2020). Neuzulassungen nach Motorisierung. Kraftfahrtbundesamt https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Motorisierung/n_motorisierung_inhalt.html?nn=2601598
- LBS (2020). 2020 Markt für Wohnimmobilien. Coronavirus Update. https://www.lbs-markt-fuer-wohnimmobilien.de/wp-content/uploads/2020/06/LBS_Markt-f%C3%BCr-Wohnimmobilien-2020.pdf
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2020). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Lenzi, D., Lamb, W. F., Hilaire, J., Kowarsch, M., & Minx, J. C. (2018). Don't deploy negative emissions technologies without ethical analysis. *Nature*, 561 (7723), 303–305. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06695-5>
- Local Energy Consulting (2020). Akzeptanz und lokale Teilhabe in der Energiewende. Handlungsempfehlungen für eine umfassende Akzeptanzpolitik [Impuls]. im Auftrag von Agora Energiewende. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_07_EE-Akzeptanz/182_A-EW_Akzeptanz-Energiewende_WEB.pdf
- Low, S. & Schäfer, S. (2020). Is bio-energy carbon capture and storage (BECCS) feasible? The contested authority of integrated assessment modeling. *Energy Research & Social Science* 60. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101326>
- Mantzos, L., Wiesenthal, T., Neuwahl, F., & Rózsai, M. (2019). The POTEnCIA Central scenario: an EU energy outlook to 2050 [EUR – Scientific and Technical Research Reports]. Europäische Kommission. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/potencia-central-scenario-eu-energy-outlook-2050>
- Material Economics & Wuppertal Institut (2019). Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry. Material Economics; Wuppertal Institut; Institute of European Studies, Vrije Universiteit Brussel. https://materialeconomics.com/material-economics-industrial-transformation-2050.pdf?cms_fileid=303ee49891120acc9ea3d13bbd498d13

- Mehr Demokratie, & BürgerBegehren Klimaschutz (Hrsg.) (2020). Handbuch Klimaschutz: Wie Deutschland das 1,5-Grad-Ziel einhalten kann. Basiswissen, Daten, Maßnahmen. Oekom Verlag, München.
- Nijdam, D., Rood, T., & Westhoek, H. (2012). The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. *Food Policy*, 37 (6), 760–770. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.08.002>
- Nobis, C. & Kuhnimhof, T. (2018). Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Bonn, Berlin. http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf
- OECD & ITF (2016). Shared Mobility. Innovation for Livable Cities. Corporate Partnership Board Report. Paris. <https://www.itf-oecd.org/shared-mobility-innovation-liveable-cities>
- Page, E. A. (2013). The ethics of emissions trading. *WIREs Climate Change*, 4 (4), 233–243. <https://doi.org/10.1002/wcc.222>
- Pehlken, A., Albach, S., & Vogt, T. (2017). Is there a resource constraint related to lithium ion batteries in cars? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22 (1), 40–53. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0925-4>
- Pehnt, M., Mellwig, P., Duscha, M., Boermans, T., Bettgenhäuser, K., Diefenbach, N., Enseling, A., & Artz, M. (2015). Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich. ifeu, IWU, Ecofys, Universität Bielefeld. https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/Sanierungsfahrplan_AP_3_final.pdf
- Pehnt, M., Oschatz, B. & Schüwer, D. (2016). Primärenergiefaktoren – quo vadis? Referierter Artikel in *EnEV aktuell*, Jahrgang 2016 Ausgabe 4, S. 4-8. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/year/2017/docId/6627>
- Pehnt, M., Paar, A., Otter, P., Merten, F., Hanke, T., Schüwer, D., Irrek, W., Supersberger, N. & Zeiss, C. (2009). Energiebalance – Optimale Systemlösungen für erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Endbericht. Heidelberg, Wuppertal: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), März 2009. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5182/file/5182_Energiebalance.pdf
- Pfennig, A. (2019). Klima-Wende-Zeit Warum wir auch bei Entwicklungshilfe und Ernährung umdenken müssen. Books on Demand.
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
- pv-magazine (2019). Photovoltaik-Zubau in Deutschland erreicht nach Jahresendral-lye knapp drei Gigawatt 2018, <https://www.pv-magazine.de/2019/01/31/photovoltaik-zubau-in-deutschland-erreicht-nach-jahresendrallye-knapp-drei-gigawatt-2018/>
- pv-magazine (2020). Photovoltaik-Zubau in Deutschland schrammt 2019 knapp an Vier-Gigawatt-Marke vorbei, <https://www.pv-magazine.de/2020/01/31/photovoltaik-zubau-in-deutschland-schrammt-2019-knapp-an-vier-gigawatt-marke-vorbei/>
- Robiou du Pont, Y., Jeffery, M. & Gütschow, J. et al. (2017). Equitable mitigation to achieve the Paris Agreement goals. *Nature Climate Change* 7, 38-43. <https://doi.org/10.1038/nclimate3186>

- Rootzén, J., & Johnsson, F. (2013). Exploring the limits for CO₂ emission abatement in the EU power and industry sectors—Awaiting a breakthrough. *Energy Policy*, 59, 443–458. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.057>
- Rudolph, F., Koska, T. & Schneider, C. (2017). Verkehrswende für Deutschland : der Weg zu CO₂-freier Mobilität bis 2035. Im Auftrag von Greenpeace, Hamburg. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6812/file/6812_Verkehrswende.pdf
- Schindler, J. (2019). Gestehungskosten von PtX-Produkten im Vergleich zwischen Deutschland und Nordafrika. EA.paper, EnergieAgentur.NRW. https://www.energieagentur.nrw/content/anlagen/EA_paper_17_final.pdf
- Schneidewind, U. (2018). Die große Transformation: eine Einführung in die Kunst gesellschaftlichen Wandels (Originalausgabe). Fischer Taschenbuch.
- Schüwer, D. (2017). Konversion der Wärmeversorgungsstrukturen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* (et) 11–2017, S. 21–25. https://epub.wupperinst.org/files/6901/6901_Schuewer.pdf
- Schwarzer, S. (2019). The potential of carbon sequestration in the soil (Foresight, S. 12) [Brief]. UNEP. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28453/Foresight013.pdf>
- Smith, P., Davis, S. & Creutzig, F. et al. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change* 6, 42–50. <https://doi.org/10.1038/nclimate2870>
- Sovacool, B. K., & Brisbois, M.-C. (2019). Elite power in low-carbon transitions: A critical and interdisciplinary review. *Energy Research & Social Science*, 57, 101242. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101242>
- Sovacool, B. K., Hook, A., Martiskainen, M., & Baker, L. (2019). The whole systems energy injustice of four European low-carbon transitions. *Global Environmental Change*, 58, 101958. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101958>
- SRU (2020). Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa [Umweltgutachten 2020]. Sachverständigenrat für Umweltfragen. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.html
- UBA (2013). Potenzial der Windenergie an Land, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf
- UBA (2019a). Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: Rescue Studie. Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>
- UBA (2019b). Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze, Stand 02/2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-11_methodenkonvention-3-0_kostensaetze_korr.pdf
- UBA (2020a). Trendtabelle Sektoren und vorläufige THG-Daten 2019. <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/trendtabelle-sektoren-vorlaeufige-thg-daten-2019>
- UBA (2020b). Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase. <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten>
- UBA (2020c). Erneuerbare Energien in Zahlen. www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#statusquo

- UBA (2020d). Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch, am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte sowie am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/bilder/anteil_ee_in_den_sektoren_02-2020.png
- UBA (2020e). Fahrleistungen, Verkehrsaufwand und „Modal Split“. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterverkehr>
- ÜNB (2019). Netzentwicklungsplan Strom 2030, Version 2019, https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2030_V2019_2_Entwurf_Teil1.pdf
- UNFCCC (2015). Übereinkommen von Paris. Paris, Bonn. <https://www.bmu.de/gesetz/uebereinkommen-von-paris/>
- Wuppertal Institut (2018a). Deep Decarbonisation Pathways for Transport and Logistics Related to the Port of Rotterdam. Wuppertal Institut im Auftrag von Port of Rotterdam. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7140/file/7140_Rotterdam.pdf
- Wuppertal Institut (2018b). Strategien für eine naturverträgliche Energiewende. Wuppertal Institut, im Auftrag des Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU). https://epub.wupperinst.org/files/7264/7264_Energiewende.pdf
- Wuppertal Institut (2019). Ein CO₂-Preis als Instrument der Klimapolitik: notwendig, aber nur im Gesamtpaket wirkungsvoll und sozial gerecht. Wuppertal Paper, 195, 20. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7340/file/WP195.pdf>
- Wuppertal Institut (2020). LowEx Herten – Innovative interkommunale Energieversorgung für die „Neue Zeche Westerholt“ in Herten/Gelsenkirchen (Teilprojekt in „EnerAct – Energiewende und gesellschaftliche Megatrends – Konkrete Handlungsansätze“) https://epub.wupperinst.org/files/7461/7461_LowEx_Herten.pdf
- WWF (2018). Zukunft Stromsystem II – Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-II-Regionalisierung-der-erneuerbaren-Stromerzeugung.pdf>
- Yu, K., Smith, W. K., Trugman, A. T., Condit, R., Hubbell, S. P., Sardans, J., Peng, C., Zhu, K., Peñuelas, J., Cailleret, M., Levanic, T., Gessler, A., Schaub, M., Ferretti, M., & Anderegg, W. R. L. (2019). Pervasive decreases in living vegetation carbon turnover time across forest climate zones. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821387116>
- Zappa, W., Junginger, M., & van den Broek, M. (2019). Is a 100% renewable European power system feasible by 2050? *Applied Energy*, 233–234, 1027–1050. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.109>