

Abschlussbericht
dena-Leitstudie
Aufbruch Klimaneutralität

Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel.: +49 (0)30 66 777-0
Fax: +49 (0)30 66 777-699
E-Mail: info@dena.de
Internet: www.dena.de

Autorinnen und Autoren der dena für den hier vorliegenden Ergebnisbericht:

Christoph Jugel, Projektleitung	Pascal Hader	Ann-Katrin Schenk
Martin Albicker	Dorothea Horneber	Susanne Schmelcher
Carsten Bamberg	Dr. Karolina Jankowska	Hannes Seidl
Manuel Battaglia	Andreas Kuhlmann	Stefan Siegemund
Elias Brunken	Hanne May	Christian Stolte
Thomas Bründlinger	Eric Meidel	Lisa Strippchen
Pia Dorfinger	Dr. Tim Mennel	Gustav Weber
Antonia Döring	Dr. Maria Nieswand	Anna Willers
Johanna Frieze	Philipp Richard	Jakob Willke
Dietmar Gründig	Moritz Robers	

Autorinnen und Autoren der projektbeteiligten Gutachterinnen und Gutachter für die jeweiligen Gutachterberichte:

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI): Berit Hanna Czock, Hanna Decker, Max Gierkink, Arne Lilienkamp, Lena Pickert, Tobias Sprenger, Dr. Johannes Wagner, Jonas Zinke	Institut für Technische Gebäude- ausrüstung (ITG) Dresden Forschung und Anwendung GmbH: Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz, Dr.-Ing. Bernadetta Winiewska Jacobs University Bremen (JUB): Christine Brandstät, Prof. Dr. Gert Brunekreeft, Dr. Marius Buchmann, Martin Palovic	Stiftung Umweltenergierecht (SUER): Dr. Hartmut Kahl, Dr. Markus Kahles Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (WI): Prof. Dr.-Ing. Manfred Fischedick, Annika Tönjes, Dr. Johannes Venjakob

Konzeption & Gestaltung:

Heimrich & Hannot GmbH

Druck:

Umwelt Druck Berlin GmbH

Bildnachweis:

adobestock.com: S. 30 – darkmedia, HAIYAN, Nicola, VanderWolf Images, S. 38 – Dario, peterschreiber.media, rcx, Westend61,
S. 50 – anon, Hedvika, jeson, zcy, S. 66 – diyanadimitrova, kflgalore, Kimo, S. 88 – rh2010, vladsv, S. 102 – 1599685sv, photo 5000,
Production Perig, slavunm, S. 134 – Franco Nadalin, malp, S. 160 – Bildwerk, Mikael Damkier, Thomas Pajot, Scanrail,
S. 178 – bannafarsai, malp, Soonthorn, S. 216 – Serghei Velusceac, Martins Vanags; istockphoto.com: S. 66 – Charday Penn,
S. 134 – FG Trade, S. 216 – wlad074; Unsplash: S. 178 – nicholas doherty

Stand:

10/2021

Bitte zitieren als:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) (dena, 2021). „dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität“

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.



Dieses Druckerzeugnis wurde mit dem Blauen Engel ausgezeichnet.





Inhalt

Vorwort.....	8
Ergebnisbericht.....	11
Zusammenfassung	12
Aufbruch Klimaneutralität: eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe	22
1 Gesamtstrategie	30
Welche Anforderungen muss eine integrierte Gesamtstrategie für Klimaneutralität erfüllen?	30
Klimaneutralität braucht eine ganzheitliche politische Betrachtung, um die beispiellose gesamtgesellschaftliche Transformation zu ermöglichen	31
1.1 Mögliche Zielverfehlungen durch eine robuste Planung adressieren	32
1.2 Governance für Energiewende und Klimaschutz schärfen	33
1.3 Klimaneutrales Wirtschaften als Chance begreifen.....	34
1.4 Ein gemeinsames Narrativ entwickeln.....	35
Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode	36
2 Marktdesign.....	38
Wie wird das Energiemarktdesign zur Basis für ein klimaneutrales integriertes Energiesystem?	38
Die heutigen Energiemärkte sind stark segmentiert. Im zukünftigen, integrierten Gesamtrahmen ist ein Austarieren zwischen verschiedenen Anforderungen nötig	39
2.1 Anreize durch einen starken CO ₂ -Preis und flankierende Instrumente	42
2.2 Integrierte Planung für Weiterentwicklung und Aufbau der nötigen Infrastrukturen.....	45
Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode	47
3 Innovation	50
Welchen Beitrag leisten Innovationen auf dem Pfad zur Klimaneutralität?	50
Innovationen sind Möglichmacher, Beschleuniger, Gestalter und Erhalter auf dem Weg zu Klimaneutralität	51
3.1 Erneuerungen bei Technologien und Konzepten als Basis der Transformation	55
3.2 Innovationen beschleunigen den Weg zur Klimaneutralität.....	57
3.3 Aktives Chancenmanagement und ein innovationsfreundliches Umfeld	58
EXKURS: Digitalisierung der Energiewende.....	60
Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode	64

4 Transformation 66

Wie wird die Transformation zu Klimaneutralität in der Gesellschaft verankert? 66

Der Weg zur Klimaneutralität betrifft Unternehmen aller Branchen, alle öffentlichen oder privaten Einrichtungen und Institutionen sowie alle Bürgerinnen und Bürger	67
Vier Pfeiler für eine erfolgreiche Transformation	68
4.1 Eine partizipative Energiewende verankert Klimaneutralität in der Gesellschaft	69
EXKURS: Arbeit und Fachkräfte in der Transformation	71
4.2 Der Weg zur Klimaneutralität muss sozial gerecht gestaltet werden	76
4.3 Mit einer offenen und positiven Kommunikation die Menschen mitnehmen	78
EXKURS: Kommunen als Multiplikatoren und Gestalter von Klimaschutz und Energiewende	80
4.4 Ehrlich machen: Auch klar sagen, wo Gebote und Verbote nötig sein können	83
Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode	84

5 Internationale Einbettung 88

Wie erfolgt die Einbettung der deutschen in die europäische und die internationale Energiewende? 88

Deutschland ist eng in die internationalen Märkte eingebunden und kann besonders von einer europäischen und einer globalen Energiewende profitieren	89
5.1 EU-Rechtsrahmen konsequent auf eine klimaneutrale soziale Marktwirtschaft ausrichten	90
5.2 EU-Binnenmarkt und europäisches Energiesystem weiterentwickeln	92
5.3 Kooperationen in internationalen Märkten	94
Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode	98

Der detaillierte Blick in die Sektoren 100

6 Gebäude 102

Wie kann die Transformation zu einem klimaneutralen Gebäudebestand gelingen? 102

Der Gebäudesektor bleibt aktuell hinter der Zielmarke zurück	103
Gebäude stehen vor einem tiefgreifenden Transformationsprozess mit hoher Geschwindigkeit	105
6.1 Energiesparende Gebäudehülle	110
6.2 Effiziente Anlagentechnik und betriebsoptimierte Gebäudesteuerung	111
6.3 Einsatz erneuerbarer Energien und klimaneutraler Energieträger	113
EXKURS: Grüne Fernwärme/Wärmenetze	115
6.4 Nutzerverhalten und Akzeptanzfragen	116
BRANCHENBLICK: Handwerk: Herausforderungen, Hemmnisse, Perspektiven	117
BRANCHENBLICK: Gebäudehülle: Raumklimatisierung im Klimawandel – „Efficiency first“ beim Wärmeschutz	118
EXKURS: Das Quartier als Klimaschutz-Vorranggebiet	120
BRANCHENBLICK: Immobilienwirtschaft: Klimaschutz sozialverträglich gestalten	123
EXKURS: Kreislaufwirtschaft im Bausektor	124
Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode	125

7	Industrie.....	134
	Wie kann die Industrie die Umstellung auf klimaneutrale Prozesse und eine effiziente Kreislaufwirtschaft schaffen?	134
	Die Industrie steht noch am Beginn der Transformation zur Erreichung der Klimaziele:	
	Energiebedarfs- und THG-Emissionsminderung stagnieren seit 2000	135
	7.1 Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz	140
	7.2 Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten schaffen	144
	7.3 Schnelle Umstellung auf emissionsarme Produktionsverfahren	146
	7.4 Sicherung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit.....	150
	7.5 Effizienter Einsatz klimaneutraler Energieträger – Strom und Wasserstoff.....	151
	Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode	153
8	Verkehr	160
	Wie kann im Verkehr effiziente motorisierte Mobilität mit neuen, innovativen Mobilitätskonzepten verbunden werden?	160
	Die Emissionen im Verkehrssektor stagnieren und die derzeitigen Rahmenbedingungen unterstützen eine Verkehrswende nur unzureichend.....	161
	8.1 Weiterentwicklung der Antriebsarten, erneuerbaren Energien und neuen Konzepte.....	166
	8.2 Verbesserung der spezifischen Effizienz zur Reduzierung des Energiebedarfs.....	170
	8.3 Öffentlich zugängliche und geteilte Verkehrsmittel für neue Mobilitätsangebote.....	171
	8.4 Mehr Ehrlichkeit in der politischen und öffentlichen Kommunikation	174
	Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode	175
9	Energie.....	178
	Wie kann eine klimaneutrale und sichere Energieversorgung gestaltet werden?	178
	9.1 Eine hohe Ausbaugeschwindigkeit der EE-Stromerzeugung sicherstellen	185
	BRANCHENBLICK: Potenziale für EE-Stromerzeugung	187
	9.2 Bis 2030 leistungsfähige Märkte und Infrastrukturen für Powerfuels aufsetzen	189
	BRANCHENBLICK: Potenziale synthetischer flüssiger Energieträger	193
	9.3 Energieinfrastruktur: Netze ertüchtigen und ausbauen, System integrieren	194
	9.4 Versorgungssicherheit ist die Basis für eine erfolgreiche Energiewende.....	197
	EXKURS: Anforderungen an einen frühzeitigeren Ausstieg aus der Kohleverstromung	199
	Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode	204

10 Natürliche Ökosysteme und technische Senken..... 210

Welche Bedeutung haben natürliche Ökosysteme und technische Senken zur Erreichung der Netto-Null? 210

Neben THG-Minderungen der Verbrauchssektoren sind für Klimaneutralität Maßnahmen in Landwirtschaft und LULUCF sowie der Aufbau technischer Senken notwendig 211

Die Aufgabe: Residualemissionen verringern und die Kapazitäten zur Erzielung von Negativemissionen aufbauen 214

10.1 Minderung der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft 217

10.2 Sicherung und Erhöhung der CO₂-Aufnahme 218

10.3 Aufbau eines klimaneutralen Kohlenstoffkreislaufs.....220

10.4 Sicherstellung der notwendigen Negativemissionen für Klimaneutralität 228

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode 231

Literaturverzeichnis 236

Modellierungszusammenfassung der Gutachter 245

Anhang..... 293

Der Begriff Klimaneutralität im Rahmen der dena-Leitstudie 294

Die Rolle von klimaneutralen Gasen und Flüssigkeiten im Rahmen der dena-Leitstudie 297

Projektbeteiligte Unternehmen und Institutionen 301

Autorinnen und Autoren der projektbeteiligten Gutachterinnen und Gutachter 303

Mitglieder des Beirats der dena-Leitstudie.....304

Glossar und Begriffsdefinitionen 306

Abbildungsverzeichnis.....310

Tabellenverzeichnis.....310

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

im öffentlichen Diskurs, in Studien und Stellungnahmen ist häufig zu hören und zu lesen: Deutschland müsse dieses oder jenes tun, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Vom Grundsatz stimmt das. Denn wir haben uns verpflichtet, die Klimaziele zu erreichen. Unbedingt erforderlich sind sie ohnehin.

In der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität haben wir uns dem Ziel aber aus einer anderen Perspektive genähert. Mit der Expertise als Agentur und Thinktank für angewandte Energiewende und Klimaschutz sowie dem umfassenden Wissen eines großen Gutachter-Teams, zusammen mit mehr als 70 Vertrete-

rinnen und aus der Wirtschaft und 45 Mitgliedern aus Politik, Zivilgesellschaft und Wissenschaft in einem sehr engagierten Beirat, haben wir uns genau angeschaut, wie schnell welche Technologien, Konzepte und Maßnahmen hochlaufen und wirken können, um zur Zielerreichung beizutragen. Es ist also ganz bewusst eine sehr praxisorientierte „Bottom-up“-Perspektive auf das, was für die neue Bundesregierung und mit ihr für alle Akteure – uns als Deutsche Energie-Agentur (dena) inbegriffen – nun ansteht. Und: Zu allen Aspekten, die wir im Hauptszenario „Klimaneutralität 100“ (KN100) darstellen, können wir sagen: Deutschland kann das schaffen!



Es war ein intensiver Prozess in den vergangenen 17 Monaten. Weit mehr als 300 Personen waren daran beteiligt, allein mehr als zehn gutachterliche Institute und über 30 Expertinnen und Experten aus der dena. Wir haben uns in rund 100 Arbeitssitzungen ausgetauscht, in thematischen Workshops, in vielen Einzelgesprächen und Diskussionen, haben aus dem Prozess heraus mehrere zusätzliche Gutachten erstellen und Detail-Analysen anfertigen lassen. Dabei haben wir nicht nur technologische, regulatorische und politische Erfordernisse intensiv betrachtet. Es ging auch um die transformativen Veränderungen in der Gesellschaft, der Wirtschaft, der Politik insgesamt, derer es bedarf, damit die Klimaziele auch wirklich erreicht werden können.

Bei diesem großen Kreis und der umfassenden Aufgabe verwundert es nicht, dass die Ergebnisse einige Seiten beanspruchen. Sie finden sie zusammengestellt in diesem Bericht und den verschiedenen, von den jeweiligen Instituten verfassten Gutachten. Im Ergebnisbericht haben wir Antworten auf zehn transformativische Leitfragen aufbereitet (Kapitel 1 bis 10). Zu jedem Kapitel finden Sie als Schlussfolgerung elementare, bisweilen auch komplexe Aufgaben abgeleitet – insgesamt 84. Mit diesen Aufgaben sollten sich Politik und Gesellschaft in der nächsten Legislaturperiode nun auseinandersetzen, damit dieses Jahrzehnt tatsächlich das Jahrzehnt der Weichenstellungen, des „Aufbruchs Klimaneutralität“ wird, von dem so oft die Rede ist.

Jede einzelne Aufgabe ist machbar. Für manche bedarf es nur politischen Willens, andere erfordern dagegen einen längeren Atem, Mut und Weitsicht. Die Orchestrierung der Gesamtheit dieser Aufgaben allerdings ist zweifelsohne eine gewaltige Herausforderung! Je besser das gelingt, desto besser für den Klimaschutz, für Deutschland und auch für die Menschen in diesem Land.

Ich persönlich und das gesamte dena-Team gehen zuversichtlich an die Herausforderungen heran. Zuversichtlich, weil wir jeden Tag sehen, was alles in Bewegung ist und wie viele neue Ideen und Optionen es gibt. Die dena-Leitstudie bietet eine Perspektive auf diesem Weg – eine von verschiedenen möglichen Perspektiven. Wir beanspruchen nicht, Patentrezepte zu liefern. Auch nach dem Abschluss dieses Projekts wollen wir unvermindert im intensiven Gespräch mit vielen Akteuren bleiben, um uns über Lösungen auszutauschen.

Bei aller Zuversicht bleibt allerdings ein großes „Aber“: Die jahresscharfen Sektorziele des aktuellen Klimaschutzgesetzes werden wir in den ersten Jahren nicht einhalten können. Zu viel ist in der Vergangenheit liegen geblieben, an zu vielen Stellen müssen wir nun erst neue Dynamik aufbauen. Bei aller Entschlossenheit und wachsender Geschwindigkeit brauchen wir also auch Geduld miteinander. Nichts wäre schlimmer, als wenn wir all die Chancen und Perspektiven verstoßeln, weil wir uns selbst nicht vertrauen bei der Umsetzung all dessen, was nun angegangen werden muss.

Mit herzlichen Grüßen

A handwritten signature in black ink, reading "Andreas Kuhlmann". The signature is fluid and cursive.

Andreas Kuhlmann

Vorsitzender der Geschäftsführung
der Deutschen Energie-Agentur (dena)



dena-Leitstudie **Aufbruch Klimaneutralität** **Ergebnisbericht**

Zusammenfassung

Der Weg zu Netto-Null: zentrale Erkenntnisse der dena-Leitstudie

Zielsetzung der dena-Leitstudie

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, seine Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) bis 2030 um 65 Prozent zu senken und bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Diese Ziele sind im 2021 novellierten Klimaschutzgesetz (KSG) festgeschrieben. Das hierin ausgedrückte Klimaschutzverständnis und die daraus abgeleiteten sektoralen Vorgaben und Instrumente bilden die Grundlage für Analysen und Modellierungen im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Die Studie zeigt anhand eines zentralen Szenarios (Szenario Klimaneutralität 100, KN100), wie die Sektorziele im Jahr 2030 und Klimaneutralität im Jahr 2045 erreicht werden können und welche Energieträger hierbei in welchen Mengen benötigt werden. In den einzelnen Sektoren (Energie, Gebäude, Industrie, Verkehr) wird illustriert, welche Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität bestehen und mit welchen Lösungsansätzen und Maßnahmen sie überwunden werden könnten. In vier Pfadausprägungen untersucht die Studie zudem Varianten zur Zielerreichung, etwa einen höheren Anteil von direkt-elektrischer Nutzung gegenüber einem höheren Anteil von gasförmigen oder flüssigen Energieträgern oder die Auswirkungen von verstärkten gegenüber begrenzten Anstrengungen zur Erhöhung der Energieeffizienz.

Eines machen alle untersuchten Pfade deutlich: Um die Klimaschutzziele zu erreichen, sind äußerste Anstrengungen nötig. Schon das verankerte Zwischenziel für 2030, mit einer sektorscharfen Aufteilung in Jahreszielen, ist sehr ambitioniert. Die 2020er Jahre sind deshalb eine Dekade der Weichenstellungen. Es gilt nun, die passenden Rahmenbedingungen zu schaffen und wesentliche Maßnahmen einzuleiten, um Innovationen und Investitionen zu fördern und den Weg zur Klimaneutralität zu einer klimapolitischen und wirtschaftlichen Erfolgsgeschichte zu machen.

Für die Entscheidungen in der nächsten Legislaturperiode möchte die Deutsche Energie-Agentur gemeinsam mit den zahlreichen projektbeteiligten Unternehmen und Institutionen mit der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität wichtige Impulse geben.

Zentrale Ergebnisse aus der Modellierung

Das Erreichen von Klimaneutralität im Gesamtsystem stützt sich in der dena-Leitstudie auf vier Säulen: ein hohes Ambitionsniveau bei Energieeffizienz, die umfassende direkte Nutzung von erneuerbaren Energien, den breiten Einsatz von Powerfuels und die Erschließung von natürlichen und technischen CO₂-Senken.

Die **Erhöhung der Energieeffizienz** ist eine wesentliche Maßnahme in allen Verbrauchssektoren, insbesondere in der Industrie und im Gebäudesektor. Im Gebäudesektor wird eine durchschnittliche Sanierungsrate von 1,73 Prozent benötigt. Dazu muss die Sanierungsrate von jetzt an jährlich um 0,1 Prozentpunkte auf maximal 1,9 Prozent für alle Gebäudetypen ansteigen (siehe Kapitel 6). Die Industrie kann durch Effizienzgewinne und erste Prozessumstellungen ihren Energiebedarf bis 2030 um 21 Prozent senken. Der für die Industrie im Rahmen dieser Studie angenommene Effizienzpfad liegt deutlich über den Entwicklungen der vergangenen Jahre und ist daher ebenfalls sehr ambitioniert (siehe Kapitel 7). Im Verkehrsbereich geht die höhere Energieeffizienz vor allem mit einer stärkeren Elektrifizierung durch den Umstieg auf Elektromobilität einher (siehe Kapitel 8).

Für den **direkten Einsatz von erneuerbaren Energien** sind eine breite und deutlich beschleunigte Elektrifizierung und die Erhöhung der Energieeffizienz in vielen Anwendungsbereichen Grundvoraussetzungen. Dabei wächst der Anteil von Strom am Endenergiebedarf von 513 Terawattstunden (TWh) im Jahr 2018 auf 617 TWh in 2030 und auf bis zu 724 TWh im Jahr 2045 (Nettostrombedarf). Hinzu kommt ein Strombedarf von 88 TWh für die Erzeugung von grünem Wasserstoff. Rechnet man Transport-, Umwandlungs- und Speicherverluste dazu, werden im Jahr 2030 insgesamt 698 TWh und 2045 insgesamt 910 TWh Strom benötigt (Bruttostrombedarf). Das entspricht einer Steigerung von 77 Prozent im Vergleich zu 2018. Zentrale Treiber sind der Umstieg auf Elektromobilität im Verkehrssektor, die Erhöhung von strombasierten Prozessen in der Industrie sowie der Zuwachs an Wärmepumpen im Gebäudesektor.

Gleichzeitig müssen auch biogene Energieträger sowie andere direkt einsetzbare erneuerbare Energien wie Solar- oder Geothermie im Rahmen umweltspezifischer Restriktionen und gesamtsystemischer Möglichkeiten eingesetzt werden.

Neben Strom werden **erneuerbare gasförmige und flüssige Energieträger und Grundstoffe (Powerfuels)** benötigt. Der Einsatz von erneuerbarem Wasserstoff und weiteren Powerfuels nimmt in den Modellierungen der dena-Leitstudie stark zu. Bereits 2030 werden insgesamt rund 70 TWh Powerfuels benötigt, insbesondere grüner Wasserstoff (10 TWh davon in Deutschland produziert). Für das Jahr 2045 hat grüner Wasserstoff mit 226 TWh einen Anteil von 15 Prozent am gesamten Endenergieverbrauch. Zusätzlich werden 130 TWh Wasserstoff im Energiesektor zur Rückverstromung eingesetzt und 105 TWh in der Industrie für nicht-energetische Verwendungen benötigt. Deutschland wird auch über das Jahr 2045 hinaus Energieimportland bleiben. Ergänzend zur optimierten Nutzung biogener Energieträger wird daher weiteres Engagement für die nationale und internationale Marktentwicklung von Powerfuels notwendig sein.

Alle diese umfassenden Maßnahmen zur Treibhausgasminde- rung werden dennoch nicht ausreichen, um 2045 Klimaneu- tralität zu erreichen. Zusätzlich braucht es **Strategien zur CO₂- Abscheidung und aktiven CO₂-Entnahme**, um unvermeidbare Prozessemissionen oder Residualemissionen, etwa in der Landwirtschaft, auszugleichen. Hierfür wird bereits bis 2030 der Einsatz von CCU/S (Carbon Capture and Utilization bzw. Storage) benötigt (2 Millionen Tonnen). Bis 2045 steigt der Bedarf der geo- logischen Speicherung von CO₂ auf jährlich 24 Millionen Tonnen an. Im Hauptszenario werden technische Negativemissionen von insgesamt 29 Millionen Tonnen CO₂ erzielt, davon 17 Millio- nen Tonnen über BECCU/S (Bioenergy with Carbon Capture and Utilization bzw. Storage), hinzu kommen 12 Millionen Ton- nen CO₂ Senkenleistung durch grünes Methanol und grünes Naphtha. Eine große Rolle wird zudem der Schutz und Ausbau natürlicher Senken spielen. Erst über diese Senkenleistung im LULUCF-Sektor (Land Use, Land-Use Change and Forestry) lässt sich Klimaneutralität im Jahr 2045 erreichen.

Verringerung der THG-Emissio- nen um 97 Prozent ermöglicht die Erreichung der Netto-Null durch CO₂-Senken

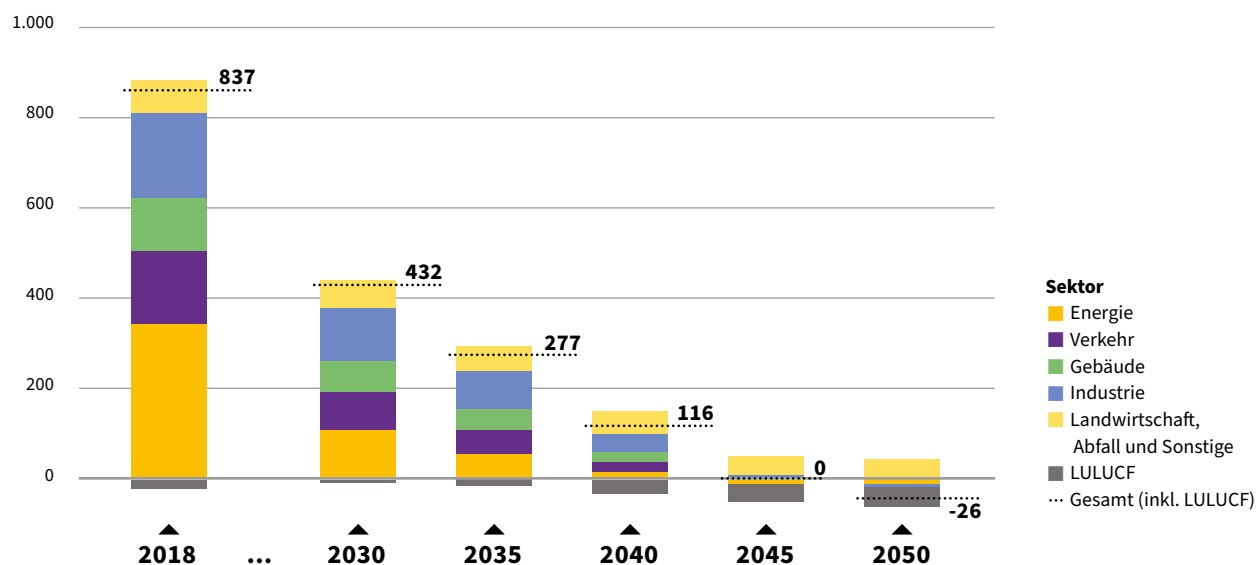
In der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität wird das Gesamtsystem im Jahr 2045 die Treibhausgasneutralität errei- chen. Das bedeutet, dass die im deutschen Bilanzrahmen ver- bleibenden THG-Emissionen durch natürliche und technische Senken ausgeglichen werden können. Dabei werden in der Modellierung auch die Emissionsminderungen im Zwischenziel 2030 und in 2045 nach den Sektorvorgaben aus dem Klima- schutzgesetz erreicht. Hierzu sind die Transformationspfade so gestaltet, dass durch Veränderungen in den Verbrauchssektoren sowie durch emissionsneutrale Bereitstellung von Energieträ- gern und Grundstoffen die THG-Emissionen von 2018 bis 2030 um rund 420 Millionen Tonnen CO₂ä (minus 49 Prozent) sinken und zwischen 2030 und 2045 um weitere 396 Millionen Tonnen CO₂ä (minus 91 Prozent). Im Vergleich zum Basisjahr 1990 gehen die THG-Emissionen damit bis 2045 um rund 97 Prozent zurück. Damit wird es möglich, den Ausgleich der verbleibenden Rest- emissionen durch natürliche Ökosysteme und den Einsatz tech- nischer Maßnahmen (u. a. CO₂-Abscheidung an Punktquellen) sicherzustellen. Im Jahr 2050 überkompensieren dann natür- liche und technische Senken die verbleibenden Restemissionen, und es resultieren negative Emissionen in Höhe von 26 Millionen Tonnen CO₂ä.

Ausgehend von den laut Klimaschutzgesetz zulässigen Emis- sionsmengen in den einzelnen Sektoren für die Stichjahre 2030, 2040 und 2045 liegt die Gesamtemissionsmenge bis zur Errei- chung von Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 in der Model- lierung der dena-Leitstudie bei kumuliert rund 9,2 (inklusive Minderung durch LULUCF) bzw. 9,6 Milliarden Tonnen CO₂ä (exklusive LULUCF). Allein zwischen 2020 und 2030 werden Treibhausgasemissionen von insgesamt rund 6,5 Milliarden Tonnen CO₂ä ausgestoßen (siehe Tabelle 1).¹

¹ Die kumulierten Emissionsmengen wurden durch eine Linearisierung zwischen den gerechneten Modelljahren ermittelt und stellen daher keine exakten Werte dar.

Abb. 1 THG-Minderungspfad nach Sektoren im Gesamtzeitraum 2018 bis 2050 (in Jahrfünften)

Angaben in Mt CO₂ä



Sektor (Mt CO ₂ ä)	1990	2005	2018	Δ	2030	Δ	2035	Δ	2040	Δ	2045	Δ	2050
Energie	465	395	308	-204	104	-53	51	-39	12	-20	-8	-2	-10
Verkehr	165	162	164	-79	85	-31	54	-32	22	-22	0	0	0
Gebäude	208	158	122	-55	67	-22	45	-25	21	-18	2	-2	0
Industrie	287	191	190	-72	118	-33	85	-43	41	-37	4	-16	-12
Landwirtschaft, Abfall und Sonstige	127	86	73	-10	63	-7	56	-7	49	-7	42	-4	38
LULUCF	25	0	-18	13	-6	-9	-14	-16	-30	-11	-41	-2	-43
...Gesamt (inkl. LULUCF)	1.277	993	837	-405	432	-154	277	-162	116	-116	0	-26	-26
rel. Minderung ggü. 1990	0 %	22 %	34 %		66 %		78 %		91 %		100 %		102 %
rel. Minderung ggü. 2005		0 %	16 %		57 %		72 %		88 %		100 %		103 %
Gesamt (exkl. LULUCF)	1.252	993	856	-419	437	-146	292	-146	146	-105	41	-24	17
rel. Minderung ggü. 1990	0 %	21 %	32 %		65 %		77 %		88 %		97 %		98 %
rel. Minderung ggü. 2005		0 %	14 %		56 %		71 %		85 %		96 %		98 %

Quellen: EWI-Gutachterbericht, 2021; ITG/FIW-Gutachterbericht, 2021; Öko-Institut-Kurzgutachten, 2021

Ein wichtiger Bezugspunkt im internationalen klimapolitischen Diskurs ist die Betrachtung eines für einzelne Staaten noch zur Verfügung stehenden Restbudgets. Die Frage nach konkreten Emissionsbudgets ist äußerst kompliziert und enthält – wie auch das Bundesverfassungsgericht in seinem Beschluss vom April 2021 festgehalten hat – normative Betrachtungen. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) nennt für Deutschland ein ab 2020 verbleibendes Restbudget von 6,7 Milliarden Tonnen CO₂ als Obergrenze der kumulierten Treibhausgasemissionen, um einen „angemessenen nationalen Beitrag“ zur Erreichung des globalen Ziels der Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,75 Grad Celcius zu leisten.^{2,3}

An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die hier skizzierten Mengen an Treibhausgasen nicht unmittelbar mit den vom SRU berechneten Emissionsmengen zu vergleichen sind, da sich diese lediglich auf das Treibhausgas CO₂ beziehen. Unter der Annahme, dass der Anteil von CO₂ überproportional zurückgeht und schwer vermeidbare Emissionen hauptsächlich aus Methan und Lachgas bestehen, würde der CO₂-Anteil der kumulierten Emissionen in der dena-Leitstudie deutlich geringer ausfallen als die gesamten THG-Emissionen.

Tab. 1 Kumulierte THG-Emissionen

Kumulierte THG-Emissionen seit 2020 bis (Mt CO ₂ e)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
inkl. LULUCF	3.993	6.476	8.172	9.073	9.182	8.899
exkl. LULUCF	4.046	6.545	8.294	9.315	9.606	9.534

Energiemix der Zukunft: Elektronen und Moleküle

Der Endenergieverbrauch sinkt im Hauptszenario KN100 der dena-Leitstudie von 2.489 TWh im Jahr 2018 um 41 Prozent auf 1.477 TWh im Jahr 2045. Wichtige Faktoren sind hier die hohen Effizienzgewinne in den Sektoren und die Elektrifizierung. Beim Endenergieverbrauch kommt es zu einer Verlagerung von konventionellen Energieträgern zu Strom und Wasserstoff. Dabei sinkt die Nachfrage nach Ölen aufgrund der Technologiewechsel im Verkehrs- und im Gebäudesektor überproportional. Im Jahr 2045 werden nahezu alle Öl- und Gasbedarfe klimaneutral gedeckt, also über biogene oder synthetische Energieträger und Grundstoffe.

Die Rolle von Strom im Energiesystem wächst stetig. Im Jahr 2045 entfallen 49 Prozent des Endenergiebedarfs auf Strom. Neben der Elektrifizierung in den Verbrauchssektoren trägt auch der Hochlauf der Wasserstoffnutzungen zum Anstieg des Strombedarfs bei. Ab 2030 wird Wasserstoff zu einem zunehmend wichtigen Energieträger, im Jahr 2045 werden 226 TWh des Energiebedarfs in den Endverbrauchssektoren (entspricht 15 Prozent) mit Wasserstoff gedeckt.

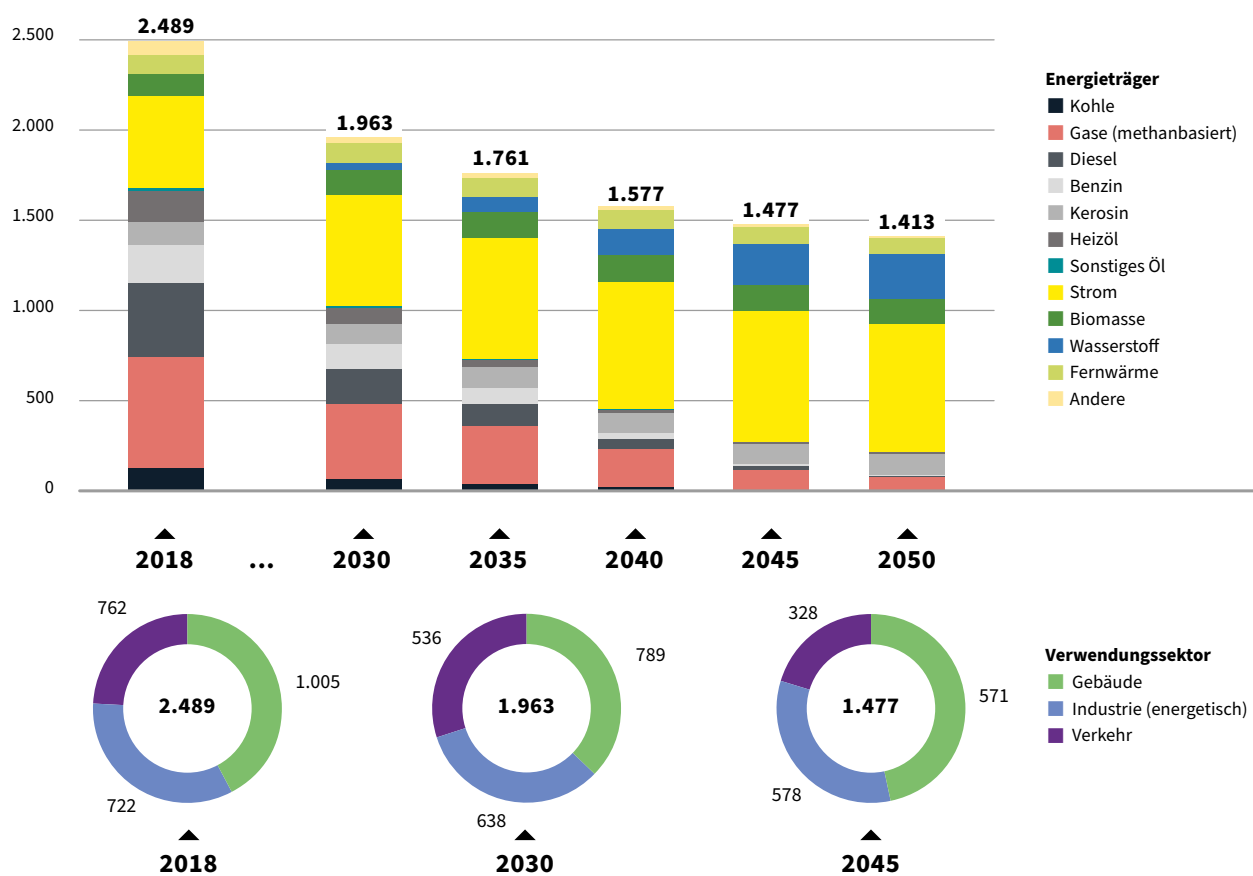
Die Gesamtmenge für Powerfuels in allen Verbrauchssektoren, der Energiewirtschaft und für die stoffliche Nutzung wächst im Jahr 2045 auf 657 TWh. Davon sind 458 TWh grüner Wasserstoff (in den Endverbrauchssektoren, im Energiesektor, als Grundstoff im Industriesektor) und 198 TWh entfallen auf verschiedene synthetische gasförmige und flüssige Energieträger. Klimaneutrale flüssige Kraftstoffe finden mehrheitlich Anwendung im Verkehrssektor, vor allem der Luftfahrt. Während der Großteil des deutschen Bedarfs an grünem Wasserstoff aus Europa eingeführt wird, kommen die Importe für die vergleichsweise teuren, gut zu transportierenden flüssigen Energieträger mehrheitlich aus dem Mittleren Osten, aus Südamerika und Australien.

² Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2020.

³ Angenommen ist eine Wahrscheinlichkeit zur Zielerreichung von 67 %. Hier waren noch nicht die neuen Zahlen des IPCC bekannt. Das aktuelle THG-Budget liegt leicht höher als vorher vom IPCC angegeben. Zudem: Die Annahme des SRU ist, dass die global noch zur Verfügung stehenden Restemissionen auf alle Menschen der Welt pro Kopf verteilt werden. Dieser Ansatz ist völkerrechtlich nicht festgehalten und durchaus umstritten – siehe auch Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020a.

Abb. 2 Energiebedarf und -nutzung gesamt

Angaben in TWh



Energieträger (TWh)	2018	2030	2035	2040	2045	2050
Kohle	124	63	38	18	0	0
Gase (methanbasiert)	617	417	322	213	113	76
Diesel	410	195	121	59	27	9
Benzin	213	138	88	29	7	4
Kerosin	122	114	115	115	113	116
Heizöl	177	87	43	16	11	8,7
Sonstiges Öl	14	7	4	1	0,4	0,3
Strom	513	617	670	709	724	712
Biomasse	117	141	144	148	145	138
Wasserstoff	0	38	80	143	226	246
Fernwärme	109	108	106	102	96	89
Andere	74	38	31	23	15	14
Summe	2.489,5	1.963	1.761	1.577	1.477	1.413

Verwendungssektor (TWh)	2018	2030	2045
Gebäude	1.005	789	571
Industrie (energetisch)	722	638	578
Verkehr	762	536	328
Summe	2.489	1.963	1.477

Quellen: EWI-Gutachterbericht, 2021; ITG/FIW-Gutachterbericht, 2021; Öko-Institut-Kurzgutachten, 2021

Antworten auf 10 Leitfragen für Klimaneutralität

1. Ein ganzheitlicher politischer Ansatz und robuste Planung

Die Transformation zur Klimaneutralität betrifft jeden Lebensbereich und jedes politische Ressort. Die Ausrichtung des Gesamtsystems hin zur Klimaneutralität erfordert auch eine neu ausgerichtete koordinierte Governance für Klimaschutz und Energiewende. Dies sollte sich in einer stärkeren ressortübergreifenden Koordination im Bundeskanzleramt, in verbindlichen Bund-Länder-Ausschüssen, aber auch in der Arbeit im Bundestag über den Zuschnitt von Ausschüssen und der Etablierung einer Enquete-Kommission wiederfinden.

Eine robuste Planung sollte auf eine „Übererfüllung“ der Mindestpfade abzielen, um einzelne mögliche Zielverfehlungen abfedern zu können. Robustheit kann bedeuten, mehrere Optionen gleichzeitig voranzutreiben und höhere Kosten in Kauf zu nehmen. Diese Mehrkosten werden jedoch immer deutlich geringer sein als die Folgekosten von ungenügendem Klimaschutz. Unterstützende Maßnahmen zur Reaktion auf Zielverfehlung müssen dabei frühzeitig definiert werden, um Planungssicherheit zu gewährleisten.

Ein Neuverständnis von Klimaschutz und Energiewende bedeutet, klimaneutrales Wirtschaften als Chance zu begreifen. Deutschland hat das Potenzial, in Zukunftstechnologien Weltmarktführer zu werden und damit auch global einen wichtigen Beitrag zu mehr Klimaschutz zu leisten. „Klimaneutralität Made in Germany“ bietet große industriepolitische Wachstumschancen.

2. CO₂-Bepreisung als zentrales Instrument, flankierende Maßnahmen mit Fokus auf Infrastrukturabgaben

Der CO₂-Preis und die Ausgestaltung eines insgesamt auf Klimaneutralität ausgerichteten ökonomischen Rahmens und Marktdesigns sind das Fundament für das Erreichen der Klimaneutralität. Die Flankierung mit weiteren Instrumenten ermöglicht Beschleunigung und spezifische Steuerung der Energiewende in den Sektoren. Die finanzielle Belastung sowohl der öffentlichen Haushalte als auch der Energienutzer ist umso geringer, je besser es gelingt, einen passenden ökonomischen Rahmen und eine auf Klimaneutralität ausgerichtete Regulierung zu schaffen.

Neben dem Europäischen Emissionshandel (EU-ETS) und dem deutschen Emissionshandel (Brennstoffemissionshandels-gesetz, BEHG) sind Instrumente zur Risikominderung und Anreizung von Investitionen in klimaneutrale Technologien zur Energiebereitstellung und Nutzung erforderlich, sowohl für Strom wie für Powerfuels. Hierfür kommen Quotenmodelle, aber auch Differenzverträge (Carbon Contracts for Difference, CCfD) in Frage. Damit der CO₂-Preis mittel- und langfristig effektiv wirkt, sollten weitere Umlagen auf Energieträger auf die CO₂-Bepreisung und den Aufbau der bestmöglichen Infrastruktur ausgerichtet werden. Historisch gewachsene Strukturen von Steuern, Abgaben und Umlagen müssen überprüft und gegebenenfalls abgeschafft werden. Fördermaßnahmen sollten auf der Nachfrageseite ansetzen, ergänzt durch einzelne angebotsseitige Maßnahmen.

Bei der Infrastrukturentwicklung sollte ein integrierter Ansatz zum Tragen kommen: Planung und Regulierung von Energieinfrastruktur sollten in Zukunft sektorübergreifend ausgestaltet werden. Ausgangspunkt für diese integrierte Planung sollte ein bestehender Planungsprozess vorgelagerter Prozess zur Erarbeitung eines Systementwicklungsplans sein. Dieser setzt einen konsistenten Rahmen für die bestehenden und entstehenden Infrastrukturplanungsprozesse auf nationaler (Netzentwicklungspläne für Strom, Erdgas und die künftige Wasserstoffinfrastruktur) wie auf regionaler/kommunaler (beispielsweise Netzausbauplanung, Wärmeleitplanung) Ebene.

3. Innovationen als Wegbereiter und Beschleuniger für Emissionsminderungen und industriepolitische Chance

Ohne weitere Innovationen und deren rasche Skalierung ist das Ziel Klimaneutralität nicht zu erreichen. Es bedarf neuer Technologien, neuer Geschäftsmodelle und neuer Prozesse. Die Förderung und Anwendung von Innovationen bietet das Potenzial, die Emissionen noch schneller zu senken und somit Klimaneutralität mit größerer Sicherheit oder sogar früher zu erreichen. Deswegen ist die Suche nach erweiterten Möglichkeitsräumen durch technische, institutionelle und soziale Innovationen und neue Denkansätze notwendig. Insbesondere technische Innovationen ermöglichen den Erhalt der Wertschöpfung und sichern Deutschland die Technologieführerschaft im zukünftigen Produktmix.

Um schnell Emissionen zu reduzieren, sollten kurzfristig verfügbare Innovationen zügig um- und eingesetzt werden. Um die Möglichkeitsräume von Innovationen für die Umsetzung und Beschleunigung der Energiewende nutzen zu können, braucht es ein aktives Chancenmanagement seitens der Politik. Hierfür muss die Vielzahl der Chancen, die in den bereits bestehenden innovativen Ideen und Ansätzen stecken, erkannt und die Umsetzung deutlich erleichtert werden. Dafür müssen Wirtschaft, Wissenschaft und Politik besser vernetzt, innovatives Denken und Start-ups weiter gefördert und offene Räume dafür geschaffen und erhalten werden.

4. **Energiewende und Klimaschutz müssen sozial gerecht gestaltet sein und Möglichkeiten zur Teilhabe eröffnen**

Energiewende und Klimaschutz sind gesamtgesellschaftliche Herausforderungen und können nur gemeinsam erfolgreich gestaltet werden. Hierzu müssen Partizipation und Akzeptanz neu verstanden, die Möglichkeiten zur Teilhabe wie zum Beispiel der Bürgerenergie verbessert und eine gemeinsame Zukunftsvision entwickelt werden. Über diese Zukunftsvision können Bürgerinnen und Bürger, Unternehmen und alle Akteure ihren Platz finden, Maßnahmen und Transformationsbedarfe werden nachvollziehbar. Ein positives Narrativ von Energiewende und Klimaschutz wird entwickelt, indem den Bürgerinnen und Bürgern ehrlich kommuniziert wird, mit welchen negativen Auswirkungen, aber besonders mit welchen positiven Auswirkungen Energiewende und Klimaschutz einhergehen (etwa saubere Luft, grünere Städte, lokale Wertschöpfung).

Wenn sich Bürgerinnen und Bürger in dieser Transformation wiederfinden, Energiewende und Klimaschutz sozial gerecht gestaltet sind (etwa indem steigende Kosten fossiler Brennstoffe und Produkte durch Entlastungen aufgefangen werden) und die Gesellschaft zum aktiven Teil des Wandels wird, können Begeisterung und die erforderliche breite Unterstützung für die anstehenden Veränderungen geschaffen und der Weg zur Klimaneutralität gemeistert werden.

5. **Deutschland profitiert von einer europäischen und einer globalen Energiewende**

Die deutsche und die europäische Klima- und Energiepolitik sind intensiver aufeinander abzustimmen, um Energieerzeugungspotenziale und -kapazitäten grenzüberschreitend besser zu nutzen. Dabei sollte die europäische Klima- und Energiepolitik grundsätzlich das Leitbild für die in Deutschland zu treffenden Entscheidungen sein. Auch der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur muss durch eine gesamteuropäische Strategie und enge Koordination auf EU-Ebene vorangebracht werden.

Ein wichtiges Ziel für die Vermeidung von Carbon Leakage sollte ein global einheitlicher CO₂-(Mindest-)Preis sein. Solange dieser nicht erreicht ist, sind andere ergänzende Instrumente notwendig, etwa ein CO₂-Grenzausgleichsmechanismus. Als Ergänzung könnte dieser in eine multilaterale Staatenallianz zwischen Ländern mit ambitionierten Klimazielen eingebettet sein („Klimaclub“).

Wie die Modellierungsergebnisse zeigen, werden Importe von Wasserstoff und seinen Derivaten ab 2030 immer wichtiger. Hauptherausforderung für den Aufbau eines globalen Marktes ist, dass die hierfür notwendigen Produktionskapazitäten und Infrastrukturen in den potenziellen Herkunftsländern geschaffen werden. Dafür sind politische Anschubinstrumente notwendig, um in der frühen Hochlaufphase einen Teil der Investitionsrisiken abzufedern. Wichtig ist auch die Definition von internationalen Standards und Nachweissystemen für die Sicherstellung der positiven Klimawirksamkeit.

6. **Gebäudesektor: großer Sprung bis 2030, große Bandbreite an Technologien nötig**

Der Gebäudesektor ist äußerst heterogen in Bezug auf handelnde Akteure, unterschiedliche Gebäudetypen sowie gebäudeindividuelle und regionale Voraussetzungen. Deshalb bedarf es einer Vielzahl unterschiedlicher Lösungsansätze, um die Klimaziele zu erreichen. Im ersten Schritt sollten insbesondere die energetisch schlechtesten Gebäude im Zentrum stehen, um deren hohe Energiebedarfe und die damit verbundenen THG-Emissionen schnell zu reduzieren. Dabei müssen die Sanierungsrate und -tiefe sehr zügig deutlich erhöht werden: Bis zum Jahr 2030 ist ein Anstieg der Sanierungsrate auf 1,9 Prozent erforderlich (und sie muss bis 2045 auf diesem Niveau verbleiben). Auch der Anteil der baulichen Modernisierungen entsprechend Effizienzhaus-55-Standard (Sanierungstiefe) muss deutlich ansteigen, alle ab 2040 modernisierten Wohngebäude müssen diesen Standard erreichen.

Zudem ist ein verstärkter Austausch ineffizienter Heizungsanlagen erforderlich: Dazu ist ein schneller Markthochlauf von Technologien wie der Wärmepumpe von zentraler Bedeutung. Bis 2030 steigt der Absatz von Wärmepumpen auf rund 500.000 Geräte pro Jahr an. Daraus resultiert allein in Wohngebäuden ein Bestand von über 4 Millionen Wärmepumpen in 2030 und 9 Millionen in 2045.

Der Ausbau und Einsatz erneuerbarer Energien im und am Gebäude nimmt zu, u. a. auch über eine verstärkte Nutzung von gebäudeintegrierten Photovoltaik-Anlagen. Darüber hinaus muss der Umstieg auf klimaneutrale flüssige und gasförmige Energieträger vollzogen werden. Die Modellierung zeigt, dass hierfür bis 2030 rund 32 TWh für den Gebäudesektor zur Verfügung stehen müssen. Dieser Bedarf wird größtenteils (zu einem Anteil von über 80 Prozent) biogen gedeckt. Bis 2045 wird mit rund 120 TWh nahezu der gesamte Bedarf an gasförmigen und flüssigen Energieträgern im Gebäudesektor durch klimaneutrale Brennstoffe bereitgestellt. Der Anteil von Wasserstoff liegt hierbei mit 79 TWh bei etwa 66 Prozent.

7. Industrie: transparente Klimabilanzen in der Wertschöpfungskette, Lenkungswirkung über CO₂-Preis mit Grenzmechanismus und Differenzverträge für Umstieg auf neue Technologien

In den vergangenen Jahren sind die Emissionen im Industriesektor kaum gesunken, weil sich Produktionswachstum und Energieeffizienzsteigerungen die Waage hielten. Um Klimaneutralität zu erreichen, braucht es statt inkrementeller Maßnahmen komplett neue Verfahren. Die Industrie benötigt passende Rahmenbedingungen wie Differenzverträge und „grüne Leitmärkte“, um innovative, emissionsarme Technologien (Low Carbon Breakthrough Technologies, LCBT) wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen, damit sie in der nächsten Dekade aus eigener Kraft ihre Produktion umstellen kann. Eine wichtige Voraussetzung ist, dass erneuerbare Energieträger und Rohstoffe ausreichend zur Verfügung stehen. Gleichzeitig sind weitere Anstrengungen bei Energieeffizienz, zur Verringerung des Materialeinsatzes und zur Erhöhung der Sekundärproduktionsanteile für ein System der Kreislaufwirtschaft nötig. Nur so lassen sich die benötigten Energiemengen begrenzen. Trotz aller Anstrengungen werden 2045 nicht vermeidbare Prozessemissionen (26 Millionen Tonnen/CO₂-ä) im Industriesektor verbleiben, die einen Ausgleich durch CCS und BECCS erforderlich machen.

Die Weichenstellungen für die Industrie müssen rasch erfolgen. Alle größeren Neuinvestitionen müssen schon heute mit der klimaneutralen Energiewelt der Zukunft kompatibel sein. Ohne die passenden Rahmenbedingungen für Investitionen in den kommenden vier Jahren drohen nicht nur die Verfehlung der Klimaziele, sondern eine Deindustrialisierung durch Carbon Leakage und zunehmend Green Leakage, also die Abwanderung von Unternehmen in Regionen, in denen die Verfügbarkeit von klimaneutralen Energieträgern und Rohstoffen besser und günstiger ist.

8. Verkehrssektor: Trendumkehr und mehr planerische Freiheit

Der Anteil der Verkehrsleistung durch nicht straßengebundene und gebündelte Verkehre steigt unter der Annahme eines breiteren Angebots des öffentlichen Verkehrs (ÖV) und einer besseren Verknüpfung mit Sharing-Angeboten und dem motorisierten Individualverkehr (MIV). Die Kommunen werden dafür die planerischen Grundlagen legen und gemeinsam mit dem Bund das finanzielle Gerüst bilden müssen. Auch sehen die Transformationspfade der Studie eine höhere Auslastung aller Verkehrsmittel vor. Dies widerspricht dem Trend der letzten Jahre, würde jedoch zu einem deutlich verringerten Energieverbrauch bei gleichbleibend hoher Mobilität führen. Die Schiene gewinnt sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr Anteile. Der nationale Luftverkehr wird im Vergleich zu Vor-Corona-Zeiten nicht zunehmen. Trotz aller Veränderungen wird jedoch im Personenverkehr auch zukünftig der Pkw dominierend sein, im Güterverkehr erfolgt der Großteil der Verkehrsleistung weiterhin über Nutzfahrzeuge. Dies macht die Erhöhung der Antriebseffizienz bei gleichzeitiger schneller Steigerung des Anteils erneuerbarer Energieträger notwendig.

Wie hoch der Anteil erneuerbarer Energieträger in den kommenden Jahren sein wird, hängt maßgeblich von der EU-Richtlinie für erneuerbare Energien, der nationalen THG-Minderungsquote sowie dem Ausbaupfad erneuerbaren Stroms in Deutschland ab. 2030 werden mindestens 41 TWh biogene Energieträger sowie 13 TWh Wasserstoff und Wasserstoffderivate (Powerfuels) zum Erreichen der Klimaziele benötigt. 2045 sind es 197 TWh Powerfuels.

Im Güterverkehr steigt die Verkehrsleistung laut Studienszenario bis 2045 um ein Fünftel an. Im Nutzfahrzeugbereich dominieren in den 2020er Jahren weiterhin Diesel-Lkw als kostengünstige Option. Ihre Bedeutung nimmt jedoch ab, abhängig vom Marktumfeld für erneuerbare Kraftstoffe, den Vorgaben zu den Flottenzielen, der Ausgestaltung der Lkw-Maut sowie der Möglichkeit, freiwillige Instrumente zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger zuzulassen.

9. Energiesektor: marktbasierter Ausbau der erneuerbaren Energien, leistungsfähige Märkte und Infrastrukturen für Powerfuels

Der Strombedarf wird in den nächsten Jahren sehr stark ansteigen, daher ist im Energiesektor eine deutliche Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien erforderlich. Neben geeigneten Anpassungen im Marktdesign müssen die Genehmigungsverfahren und die Flächenbereitstellung hierauf ausgerichtet sein. Außerdem müssen Flexibilität in der Netzinfrastruktur aktiviert bzw. Speicherkapazitäten bereitgestellt werden, um die Netz- und Systemintegration der erneuerbaren Energien zu gewährleisten. Absehbar wird der bislang für 2038 vorgesehene Ausstieg aus der Kohleverstromung bereits aus marktlichen Gründen vorgezogen werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit für einen Ausbau von wasserstofffähigen Gaskraftwerken zur Deckung der Spitzenlast. Hierfür sollte die Einführung eines zielgenauen Kapazitätsmechanismus geprüft werden, der die Versorgungssicherheit auch in Zukunft gewährleistet. In Bezug auf den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ist neben der Anreizung des Infrastrukturausbaus und des Nachfragesektors auch eine Strategie zur Wasserstoffbereitstellung notwendig, die nationale und internationale Quellen umfasst. Die Energieimporte Deutschlands werden bis 2045 gegenüber heute deutlich zurückgehen, dabei ändert sich deren Zusammensetzung grundlegend. Diese Entwicklungen sind auch aus geopolitischer Perspektive von großer Bedeutung. Schließlich ist im Rahmen der integrierten Infrastrukturplanung auch der möglichst schnelle Hochlauf von weiteren Powerfuels zu berücksichtigen. Insgesamt muss die Planung eine Transformationssicherheit garantieren: Zu jedem Zeitpunkt muss die Verfügbarkeit der Energieträger und damit die Versorgungssicherheit gewährleistet sein.

10. Eine Senkenstrategie für natürliche und technische Senken

Für Klimaneutralität wird eine nationale und europäische Senkenstrategie benötigt, die natürliche und technische Senken umfasst, Zielkonflikte adressiert und einen klaren Pfad zu Netto-Null und Netto-Negativemissionen aufzeigt. Ohne Negativemissionen ist das Klimaziel nicht zu erreichen. Im Jahr 2045 werden 70 Millionen Tonnen CO₂-Negativemissionen über natürliche und technische Senken benötigt, um verbleibende Emissionen aus der Industrie und Landwirtschaft auszugleichen. Die hohe Komplexität, lange Planungszeiten und hohe Investitionskosten bei technischen Senken machen es unabdinglich, zeitnah eine umfassende Strategie zu erarbeiten. Ein Hochlauf der Technologien ist in sehr kurzer Frist erforderlich, um über CCS Prozess-emissionen in der Industrie abzuschneiden. Hier können über BECCS auch Negativemissionen entstehen. Natürliche Senken dagegen geraten gerade mit fortschreitendem Klimawandel und intensiver Landnutzung unter Druck. Damit der LULUCF-Sektor eine CO₂-Senke bleibt und seine Kapazitäten erweitern kann, sind ambitionierte Maßnahmen, etwa bei der Waldbewirtschaftung und der Nutzung organischer Böden, erforderlich. Maßnahmen zum Ausbau natürlicher Senken stehen dabei teilweise in Konkurrenz mit der Biomasseverfügbarkeit.

Eine zusätzlich durchgeführte Sensitivitätsanalyse, welche die Unsicherheit des LULUCF-Sektors durch einen reduzierten Senkenbeitrag abbildet, zeigt zudem, dass auch Rahmenbedingungen für den Einstieg in die DAC-Technologie (Direct Air Capture) geschaffen werden müssen.

Tab. 2 Kernindikatoren des Szenarios Klimaneutralität 2045 (KN100)

	2018	Δ gesamt	Δ pro Jahr	2030	Δ gesamt	Δ pro Jahr	2045
Treibhausgasemissionen (Mt CO₂ä)							
Energie	308	-204	-17	104	-112	-7	-8
Verkehr	164	-79	-7	85	-85	-6	0
Gebäude	122	-55	-5	67	-65	-4	2
Industrie	190	-72	-6	118	-114	-8	4
Landwirtschaft, Abfall und Sonstige	73	-10	-1	63	-21	-1	42
Gesamt (exkl. LULUCF)	857	-420	-35	437	-396	-26	41
rel. Minderung ggü. 1990	32 %			65 %			97 %
Gesamt (inkl. LULUCF)	839	-407	-34	432	-432	-29	0
rel. Minderung ggü. 1990	34 %			66 %			100 %

	2018	Δ gesamt	Δ pro Jahr	2030	Δ gesamt	Δ pro Jahr	2045
Primärenergieverbrauch (TWh)	3.647	-1198	-100	2.449	-652	-43	1.797
davon Kohle	808	-691	-58	117	-117	-8	0
davon Öle	1.226	-514	-43	712	-676	-45	36
davon Erdgas	871	-160	-13	711	-665	-44	46
davon inländisch erzeugte erneuerbare Energien	501	249	21	750	329	22	1.079
davon importierte synthetische Energieträger	0	60	5	60	537	36	597
Endenergieverbrauch (TWh)	2.489	-526	-44	1.963	-486	-32	1.477
davon Kohle	124	-61	-5	63	-63	-4	0
davon Gase (methanbasiert)	617	-200	-17	417	-304	-20	113
davon flüssige Energieträger (Öle)	935	-395	-33	540	-382	-25	158
davon Strom	513	104	9	617	107	7	724
davon Wasserstoff	0	38	3	38	188	13	226
Energieträger zur stofflichen Nutzung (TWh)	224			222			214
Fossil (Kohle, Öle, Erdgas)	224			192			41
Wasserstoff (ohne grauen Wasserstoff)				27			103
Flüssige Powerfuels ¹							51
Feste Biomasse				3			19
Bruttostrombedarf (TWh)	595			698			910
Nettostromerzeugung² (TWh)	600	32	3	632	211	14	843
Erneuerbare Energien³ (TWh)	214	258	22	472	302	20	774
	0 %			75 %			92 % ⁴
Wind onshore	89	127	11	216	87	6	303
Wind offshore	19	74	6	93	106	7	199
Photovoltaik	46	77	6	123	112	7	235
Installierte Stromerzeugungskapazitäten (GW)							
PV	45	86	7,2	131	128	8,5	259
Wind onshore	52	40	3,3	92	32	2,1	124
Wind offshore	6	17	1,4	23	27	1,8	50
Regelbare Gaskraftwerke ⁵	32*	15	1,3	47	12	0,8	59
Installierte Leistung Großbatteriespeicher (GW)	0	2	0,2	2	13	0,9	15
Installierte Leistung Elektrolyse (GW)	0	5	0,4	5	19	1,3	24
Bedarf an Powerfuels (TWh)	0	69	6	69	588	39	657
heimisch produziert	0	10	0,8	9,5	51	3,4	60
aus Europa importiert	0	56	4,7	56	158	10,5	214
von außerhalb Europas importiert	0	4	0,3	3,7	379	25,3	383
Indikatoren im Verkehrssektor							
Anzahl batterieelektrische Pkw (Mio. Stück)	0,05	9	0,8	9,1	23	1,5	31,8
Wasserstoffbedarf im Verkehr (TWh)	0	9	0,8	9	50	3,3	59
Bedarf an flüssigen Powerfuels im Verkehr (TWh)	0	4	0,3	4	134	8,9	138
Indikatoren im Gebäudesektor							
Klimaneutrale Brennstoffe im Gebäudesektor ⁶ (TWh)	9**	23	1,9	32	88	5,9	120
Anzahl elektr. Wärmepumpen in Wohngebäuden (Mio. Stück)	1,03**	3	0,3	4,1	4,9	0,3	9
Anteil vollsanierter Wohngebäude seit 2020 (%)	0,8**	13	1,1	14	26	1,7	40
LULUCF (Mt CO₂ä)	-18	13	1,1	-6	-35	-2,4	-41
CCU/CCS (Mt CO₂ä)	0	-2	-0,2	-2	-15	-1,0	-17
Technische Negativemissionen (Mt CO₂ä)	0	-2	-0,2	-2	-27	-1,8	-29
BECCU/BECCS	0	-1	-0,1	-1	-16	-1,1	-17
grünes Naphtha und Methanol	0	-1	-0,1	-1	-11	-0,7	-12

¹ Zuzüglich etwa 50 TWh importierten grünen Methanols.

² Differenz der Stromerzeugung zum Bruttostrombedarf ergibt sich aus dem Eigenenergieverbrauch innerhalb des Energiesektors und Importen.

³ Ohne Hausmüll und Geothermie.

⁴ Die verbleibenden Anteile werden durch Stromerzeugung aus erneuerbarem Wasserstoff sowie aus zwischengespeichertem und importiertem erneuerbarem Strom bereitgestellt.

⁵ In den Gaskraftwerken erfolgt ein sukzessiver Ersatz von Erdgas durch synthetische klimaneutrale Gase.

⁶ Biogen und synthetisch, exklusive feste Biomasse.

* Angabe für das Jahr 2019.

** Angabe für das Jahr 2020.

Aufbruch Klimaneutralität: eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe

Motivation und Zielsetzung der neuen dena-Leitstudie

Mit der Novelle des Klimaschutzgesetzes (2021) hat die Bundesregierung das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2045 Klimaneutralität in Deutschland zu erreichen. Dieses neue Zielbild erfordert Ambitionen in allen Bereichen und Sektoren, die deutlich über die in der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende (2018) skizzierten Ansätze hinausgehen. Im Jahr 2018 galt es, Lösungswege für das damalige politische Ziel zu beschreiben, die nationalen Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 Prozent im Vergleich zu 1990 zu reduzieren. Angesichts der Zielverschärfung durch die EU sowie vor dem Hintergrund des Bundesverfassungsgerichtsbeschlusses aus dem Frühjahr 2021 hat die Bundesregierung das erst im Dezember 2019 eingeführte Klimaschutzgesetz im August 2021 daher novelliert. Die neuen Klimaziele sehen vor, dass Deutschland seine Emissionen bis 2030 um 65 Prozent senken muss, bis 2045 klimaneutral wird und nach 2050 eine netto-negative Bilanz erreicht. Diese Eckdaten sind Grundlage der Modellierung in der **dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität**.

Die verschärften Ziele, aber auch neue politische Initiativen (Klimaschutzpaket, Wasserstoffstrategie, CO₂-Bepreisung usw.) sind die Motivation für eine Neuauflage der dena-Leitstudie. Vieles hat sich seit 2018 verbessert. Aber durch die Erhöhung der Zielvorgaben ist die Diskrepanz zwischen den mit den derzeitigen Instrumenten erreichten Entwicklungen und den zur Erreichung der Klimaziele notwendigen Veränderungen eher noch größer geworden.

Die 2020er Jahre sind deshalb eine Dekade der Weichenstellungen, um die nationalen wie internationalen Ziele im Klimaschutz erreichen zu können. Im Pariser Klimaabkommen einigte sich die Weltgemeinschaft im Dezember 2015, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celcius und möglichst auf 1,5 Grad Celcius zu begrenzen, da dies Risiken und Folgen des Klimawandels erheblich vermindern würde und zudem kritische Kippunkte verhindern könnte.¹ Im Sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC, 2021) warnt dieser jedoch davor, dass eine Temperaturerhöhung von mehr als 1,5 Grad Celcius bereits innerhalb der nächsten 20 Jahre erreicht werden könnte. Die bereits begonnenen klimatologischen Veränderungen seien beispiellos und in weiten Teilen irreversibel. Gleichzeitig zeigt der IPCC-Bericht auf, dass die Prognosen bei tiefgreifenden Anstrengungen auch optimistischer ausfallen können. Schon nach wenigen Jahren mit sehr niedrigen Emissionen könnten Auswirkungen auf die Treibhausgaskonzentration erkennbar sein. Wenn es gelänge, den globalen Temperaturanstieg schnell zu vermindern, könnte bereits 2040 ein Temperaturplateau erreicht sein.² Das Handeln jedes Individuums in dieser Dekade in Deutschland, Europa und darüber hinaus entscheidet also darüber, welche Zukunft uns bevorsteht. Der deutschen Bundesregierung fällt in der kommenden Legislaturperiode eine besondere Verantwortung zu, hierfür die notwendigen Weichen zu stellen.

Alle Akteure, gesellschaftlichen Gruppen und alle Branchen sind in diesem Prozess der Transformation zu einem klimaneutralen Energie- und Wirtschaftssystem mit enormen technischen, sozialen und ökonomischen Herausforderungen konfrontiert. Auch die Auswirkungen der Corona-Krise können die Energie- und Klimapolitik weiter erheblich beeinflussen – sei es durch die wieder angestiegenen Emissionen in der Zeit der wirtschaftlichen Erholung, durch die finanzpolitischen Restriktionen, denen die Haushalte von Bund, Ländern und vor allem Kommunen unterliegen, oder durch die verschiedenen nachhaltig verbleibenden Verhaltens- und Konsumänderungen aus der Pandemie-Zeit.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018.

² Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021.

Zwischen 1990 und 2020 hat Deutschland seine CO₂-Emissionen um 41 Prozent senken können, bei gleichzeitiger Erhöhung des Bruttoinlandsprodukts um 258 Prozent (nicht inflationsbereinigt).³ Dass Deutschland im Jahr 2020 seine Klimaziele erreicht hat, ist zu einem gewissen Teil dem Corona-Einbruch zu verdanken. Bereits 2021 steuert Deutschland aber auf einen Anstieg der Emissionen und damit auf eine erhebliche Lücke zwischen Zielen und Wirklichkeit zu. Der Emissionsanstieg im Jahr 2021 dürfte erheblich sein.⁴ Das ist eine große Bürde für die kommende Bundesregierung und unterstreicht die Dringlichkeit politischen Handelns.

Es gilt nun, die passenden Rahmenbedingungen zu schaffen, um neue Dynamik aufzubauen, Innovationen und Investitionen zu fördern und den Weg zur Klimaneutralität in Deutschland und in der EU nicht nur zu einer klimapolitischen, sondern gleichzeitig zu einer wirtschaftlichen Erfolgsgeschichte zu machen. Für diese Entscheidungen in der nächsten Legislaturperiode möchte die Deutsche Energie-Agentur gemeinsam mit den zahlreichen Projektbeteiligten wichtige Impulse liefern.

Selbstverständnis und Finanzierung der dena-Leitstudie

Die dena-Leitstudie verfolgt einen Multi-Stakeholder-Ansatz. Dieser verbindet unterschiedliche Perspektiven, um möglichst konsistente Transformationspfade zur Erreichung der Klimaziele zu entwickeln: Wissenschaftliche Expertise wird dabei mit der branchenspezifischen Praxiserfahrung zu Märkten, Technologien und Kunden des Projektpartnerkreises verbunden. Die Analysen der wissenschaftlichen Gutachterinnen und werden durch das Fachwissen und die Perspektive des Partnerkreises sowie verschiedener Stakeholder aus Politik und Zivilgesellschaft im Beirat der dena-Leitstudie ergänzt, validiert und kritisch hinterfragt. Dieses Zusammenbringen von wissenschaftlicher Modellierung, branchenspezifischer Praxiserfahrung und gesellschaftlichem Diskurs ist ein zentrales Merkmal der dena-Leitstudie. Mit diesem Vorgehen soll der Blick für die Erfordernisse und Potenziale der verschiedenen Sektoren geöffnet und praxisnahe wie realistisch umsetzbare Lösungsansätze für das Erreichen der Klimaneutralität in Deutschland gefunden werden.

Expertinnen und Experten aus mehr als 70 Unternehmen und Institutionen und mehr als zehn wissenschaftliche Institute sowie ein hochkarätiger Beirat mit 45 Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Politik haben – unter Federführung der dena – über die Projektlaufzeit von 17 Monaten an der dena-Leitstudie mitgearbeitet.

Die dena-Leitstudie ist ein co-finanziertes Projekt aus Eigenmitteln der dena (30 Prozent) und Drittmitteln (70 Prozent). Die mehr als 70 als Projektpartner beteiligten Unternehmen und Institutionen haben hierzu einen Finanzierungsbeitrag geleistet. Um die Ausgewogenheit des Partnerkreises sicherzustellen und auch kleinen Unternehmen und Start-ups die Beteiligung zu ermöglichen, sind die Finanzierungsbeiträge zwischen 5.000 Euro und 35.000 Euro gestaffelt.

Aufbau der dena-Leitstudie

Im Rahmen des Studienprojekts haben sich in einer Vielzahl von Diskussionen und Workshops neue gegenseitige Erkenntnisse für die Mitwirkenden ergeben. Das gilt auch für die dena und die in das Studienprojekt eingebundenen Gutachterinnen und Gutachter. Die Ergebnisse der **dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität** sind die Schlussfolgerungen der dena und der jeweiligen gutachterlichen Institute.

Die Ergebnisse der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität sind aufgeteilt in den **Ergebnisbericht** und die verschiedenen **Gutachten** der wissenschaftlichen Institute (Modellierungsgutachten, Fachgutachten und Kurzgutachten).

³ Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021c; Umweltbundesamt (UBA), 2021g.

⁴ Emele & Gores, 2021.

Der **Ergebnisbericht** enthält die Schlussfolgerungen der dena-Leitstudie. Eingeflossen sind hier Erkenntnisse aus den stärker quantitativen Arbeiten in den Sektormodulen und der Modellierung sowie der Ergebnisse aus den Querschnittsmodulen und ihren Synergien. Die daraus resultierenden Handlungsempfehlungen sollen Wirtschaftsakteuren strategische Orientierung zur Ausrichtung ihrer Geschäftsaktivitäten auf dem Weg in eine klimaneutrale Gesellschaft geben. Der Politik sollen konkrete Empfehlungen für die Weichenstellungen in der kommenden Legislaturperiode angeboten werden.

Zu den **Gutachten** zählen zum einen die Modellierungsgutachten von EWI, ITG, FIW und ef.Ruhr.⁵ Hier werden die quantitativen Szenarioanalysen und entsprechende Auswertungen dargestellt, die zugrunde gelegten Parameterannahmen ausgewiesen und für besonders neuralgische Parameter auch gesondert eingeordnet. Eine qualitative Erörterung der im Projektverlauf identifizierten Wirkzusammenhänge und Fragestellungen, die sich nicht rein durch die Modellierung beantworten lassen, erfolgt in Exkursen. Der Modellierungsbericht des EWI enthält eine ausführliche Darstellung zur Methodik der dena-Leitstudie.⁶

Zu den weiteren Gutachten der dena-Leitstudie zählen die Fachgutachten für die Querschnittsmodule (Jacobs University Bremen; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; Stiftung Umweltenergierecht) sowie die Kurzgutachten zu natürlichen und technischen CO₂-Senken und zu innovativen Technologien (Öko-Institut, Prognos, Fraunhofer ISE).

Die Governance der dena-Leitstudie

Projektkonsortium

Die dena ist Konsortialführerin und hat die **Gesamtprojektleitung** für die dena-Leitstudie inne. Sie verantwortet mit einem Team aus knapp 30 Expertinnen und Experten der angewandten Energiewende die Gesamtsteuerung, war federführend in der Konzeption und Umsetzung des Arbeitsprogramms und hat die übergeordnete Ausrichtung der Studie vorgegeben. Hierzu zählte auch die Leitung des aus den Projektpartnern bestehenden Lenkungskeises und der Arbeitsgruppen.

Für die wissenschaftlichen Analysen, die Szenariobildung und die Modellierung sind renommierte **Gutachterinnen und Gutachter** aus sechs wissenschaftlichen Instituten und Disziplinen zuständig. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler lieferten eigenständige Gutachten, die Grundlage für den Diskurs mit den Projektpartnern und dem Beirat sowie zur Ableitung von Erkenntnissen und Handlungsempfehlungen in diesem Ergebnisbericht sind.

Folgende gutachterliche Institute sind Teil des Projektkonsortiums:

- Das **Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln (EWI)** verantwortet wie in der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende (2018) als Hauptgutachter der Studie die Energiesystemmodellierung sowie die Modellierung der Verbrauchssektoren „Industrie“ und „Mobilität“.
- Das **Forschungsinstitut für Wärmeschutz (FIW) München** und das **Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden (ITG)** unterstützten die dena-Leitstudie als Fachgutachter und Modellierer im Sektormodul „Gebäude“. Auch diese beiden Institute haben bereits an der ersten dena-Leitstudie mitgewirkt.
- Die **Jacobs University Bremen** war für die wissenschaftliche Begleitung des Querschnittsmoduls „Energemarktdesign“ zuständig und hat ihre Energiemarkt-Expertise in das gesamte Setting eingebracht.
- Das **Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie** begleitete mit seiner sozial- und gesellschaftswissenschaftlichen Expertise das Querschnittsmodul „Transformation“.
- Die **Stiftung Umweltenergierecht** unterstützte mit energierechtlichen Kenntnissen, dies insbesondere im Querschnittsmodul „Wirtschaft & Europa“.

Projektpartner

Mehr als 70 Unternehmen und Institutionen aus verschiedenen Branchen (Energie, Gebäude, Verkehr und Industrie) sind Projektpartner der dena-Leitstudie.⁷ Sie bringen ihre Branchen- und Praxiserfahrung ein und haben einen Beitrag zur Finanzierung geleistet. Mit der Teilnahme hat jeder Partner den übergeordneten Zielen der Studie (Erreichen der Klimaneutralität bis 2045), der Projektstruktur und Governance, der wissenschaftlichen Neutralität der Gutachterinnen und Gutachter sowie der Unabhängigkeit der dena in ihrer Leitungsrolle vertraglich zugestimmt.

⁵ Das Gutachten der ef.Ruhr ist in den EWI-Gutachterbericht integriert.

⁶ EWI-Gutachterbericht, 2021.

⁷ Eine Übersicht zu allen Projektpartnern der dena-Leitstudie findet sich im Anhang dieses Ergebnisberichts.

Jeder Projektpartner hatte einen Sitz im Lenkungskreis der Studie und konnte in einer oder mehreren Arbeitsgruppen der vier Sektormodule und drei Querschnittsmodule mitwirken.

- **Lenkungskreis:** Mitglieder im Lenkungskreis sind alle Projektpartner. Der Lenkungskreis koordinierte die Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen und tauschte sich über allgemeine und sektorübergreifende Fragestellungen sowie zu zentralen Fragen zur Ausrichtung der Projektarbeit aus. Unabhängig vom finanziellen Beitrag durfte pro Unternehmen nur eine Vertreterin oder ein Vertreter in den Lenkungskreis mit einem Stimmrecht entsendet werden. Im Lenkungskreis wurden Modellierungsergebnisse vorgestellt und die Erkenntnisse aus den einzelnen Modulen und Arbeitsgruppen aggregiert. Das Projektkonsortium setzte den Rahmen, die dena leitete die Diskussionen und bereitete die Inhalte auf. Relevante Erkenntnisse, die sich aus der Validierung der Annahmen und Parameter ergaben, wurden von den Gutachterinnen und Gutachtern berücksichtigt. Bei einzelnen Entscheidungen, wie etwa bei Vorschlägen zu neuen Szenarien, kann es zu einer Abstimmung im Lenkungskreis kommen. Entscheidungen werden mit einer Zweidrittelmehrheit der anwesenden Stimmen getroffen.
- **Arbeitsgruppen:** In den vier Sektormodulen „Energie“, „Gebäude“, „Industrie“ und „Verkehr“ diskutierten Projektpartner und Gutachterinnen und Gutachter unter der Leitung der dena über grundsätzliche Fragen der Modellierung sowie mögliche Ansätze zur Erreichung der notwendigen Transformation. Diese Integration von praxisnahem Wissen in den Analyseprozess gewährleistet, dass die zukünftigen Herausforderungen realitätsnah gedacht sind. Für die Parametrisierung der Szenarien wurden von den wissenschaftlichen Gutachterinnen und die Parameter aus wissenschaftlichen Quellen abgeleitet. Auf Basis des Praxiswissens und der Marktexpertise der Projektpartner wurden ausgewählte Parameter bei der Diskussion in den Sektormodul-Sitzungen validiert. Zusätzlich bearbeiteten die Projektpartner und das Projektkonsortium in drei Querschnittsmodulen sektorübergordnete Herausforderungen und Fragestellungen.

Experteninterviews und Workshops

In einigen Fällen fanden bei der Definition der Annahmen und Parameter auch zusätzliche Experteninterviews statt. Dies betraf beispielsweise innovative neue Produktionstechnologien, die teilweise noch im frühen Versuchsstadium sind. Parameter mit hoher Sensitivität wurden darüber hinaus durch vertiefende Analysen, durch Zusatzgutachten, durch eine Einordnung in einen Studienvergleich oder durch die Durchführung von spezifischen Workshops plausibilisiert. So wurden beispielsweise Implikationen der Energiewende und des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft auf die bestehende Gasnetzinfrastruktur diskutiert. Die Modellierungsparameter wurden final von den wissenschaftlichen Gutachterinnen und Gutachtern festgelegt.

Beirat

Der Projektbeirat der dena-Leitstudie bildet ein sehr diverses Akteursspektrum ab.⁸ Er setzt sich aus Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft (beispielsweise von verschiedenen wissenschaftlichen Instituten und Thinktanks), Zivilgesellschaft (beispielsweise von Umwelt- und Verbraucherverbänden) und Politik (beispielsweise Mitglieder des Bundestags sowie von Bundes- und Landesministerien) zusammen. Das 45-köpfige Gremium hat das Projektkonsortium zur Ausrichtung der Studie und zu strategischen Weichenstellungen beraten. Es unterstützte bei der Reflexion der wissenschaftlichen Analyse, trug zur Schärfung und Ergänzung der Fragestellungen bei und hat insbesondere bei Fragestellungen der Akzeptanz und politischen Durchsetzbarkeit der identifizierten Lösungsmöglichkeiten beraten und kritisch hinterfragt. Die Positionen aus dem Beirat wurden durch die dena oder den Beiratsvorsitz in den Lenkungskreis getragen. Zu einigen Fragestellungen wurden Mitglieder des Beirats in eigenen Workshops explizit hinzugezogen. Der Beirat erweiterte damit die Perspektiven der dena-Leitstudie, indem die Expertise und die Anforderungen weiterer Stakeholder-Gruppen in die Studienarbeit eingeflossen sind.

Der Beirat hat die dena-Leitstudie in den Sitzungen und dem fachlichen Austausch zwischen den Sitzungsterminen konstruktiv und kritisch begleitet. Es war aber von Beginn an nicht das Ziel, dass sich die Mitglieder des Beirats die in diesem Abschlussbericht dargestellten Ergebnisse und Empfehlungen in ihrer Gesamtheit zu eigen machen. Vielmehr gibt es zu einzelnen Punkten von einzelnen Mitgliedern des Beirats durchaus abweichende Positionen und Einschätzungen. Gleiches gilt auch für den im Lenkungskreis versammelten Projektpartnerkreis.

⁸ Eine Übersicht zu allen Mitgliedern des Beirats findet sich im Anhang dieses Berichts.

Projektstruktur und Ablauf

Analog zum Vorgehen bei der ersten dena-Leitstudie fand auch in der **dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität** ein wesentlicher Teil der Analysen in vier Sektormodulen statt: Sie betrachten die Entwicklung für die Energiewirtschaft sowie für die Bereiche Gebäude, Industrie und Verkehr. Arbeitsschwerpunkte der Sektormodule sind die Diskussion konkreter Optionen zur Erreichung von Klimaneutralität im Jahr 2045 sowie die passende Parametersetzung zur Quantifizierung der sektorspezifischen Transformationspfade im Rahmen der energiesystemischen Modellierung.

Um integrierte Lösungen zu erarbeiten, diskutierten die projektbeteiligten Expertinnen und Experten zusätzlich sektorübergreifende Inhalte in drei Querschnittsmodulen: „Energemarktdesign“, „Transformation“ sowie „Wirtschaft & Europa“.

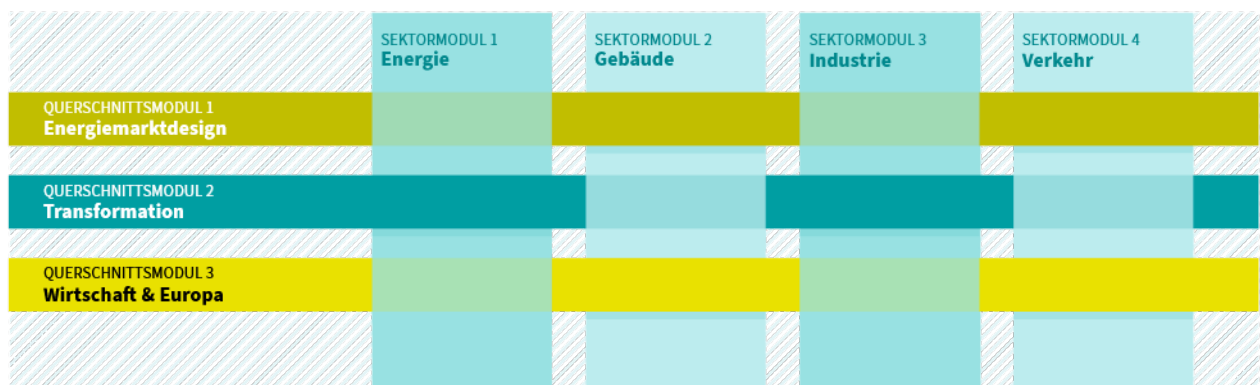
Im Querschnittsmodul „Energemarktdesign“ standen Möglichkeiten einer grundlegenden **Neuordnung der Rahmenbedingungen** im Fokus, damit Klimaneutralität durch eine

Systemoptimierung möglichst kosteneffizient erreichbar ist und klimaneutrale emissionsmindernde Pfade marktbasiert angereizt werden.

Die Transformation zur Klimaneutralität ist nicht nur eine technische oder ökonomische Frage, sie ist auch eine zentrale gesellschaftliche Herausforderung. Daher müssen Ansätze aus Geistes- und Sozialwissenschaften berücksichtigt werden. Das Querschnittsmodul „Transformation“ beschäftigte sich mit diesen nicht-technischen **transformatorischen Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität**.

Das Energiesystem ist eingebettet in **das europäische Wirtschafts- und Rechtssystem**. Europäische Rahmensetzungen haben wachsenden Einfluss auf die nationale Politik. Der European Green Deal, mögliche CO₂-Grenzausgleichsmechanismen (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) oder die europäische Industriepolitik sind für die Erreichung der nationalen Klimaziele maßgeblich, sie wurden im Querschnittsmodul „Wirtschaft & Europa“ analysiert und diskutiert.

Abb. 3 Projektstruktur



Bearbeitung in zwei Phasen: erste Ableitungen und vertiefende Weiterentwicklungen

Die **dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität** umfasste zwei Phasen. In Phase 1 wurden ein ambitioniertes Referenzszenario sowie ein Zielszenario (Treibhausgasneutralität bis 2050) aufgestellt. In den Sektormodulen wurden dazu erste Transformationspfade entwickelt sowie mögliche Maßnahmen und spezifische Herausforderungen diskutiert.

Mit diesen in den Sektormodulen entwickelten Transformationspfaden wurde von den Gutachterinnen und Gutachtern eine erste Modellierung vorgenommen. Die dabei ermittelten Modellierungsergebnisse dienten als Grundlage für die Diskussion über mögliche Anpassungen der Modellierung in Phase 2. Anpassungsbedarf im Sinne eines gesteigerten Ambitionsniveaus hat sich beispielsweise durch die Verschärfung der Klimaziele im neuen Klimaschutzgesetz 2021 ergeben.

Die Modellierung wurde in Phase 2 umfangreich überarbeitet und angepasst, um die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen, neue Erkenntnisse zu erzielen und Fragen aus der ersten Projektphase zu adressieren.

Drei grundlegende Neuerungen haben sich in dieser zweiten Phase ergeben:

- Nach der Novelle des Klimaschutzgesetzes waren die bisher modellierten Szenarien nicht mehr zielerreichend. Es erfolgte eine Fokussierung auf das **neue Hauptszenario KN100**. Hierzu wurde das bereits vorgesehene beschleunigte Szenario angepasst, um Treibhausgasneutralität 2045 und die Sektorziele 2030 zu erreichen.
- Um die in Phase 1 aufgeworfenen Fragestellungen zu untersuchen und insbesondere Spannungsfelder im Hinblick auf die Marktdurchdringung ausgewählter Technologien auszu-leuchten, wurden vier **Pfadausprägungen** modelliert. Diese Pfadausprägungen sind als „erweiterte Sensitivitäten“ zu verstehen, die einen breiten Lösungsraum abdecken können. Es wurden die Pfadausprägungen „Efficient Electrons“, „More Electrons“, „Efficient Molecules“ und „More Molecules“ modelliert.

- Im Einvernehmen von Projektkonsortium, Projektpartnern und Beirat wurde entschieden, mit einem zielerreichenden Hauptszenario und erweiterten Sensitivitäten zu arbeiten. Zudem wurde ein separater, nicht modellierter **Innovationsdiskurs** begonnen. Er sollte Optionen prüfen, Klimaneutralität noch schneller zu erreichen.

In Phase 2 wurden zudem der Fachdiskurs zur Erarbeitung von Lösungsansätzen und die Erarbeitung von Empfehlungen zur Erreichung der Klimaziele fortgesetzt.

Weitere Gutachten im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität

Im Projektverlauf wurden einige Themenkomplexe und Fragestellungen identifiziert, die eine intensivierte Betrachtung benötigen. Hierzu wurden verschiedene Kurzgutachten und weitere Analysen in Auftrag gegeben. Das EWI führte eine „Detailbetrachtung zur Gas- und Wasserstoffinfrastruktur“ sowie eine „Analyse der Versorgungssicherheit in Extremwettersituationen“ durch, welche in die Gesamtmodellierung eingeflossen sind.

Eine Analyse des Netzausbaubedarfs der Stromnetze im modellierten Szenario KN100 wurde von der ef.Ruhr GmbH durchgeführt. Die Stromnetzmodellierung lieferte neben Erkenntnissen zum Netzausbau auch relevante Parameter für die volkswirtschaftliche Analyse des EWI.

Darüber hinaus erfordert das Ziel der Klimaneutralität eine strukturierte Befassung mit den Themen Negativemissionen und Senken. Hierzu wurden von der Prognos AG zu „Technischen CO₂-Senken“ und vom Öko-Institut zu „Natürlichen Senken“ Kurzgutachten erstellt, um diese Themenfelder aufzubereiten.

Das Öko-Institut modellierte im Rahmen der dena-Leitstudie außerdem den LULUCF-Sektor. Die Modellierung des LULUCF-Sektors war eng an die Gesamtmodellierung angedockt, da beispielsweise die Biomasseverfügbarkeiten eng mit der Entwicklung natürlicher Ökosysteme verbunden sind.

Ein Bedarf an einer zusätzlichen wissenschaftlichen Befassung wurde weiterhin im Bereich der „Innovativen Energietechnologien“ gesehen. Hierzu hat das Fraunhofer ISE ein Kurzgutachten erstellt.

Modellierung und Szenarien der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität

Für die Modellierung wurden in den drei Verbrauchssektoren Gebäude, Industrie und Verkehr exogene Transformationspfade bottom-up definiert, also unter Einbeziehung des Partnerkreises mit Vertreterinnen und Vertretern der verschiedenen an der Umsetzung beteiligten Branchen. Diese Pfade zeichnen sich beispielsweise durch Annahmen und Prognosen zu den Entwicklungen von Technologien, Verbräuchen und Innovationen aus.

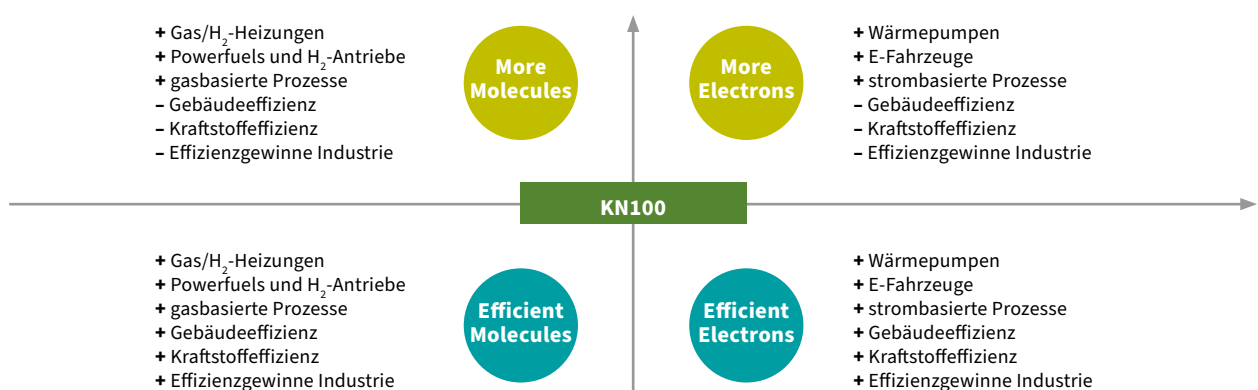
Ausgangspunkt war die Festlegung von Rahmendaten wie der industriellen Produktionsmengen, der Verkehrsleistung im Güter- und Personenverkehr, der Entwicklung der Wohnfläche oder der Bevölkerungsentwicklung. Weiterhin wurde die zukünftige Entwicklung von Innovationen diskutiert, insbesondere die Marktreife und die möglichen Kosten neuer Technologien wie beispielsweise der wasserstoffbasierten Stahlerzeugung, Elektroautos oder Hochtemperaturwärmepumpen. Diese Rahmendaten wurden aus wissenschaftlichen Quellen abgeleitet und im Diskurs mit den verschiedenen Stakeholdern im Partnerkreis und Beirat, den Gutachterinnen und Gutachtern und der dena erörtert und final durch die Gutachterinnen und Gutachter festgesetzt.

Aus den definierten Transformationspfaden resultierten in der Folge Bedarfe nach Energieträgern und Energiemengen. Die Energiesystemmodellierung des EWI ermittelte darauf aufbauend die kostenoptimierte Bereitstellung dieser Energiebedarfe.

Für die Modellierung wurden verschiedene exogene Annahmen und Parameter durch Diskussionen mit dem Partnerkreis validiert, beispielsweise die Entwicklung von Investitionskosten und Flächenpotenzialen für erneuerbare Energien oder die Investitionskosten von Elektrolyseuren.

Das **Hauptszenario Klimaneutralität 100 (KN100)** berücksichtigt die Sektorziele für das Jahr 2030 gemäß Klimaschutzgesetz 2021 und erreicht Treibhausgasneutralität im Jahr 2045. Bestehende gesetzliche Vorgaben wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz oder die Nationale Wasserstoffstrategie sind mit einbezogen. Zusätzlich wurden in **vier Pfadausprägungen** Abweichungen von ausgewählten Annahmen des Hauptszenarios untersucht, um den Lösungsraum zur Erreichung von Klimaneutralität besser zu verstehen. Die Untersuchung der Pfadausprägungen erfolgt in zwei Dimensionen. Zum einen wird die Effizienz in den Endverbrauchssektoren variiert. Hierzu werden bei zwei Pfadausprägungen besonders starke Effizienzanstrengungen zugrunde gelegt („Efficient ...“-Pfadausprägungen), während in den anderen Ausprägungen weniger intensive Effizienzmaßnahmen angenommen sind („More ...“-Ausprägung), weil hierdurch ein höherer Energieträgereinsatz erfolgt. Dies betrifft insbesondere die Gebäudesanierungsrate, die Kraftstoffeffizienz von Pkw und die Realisierung von Energieeffizienzpotenzialen im Industriesektor. Zum anderen wird die Marktdurchdringung von strombasierten Technologien variiert („... Electrons“ gegenüber „... Molecules“). Dies betrifft insbesondere die Marktdurchdringung von Wärmepumpen und batterieelektrischen Pkw sowie die Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie.⁹

Abb. 4 Methodik Hauptszenario und Pfadausprägungen



⁹ Eine ausführliche Darstellung der Modellierung findet sich im EWI-Gutachterbericht, 2021.

Systemgrenzen

Die Transformation eines gesamten Wirtschafts- und Gesellschaftssystems kann nie in seiner gesamten Komplexität und in vollständigem Umfang analysiert und modelliert werden. Die dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität weist daher trotz ihres ganzheitlichen Ansatzes **Systemgrenzen** auf, an welchen Vereinfachungen vorgenommen werden mussten.

Die Modellierung der dena-Leitstudie kann keine Aussagen über gesamtwirtschaftliche Effekte der skizzierten Transformation (z. B. Rückwirkungen auf Wirtschaftswachstum, Arbeitsplätze, Zinsniveau) treffen. Eine Kostenoptimierung findet in den Szenarien bei der Energiebereitstellung basierend auf den Energieverbräuchen der Endverbrauchssektoren statt. Darüber hinaus wurden die ermittelten Kosten zur Transformation des Energiesystems aus volkswirtschaftlicher Perspektive betrachtet, das heißt, die Kosten des Energiesystems wurden minimiert. Dagegen kann keine Aussage getroffen werden, ob sich Maßnahmen aus einer betriebswirtschaftlichen Perspektive für einzelne Akteure lohnen oder welche Verteilungswirkung mit den Maßnahmen einhergehen.

Die Transformationspfade der Verbrauchssektoren wurden durch die Gutachterinnen und Gutachter auf Basis von Studienrecherchen und des Diskurses in den Gremien unter Abwägung verschiedener Aspekte im Detail modelliert. Neben den reinen Kosten wurden auch Technologieverfügbarkeit, Akzeptanz, Durchdringungs- und Hochlaufzeiten und weitere Kriterien berücksichtigt. Es wurde also kein kostenoptimales Gesamtsystem bestimmt, sodass die Szenarien nicht auf die gesamtsystemische Kostenoptimalität über alle betrachteten Sektoren geprüft werden können.

Außerdem erfolgt die Analyse innerhalb der betrachteten europäischen Länder und nicht im globalen Kontext. Emissionen, die im außereuropäischen Ausland anfallen (etwa bei der Herstellung von PV-Modulen), werden nicht im Bilanzrahmen der dena-Leitstudie erfasst.¹⁰

Der Begriff der Klimaneutralität – Herausforderungen und Grenzen

Im Klimaschutzgesetz (KSG) 2021 bekennt sich die Bundesregierung zu den Zielen des Pariser Klimaabkommens und gibt das Ziel vor, bis zum Jahr 2045 in Deutschland Treibhausgasneutralität zu erreichen. Das hierin ausgedrückte Klimaschutzverständnis und die daraus abgeleiteten sektoralen Vorgaben und Instrumente sind Grundlage für alle Arbeiten im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Gleichzeitig wird die internationale Debatte betrachtet, insbesondere die EU-weite Diskussion über europäische und nationale Minderungsziele.

Der Begriff **Klimaneutralität** beschreibt den Zustand, in dem sich die Wirkungen sämtlicher anthropogenen und natürlichen temperaturbeeinflussenden Faktoren gegenseitig aufheben, sodass sich die globale Durchschnittstemperatur stabilisiert.

Netto-Treibhausgasneutralität beschreibt gemäß Klimaschutzgesetz „das Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken“.¹¹ **CO₂-Neutralität** wiederum bezieht sich in der Betrachtung lediglich auf CO₂ und lässt andere Treibhausgase (THG) außen vor. Eine ausführliche Darstellung der Begriffe geben die dena-ANALYSE Klimaneutralität¹² sowie der Anhang.

In der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität werden sowohl der Begriff Treibhausgasneutralität als auch Klimaneutralität verwendet. Streng genommen wird jedoch in der Modellierung und in der Diskussion von Maßnahmen gemäß der aktuellen Gesetzgebung lediglich Netto-Treibhausgasneutralität als Zielbild betrachtet. Dabei wird der Ausgleich nationaler THG-Emissionen aus allen Quellen und Sektoren durch **weitestgehende Minderung** menschengemachter Emissionen und den Abbau verbleibender Emissionen durch **technische und natürliche Senken** erreicht.

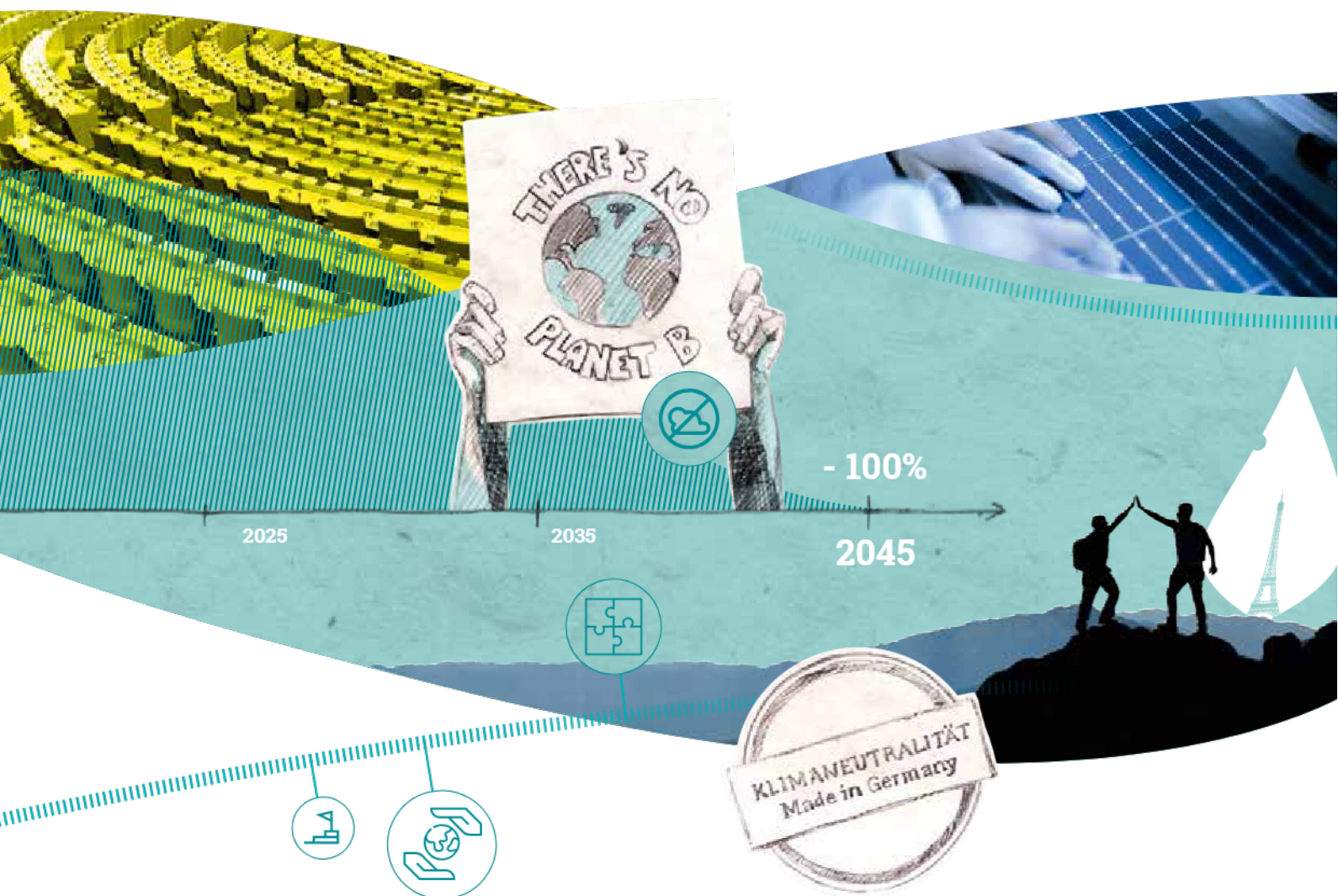
¹⁰ Eine ausführliche Darstellung der Systemgrenzen der dena-Leitstudie findet sich im EWI-Gutachterbericht, 2021.

¹¹ Bundesklimaschutzgesetz (KSG), 2019.

¹² Zum Begriff der Klimaneutralität siehe Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020a sowie die ausführliche Darstellung am Ende des hier vorliegenden Berichts.

1 Gesamtstrategie

**Welche Anforderungen
muss eine integrierte
Gesamtstrategie für
Klimaneutralität erfüllen?**



Klimaneutralität braucht eine ganzheitliche politische Betrachtung, um die beispiellose gesamtgesellschaftliche Transformation zu ermöglichen

Die Ziele sind gesetzt. Klimaneutralität soll in Deutschland bereits im Jahr 2045 erreicht sein. Die Zeit drängt also, von den Ziel-Diskussionen in die konkrete Umsetzung überzugehen. Im Gegensatz zu Fragen nach Zieljahren und Ambitionen wurde der Frage nach dem „Wie“ bisher zu wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Klar ist: Die Klimaziele werden nur mit einer beispiellosen und gesamtgesellschaftlichen Anstrengung zu erreichen sein.

Die Transformation zur Klimaneutralität betrifft jeden Lebensbereich und jedes politische Ressort. Die Energiewende ist als Querschnittsaufgabe jedoch nicht allein mit einer Verteilung auf verschiedene Bundesministerien mit ihrer eigenen Sicht und eigenen politischen Agenda anzugehen. Manche Politikinstrumente für zentrale und zeitkritische Fragen werden hierbei in der Ressortabstimmung zerrieben oder es geht wertvolle Zeit verloren. Darüber hinaus können richtige Ziele für den einen Sektor oder Politikbereich nicht vorhergesehene Wechselwirkungen mit anderen Sektoren haben. So könnte beispielsweise die sektorspezifische Erarbeitung von Sofortmaßnahmen durch den im Klimaschutzgesetz angelegten Monitoringprozess für Konflikte und Ineffizienzen mit Blick auf erforderliche integrierte Ansätze für Energie- und Klimapolitik sorgen.

Klimaneutralität braucht daher eine ganzheitliche politische Betrachtung, in der verschiedene Politikfelder – insbesondere Energie-, Umwelt-/Klima- und Wirtschaftspolitik – integriert und koordiniert werden. Darüber hinaus muss eine konsistente Betrachtung und Koordination der politischen Ebenen von der kommunalen Ebene bis zur Europapolitik und zu internationalen Institutionen erfolgen. Diese unbedingt erforderliche integrierte Betrachtung, die schon 2017/18 in der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende herausgearbeitet wurde, kann als „politi-

sche Sektorkopplung“ beschrieben werden. Sie bedarf adäquater Governance-Mechanismen, um die mit der Transformation

verbundenen Unsicherheiten zu reduzieren, Aufgaben eindeutig zu identifizieren und Verantwortungen klar zu benennen.

Eine „politische Sektorkopplung“ muss Energie-, Klima- und Wirtschaftspolitik durch eine adäquate Governance integrieren.

Klimaneutralität braucht eine robuste Planung mit hinreichend Flexibilität angesichts

der heute längst nicht vollständig zu überblickenden Entwicklungen in den kommenden Jahrzehnten. Sie bedarf auch einer viel stärkeren kommunikativen Begleitung mit Blick auf die jeweiligen Einzelmaßnahmen, aber auch hinsichtlich der Bedeutung insgesamt. Nur so entstehen Vertrauen, Partizipation und Akzeptanz.

Eine Gesamtstrategie für Klimaneutralität besteht daher – erstens – aus einem Neudenken in der strategischen Ausrichtung unter Beachtung einer **robusten Planung**. Das sektorübergreifende Denken soll – zweitens – durch eine **koordinierte Governance** gesichert werden. Dabei sollte die Politik – drittens – alle klimapolitischen Maßnahmen auch unter wirtschaftspolitischen Aspekten betrachten und Klimaschutz und Energiewende als **industriepolitische Chance** sehen. Klimaneutralität erfordert dabei – viertens – eine ehrliche Diskussion und die Entwicklung eines **gesamtgesellschaftlichen Konsenses**.

1.1 Mögliche Zielverfehlungen durch eine robuste Planung adressieren

Die gesetzlich verankerten Ziele für Klimaneutralität sind in jedem Sektor und jedem Lebensbereich enorm anspruchsvoll. Modellierungen wie in der dena-Leitstudie zeigen auf, welche technologischen Entwicklungen benötigt werden und wie schnell der Markthochlauf neuer Technologien erfolgen muss. Weiterhin wird ersichtlich, dass der Ausbau erneuerbarer Energien vervielfacht, der Netzausbau beschleunigt und die Sanierungsraten weit über das aktuelle Niveau steigen müssen.

Bei all diesen Aspekten und vielen weiteren stellen sich Fragen bezüglich der Realisierbarkeit. Es bedarf passender Rahmenbedingungen, günstiger Entwicklungen, ausreichender Investitionen, Weitsicht und Urteilskraft, damit die einzelnen Stellschrauben hinreichend auf Klimaneutralität eingestellt und abgestimmt sind und das erforderliche Niveau 2045 oder vielleicht sogar früher erreicht werden kann.

Bei der Übertragung von Erkenntnissen zu möglichen Transformationspfaden aus einer Modellierung in konkrete politische Instrumente zur Umsetzung dieser Pfade ist zu berücksichtigen,

Robust planen bedeutet, die bestmöglichen Voraussetzungen zur Zielerreichung trotz hoher Unsicherheit zu schaffen.

dass solche in einer Modellierung ermittelten Pfade lediglich die untere Grenze abbilden, ab der eine Zielerreichung möglich ist. Jegliche Verfehlung dieser theoretischen Mindestpfade an einer Stelle gefährdet jedoch

unmittelbar die übergeordnete Zielerreichung. Die tatsächliche Umsetzung sollte daher darauf abzielen, die modellierten Pfade mit größtmöglicher Sicherheit mindestens zu erreichen. Eine **robuste Planung** sollte gegebenenfalls auch auf eine „Übererfüllung“ der Mindestpfade abzielen, damit einzelne Zielverfehlungen abgefedert werden können. Das bedeutet nicht, dass eine systematische Überplanung über den ganzen Zeitraum erfolgen soll. Aber insbesondere für die frühe Phase dieser anspruchsvollen Transformation wird es wichtig sein, bei den Debatten über die Möglichkeit des Hochlaufs von Wasserstoffanwendungen, der Erhöhung von Sanierungsraten oder einer großskaligen technischen CO₂-Entnahme in diesem Jahrzehnt die Weichen so zu stellen, dass jeder dieser Ansätze den jeweils größtmöglichen Beitrag zu einer schnellen Erreichung der Klimaziele leisten kann. Sollten günstige Rahmenbedingungen dazu führen, dass Klimaneutralität früher als 2045 erreicht wird, ist es umso besser.

Robust heißt auch, dass den erforderlichen Entwicklungen neuer Technologien sowie der Skalierung von bereits etablierten Technologien Raum gegeben werden muss. Derartige Entwicklungen sind nicht linear. Eine Festlegung auf langfristig im Voraus gesetzte Jahresziele ist wichtig, um die langfristige Planungssicherheit zu erhöhen und die vom Bundesverfassungsgericht angemahte faire Verteilung der Lasten über Generationen hinweg sicherzustellen. Andererseits können sektorspezifische Jahresziele die Gefahr mit sich bringen, durch zu starken Fokus auf die kurzfristige Erreichung von Zwischenzielen die mittel- und langfristig erforderlichen Entwicklungen zu konterkarieren. Damit wird die übergeordnete Zielerreichung eher erschwert. Vor diesem Hintergrund sollte das KSG novelliert werden, um einerseits mehr Flexibilität zu bieten und andererseits die Zielerreichung in bestimmten zeitlichen Etappen nicht zu gefährden.

Eine robuste Vorgehensweise ist möglicherweise nicht der volkswirtschaftlich kostengünstigste Weg. Robustheit soll die Erreichung der Klimaziele sicherstellen und dient damit zur Abwendung unmittelbarer Gefahren für die Gesellschaft. Hierfür müssen möglicherweise mehrere Wege als Erfüllungsoptionen zur Zielerreichung gleichzeitig offengehalten werden. Dies wird und darf auch Geld kosten. Eine robuste Planung sollte daher als ein „Sicherheitsaufschlag“ verstanden werden, der mit Blick auf die unkalkulierbaren Folgen eines ungebremsten Klimawandels zu rechtfertigen ist. Als Grundprämisse der robusten Strategie sollte danach jedoch auch auf Effizienz geschaut werden. Trotz größtmöglicher Berücksichtigung aller möglich erscheinenden Technologien und ihrer Pfade muss also sichergestellt

Robustheit benötigt in gewissem Rahmen auch zusätzliche Investition als „Sicherheitsaufschlag“ zum Offenhalten mehrerer Erfüllungsoptionen.

werden, dass sich langfristig die beste Lösung durchsetzt und die Kosteneffizienz gesteigert wird. Förderinstrumente, die für die Anfangsphase benötigt werden, sollen daher in einen wettbewerblichen Markt überführt werden, der für Effizienz sorgen kann.

Beispielsweise kann nach ersten Pilotierungen zur Erzielung von Lerneffekten über Quotenregelungen ein frühmarktmöglicher Wettbewerb entstehen, sodass sich anschließend ein effizienter Markt etablieren kann.

Bei allem Bedürfnis nach Planungssicherheit und einem langfristig stabilen regulatorischen Rahmen: Die Wirkung von Maßnahmen und Instrumenten muss laufend evaluiert und

Laufende Evaluierung der Instrumente und ihre dynamische Anpassung dürfen kein Widerspruch zu Investitions- und Planungssicherheit sein.

der Instrumentenmix an die Zielerreichung angepasst werden. Dabei muss die Politik in der Lage sein, dynamisch und flexibel auf Veränderungen zu reagieren, ohne die Investitionssicherheit zu beeinträchtigen. Sektorübergreifende marktwirtschaftlich orientierte Maßnahmen sollten dabei generell vorrangig gegenüber der Einführung sektorspezifischer Maßnahmen geprüft werden.

Dies gilt besonders angesichts der ganz realen Gefahr der Nichterreichung nationaler bzw. sektorspezifischer Klimaziele. Bei allen Chancen, die sich durch die Transformation zur Klimaneutralität für die Akteure ergeben, muss Politik sich auch damit auseinandersetzen, dass Ziele nicht oder nicht zu dem

gewünschten Zeitpunkt erreicht werden können, wenn sich die Umsetzung der verschiedenen erforderlichen Maßnahmen verzögert oder etwa die Senkenleistung des LULUCF-Sektors aufgrund von Klimaveränderungen geringer ausfällt (siehe Kapitel 10 „Natürliche Ökosysteme und Technische Senken“).

Robuste Planung ermöglicht zudem eine **Dynamisierung von Instrumenten** unter Wahrung von **Investitions- und Planungssicherheit** für alle Akteure. Dies kann gelingen, wenn verschärfende Maßnahmen zur Reaktion auf Zielverfehlung frühzeitig definiert werden, sodass für die handelnden bzw. investierenden Akteure die Planungssicherheit gewährleistet bleibt. Hierfür sollte durch die Bundesregierung frühzeitig vorgezeichnet werden, welche Maßnahmen bei der Verfehlung bestimmter Zwischenziele (etwa Reduktion von Emissionen, Energiebedarfen etc.) ergriffen werden. Indem die Bundesministerien frühzeitig transparent offenlegen, wie auf Zielverfehlungen reagiert wird, können alle Marktakteure mögliche Entwicklungen (und „berechenbaren Unsicherheiten“) einplanen und sich auch auf schärfere Maßnahmen bei ungünstigen Dynamiken einstellen.

1.2 Governance für Energiewende und Klimaschutz schärfen

Die bestehenden Governance-Strukturen für Energiewende und Klimaschutz haben ein erhebliches Verbesserungspotenzial und bedürfen einer sorgfältigen Überprüfung. Angesichts der beschriebenen Erforderlichkeit eines robusten Rahmens geht es dabei insbesondere um die Verbesserung der Prozesse zur beschleunigten Umsetzung der erforderlichen Maßnahmen.

Für die Erreichbarkeit der ambitionierten Ziele bereits für das Jahr 2030 spielt der Faktor Zeit eine erhebliche Rolle. Zeitintensive Umbauprozesse von Ministerien oder dergleichen sollten unter diesem Gesichtspunkt kritisch geprüft werden. Daher bedürfen insbesondere bestehende Prozesse, die durch ressortübergreifende Zuständigkeiten entstehen, einer Beschleunigung und Anpassung in ihrer Governance.

Neue Formen der Governance können zu einer langfristigeren Planungssicherheit und konsistenten politischen Zielsetzungen führen. Gegenwärtig sind die Kompetenzen für Klimapolitik in Deutschland auf eine Vielzahl von Ministerien, Behörden und Politikebenen verteilt. Auch die fachliche Expertise ist verteilt auf Ressorts mit unterschiedlichsten Zuständigkeiten. Manche wichtigen Maßnahmen werden in der Koordination zwischen Ressorts oder aus parteipolitischem Kalkül zerrieben. Angesichts der großen Spannweite einer integrierten Energie- und Klimapolitik und der Vielfältigkeit divergierender Interessen

wird sich diese Situation auch in Zukunft nicht vollständig auflösen lassen.

Entscheidungsprozesse können aber dann beschleunigt werden, wenn die Umsetzung des politischen Kernziels und der

Beschleunigung braucht eine klare Zuständigkeit und eine gute Abstimmung von Einzelmaßnahmen.

Transformation des Energiesystems eine klare Federführung und Zuständigkeit erfährt, die sicherstellt, dass Einzelmaßnahmen aufeinander abgestimmt sind, die gesetzten Ziele langfristig

nachverfolgt werden und die systematische Operationalisierung umgesetzt wird.

Die nationale Kraftanstrengung Klimaneutralität benötigt daher auch ein **sichtbares Gremium für die Koordination**. So eine zentrale, koordinierende Aufgabe war ursprünglich bereits durch das „Klimakabinett“ angelegt. Für die jetzt anstehenden, besonders anspruchsvollen Aufgaben in der politischen Steuerung kann diese Funktion verstetigt und unter Einbeziehung bereits vorhandener institutioneller Kapazitäten (Organisationen und Einrichtungen verschiedener Bundesressorts) strukturell gefestigt werden. Eine zentrale Steuerungsinstanz für Klimapolitik könnte im Bundeskanzleramt angesiedelt sein.

Das Kanzleramt als ausführendes Organ der Richtlinienkompetenz der Bundeskanzlerin oder des Bundeskanzlers hat die weitest möglich herausgehobene Stellung. Es ist in seiner ressortübergreifenden Funktion prädestiniert für die Aufgabe der Koordination der Klimapolitik und die zeitnahe Auflösung entstehender Konflikte im Rahmen der ressortübergreifenden Zusammenarbeit. Damit einher ginge eine klarere Verortung der Verantwortung für die Umsetzungsgeschwindigkeit verschiedener Prozesse. Energie- und Klimapolitik würden damit zu einer Fokusaufgabe der Kanzlerin oder des Kanzlers, ausgestattet mit erweiterten Kapazitäten, beispielsweise der Möglichkeit zur direkten Einbindung bereits bestehender Organisationen, Agenturen und Institutionen der Bundesregierung, die den verschiedenen Ressorts zugeordnet sind.

Vor allem der Bundestag hat als demokratisch höchstlegitimiertes Gremium in Deutschland eine herausgehobene Rolle bei der Transformation zur Klimaneutralität. Dies muss auch in der Arbeitsweise und Organisation des Gremiums reflektiert werden. Zur Stärkung der demokratischen Entscheidungskultur sollte ein neuer **parlamentarischer Ausschuss „Klimawende“** eingerichtet werden. Ergänzend sollten grundlegende Fragen

Das Zusammenspiel aus Klimakabinetts, parlamentarischen Ausschuss und Enquete-Kommission schafft höchste Legitimität und gesellschaftliche Verankerung.

bezüglich der notwendigen Transformationspfade in Richtung Klimaneutralität in einer **übergreifenden Enquete-Kommission** diskutiert und Grundlagen für eine von allen getragene Positionierung entwickelt werden. Letzteres könnte auch einen erheblichen Beitrag zu einer

verbesserten Kommunikation der Energiewende leisten, da eine solche Enquete-Kommission unter Einbeziehung einer Vielzahl gesellschaftlicher Akteure und unter entsprechender medialer Begleitung arbeitet.

Bessere Governance entsteht vor allem auch durch ein **koordiniertes Vorgehen von Bund, Ländern und Kommunen** und durch klare Verantwortlichkeiten und Kompetenzen für die

jeweiligen Aufgaben und Rollen. So könnte beispielsweise ein **regelmäßiger und verbindlicher Austausch** zum Abgleich der bundes- und landespolitischen Konzepte erfolgen. Dabei würden Konsistenzen und Dissonanzen sichtbar und es entstünde die Möglichkeit, die Pfade jeweils noch besser als bereits heute aufeinander abzustimmen. Gleiches gilt für das Zusammenspiel von Ländern und Kommunen. Nicht nur die verschiedenen Bundesländer haben jeweils eigene Klimaziele, auch eine Vielzahl von Kommunen haben sich ambitionierte Klimaziele gesetzt (siehe Exkurs „Kommunen als Multiplikatoren und Gestalter von Klimaschutz und Energiewende“). In der Regel besitzen Kommunen aber nicht die erforderlichen Kompetenzen, Ressourcen und Zuständigkeiten für die Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele. Eine klarere Herausarbeitung und Stärkung der jeweiligen Kompetenzen und Verantwortlichkeiten könnten zu einem insgesamt stimmigeren Prozess auf dem Weg zur Zielerreichung führen.

Auch andere innovative Ansätze gilt es im Rahmen einer Überarbeitung der Governance-Strukturen zu prüfen. So kann der von der Bundesregierung im Sommer 2021 skizzierte **Klimaclub** eine gute Ergänzung im internationalen Diskurs sein, der die klimapolitischen Vorhaben der EU auf einer übergeordneten Ebene der „willigen Staaten“ mit ähnlichen Ambitionen und Herausforderungen unterstützt. Auch das Zusammenwirken der verschiedenen Agenturen, Ämter und Organisationen der Bundesregierung könnte in der Folge einer entsprechenden Analyse noch zielorientierter ausgerichtet sein und weitere grundsätzliche und mittel- und langfristig erforderliche Aufgaben zur Steuerung und Koordinierung, aber auch zur strategischen und konzeptionellen Entwicklung zentraler Fragen und Aufgabenstellungen in den Bereichen Energie- und Klimapolitik übernehmen.

Denkbar ist es überdies, dass Einzelprojekte von herausgehobener Bedeutung (wie beispielsweise ein möglicherweise von der nächsten Bundesregierung beschlossener beschleunigter Ausstieg aus der Kohleverstromung) einer unmittelbaren Projektzuständigkeit mit einer klar verantwortlichen Person/Organisation zugewiesen werden.

1.3 Klimaneutrales Wirtschaften als Chance begreifen

Die auf der Nutzung fossiler Rohstoffe basierende Wirtschaft befindet sich im Umbruch: Sie wird bald der Vergangenheit angehören und von einem erneuerbaren, klimaneutralen System abgelöst. Der Übergang zu neuen, nachhaltigen und

klimaneutralen Geschäftsmodellen ist daher für Unternehmen eine wirtschaftliche Notwendigkeit, aber auch eine große Chance für neues Wachstum und neue Wertschöpfung.

Energiewende und Klimaschutz sind bereits jetzt ein Konjunkturprogramm. Teilweise hohe Investitionsausgaben sorgen dafür, dass die Wirtschaft in diesen Bereichen wächst und die

Deutschland hat das Potenzial, in Zukunftstechnologien Weltmarktführer zu werden. „Klimaneutralität Made in Germany“ bietet große industrielle politische Wachstumschancen.

Wirtschaftskraft steigt. „Green Tech“ erzielt in Deutschland jährliche Wachstumsraten von 8 Prozent. Das aktuelle Marktvolumen von 392 Milliarden Euro soll sich laut „GreenTech Atlas“ bis 2030 auf 856 Milliarden Euro mehr als verdoppeln.¹ Diese Entwicklung lässt sich nur verstetigen, wenn Fehler aus der Vergangenheit

(wie etwa bei der Solarbranche) nicht wiederholt und Rahmenbedingungen für Industrie und Wirtschaftspolitik für klimaneutral und grüne Geschäftsmodelle verbessert werden.

Deutschland hat die Chance, seine Position als **führender Technologieexporteur** durch wegweisende Zukunftstechnologien etwa in der Wasserstoffwirtschaft und bei Negativemissionstechnologien bzw. im Bereich Green Tech insgesamt neu auszurichten und auszubauen. Die neu entstehende „Negativemissionswirtschaft“ kann potenziell so groß werden wie die heutige Gas- und Mineralölwirtschaft, von enormen Wachstumskurven der Wasserstoffwirtschaft wird mittlerweile schon fest ausgegangen.² Ein innovationsfreundliches Umfeld und ein klares Bekenntnis zu diesen Zukunftsbranchen sind notwendig, um die hierfür notwendigen Technologien in Deutschland und Europa zu entwickeln und zu skalieren. Elektromobilität, innovative Heiztechnologien, klimaneutrale Chemikalien und andere emissionsarme Produkte sowie die hierfür notwendigen Erzeugungstechnologien bilden auch neue potenzielle Absatzmärkte für innovative Produkte und Prozesse für „Klimaneutralität Made in Germany“. Damit Deutschland in dieser global stattfindenden Entwicklung eine wirtschaftlich führende Rolle übernehmen kann, muss die Bundesregierung die notwendigen Rahmenbedingungen aktiv gestalten (siehe Kapitel 3 „Innovation“).

1.4 Ein gemeinsames Narrativ entwickeln

Zu einer ehrlichen Auseinandersetzung mit dem Klimawandel in Deutschland, in der EU und global gehört auch die Einsicht: Wer Klimaschutz jetzt für zu herausfordernd, zu eingreifend und zu teuer hält, der muss auch wissen, was es in den zukünftigen Dekaden kostet und welche Einschränkungen es mit sich bringt, wenn die Staatengemeinschaft scheitert und die Ziele nicht erreicht werden.

Die nun notwendigen Veränderungen, Investitionsentscheidungen und Transformationen benötigen vor allem Verlässlichkeit in der Ausrichtung und einen langen Atem. Dass dabei zwischen politischen Akteuren intensiv über die konkreten Wege zur Umsetzung der Energiewende diskutiert wird, ist unabdingbar. Denn nur im Wettstreit der Ideen entstehen Innovationen und die für das Gemeinwohl insgesamt bestmöglichen und belastbaren Pfade. Gleichzeitig muss jedoch sichergestellt sein, dass das übergeordnete Ziel gesamtgesellschaftlich akzeptiert wird und gleichzeitig über die unterschiedlichen Optionen zur Zielerreichung gemeinsam gestritten werden kann.

Ein breites Spektrum an Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft muss eingebunden und „mitgenommen“ werden, um einen **gesamtgesellschaftlichen Konsens** über das Ziel zu erreichen. Auch grundsätzlich unterschiedliche Vorstellungen auf dem Weg zur Zielerreichung müssen akzeptiert und

erlaubt sein. Der gegenwärtige Diskurs in Deutschland wird diesem Anliegen nicht ausreichend gerecht. Dies erfordert das Ver-

Ein breiter, gesamtgesellschaftlicher Konsens über Klimaneutralität als gemeinsames Ziel ist Basis für notwendige Diskussionen über das „Wie“.

trauen, dass das allgemeine Ziel allseitig akzeptiert ist. Ohne ein solches Vertrauen werden Diskussionen schwierig. Es droht der Verlust von Engagement und Zeit.

Kritische Diskussionen müssen unter Einbeziehung der verschiedensten Sichtweisen

versachlicht werden. Aufgeladene und unsachliche Diskussionen schaden dagegen der Akzeptanz für die Energiewende. Ein gemeinsamer Konsens über alle Parteien und gesellschaftlichen Gruppen und Akteure hinweg bedarf der Verständigung auf gemeinsame Grundnenner. So wie die soziale Marktwirtschaft zu einem gemeinsamen gesellschaftlichen Narrativ in Deutschland und darüber hinaus geworden ist, so muss auch der Weg zur Klimaneutralität auf einem solchen gemeinsamen Narrativ beruhen (siehe Kapitel 4). Die Einigung auf zentrale Prinzipien ist auch deshalb so entscheidend, weil sie Stabilität über Legislaturperioden hinweg verspricht und damit langfristige Investitionsentscheidungen und transformatorische Verhaltensänderungen ermöglicht und sichert.

¹ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), 2021.

² Swiss Re Institute, 2021.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode



AUFGABE 1

Das Ziel „Klimaneutralität“ erfordert robuste Planung mit erhöhten Sicherheitspuffern

Die Bundesregierung sollte der Erreichung des Ziels Klimaneutralität und der auf dem Weg dorthin gesetzten THG-Minderungsziele ebenso hohe Priorität einräumen wie anderen Zielen zur Abwendung unmittelbarer Gefahren für die Gesellschaft. Zur Sicherstellung der Zielerreichung sollte für zentrale Pfade bereits bei der Planung von Maßnahmen und politischen Instrumenten definiert werden, welche Zusatzmaßnahmen im Falle einer zu geringen Minderungsdynamik getroffen werden. Dabei müssen teilweise auch höhere Kosten in Kauf genommen werden, um die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung zu erhöhen.

Die Bundesregierung sollte sich insbesondere nicht zu stark auf einzelne Pfade oder aus heutiger Sicht unsichere Faktoren verlassen. In Ergänzung sollten die Planungen auch alternative bzw. zusätzliche Möglichkeiten zur Zielerreichung vorsehen. Dabei sollten beispielsweise auch die zukünftigen Energiebedarfe für Negativemissionstechnologien in die Ausbaupfade und die geplanten Strombedarfe integriert werden.

Zur Erstellung einer robusten Planung sollte die Bundesregierung zudem explizit auch Modellierungsszenarien auswerten lassen, in denen die nationalen Klimaziele nicht erreicht werden, um hieraus beispielsweise warnende Frühindikatoren abzuleiten.



AUFGABE 2

Integrierte Technologie- und Industriestrategie entwickeln, um Technologieführer für Klimaneutralitätstechnologien zu werden

Die Bundesregierung sollte die wirtschaftspolitischen und unternehmerischen Chancen von Energiewende und Klimaschutz stärker wahrnehmen und fördern. Hierfür wird ein gutes Marktumfeld für klimafreundliche und nachhaltige Geschäftsmodelle und ein Werben für Green-Tech-Produkte aus Deutschland auch international benötigt (siehe Kapitel 2 „Marktdesign“ und Kapitel 3 „Innovation“).

Hierzu sollten im Rahmen einer integrierten Technologie- und Industriestrategie die zur Erreichung der globalen Klimaziele notwendigen Technologien und der derzeitige Entwicklungsstand der deutschen Akteure bzw. die Position auf dem Weltmarkt ermittelt werden, um hieraus Potenziale und Möglichkeiten der konkreten Exportförderung abzuleiten.



AUFGABE 3

Governance für Energiewende und Klimaschutz schärfen

Die Bundesregierung sollte klare demokratische Steuerungsmechanismen einrichten bzw. stärken, um damit der querschnittlichen Funktion von Klima-, Energie- und Wirtschaftspolitik gerecht zu werden.

Insbesondere sollte das „Klimakabinett“ als sichtbares Gremium für die Koordination zwischen den betroffenen Bundesressorts unter Führung des Bundeskanzleramts gestärkt und die Steuerungsfunktion des Kanzleramts insgesamt organisatorisch ausgebaut und verankert werden. In einem regelmäßigen Bund-Länder-Dialog sollten bundespolitische Konzepte mit denen der Bundesländer abgeglichen werden, um eine konsistente Klimapolitik zu ermöglichen.

Der Bundestag sollte in Fragen von Klimaschutz und Energiepolitik gestärkt werden und koordinierter handeln. Hierzu sollte ein parlamentarischer Ausschuss „Klimawende“ eingerichtet werden. Ergänzend dazu sollte eine übergreifende Enquete-Kommission eingerichtet werden, in der grundlegende Ausrichtungen diskutiert und eine gemeinsam getragene Position als Basis für eine verbesserte Kommunikation erarbeitet werden.



AUFGABE 4

Klimakonsens schaffen

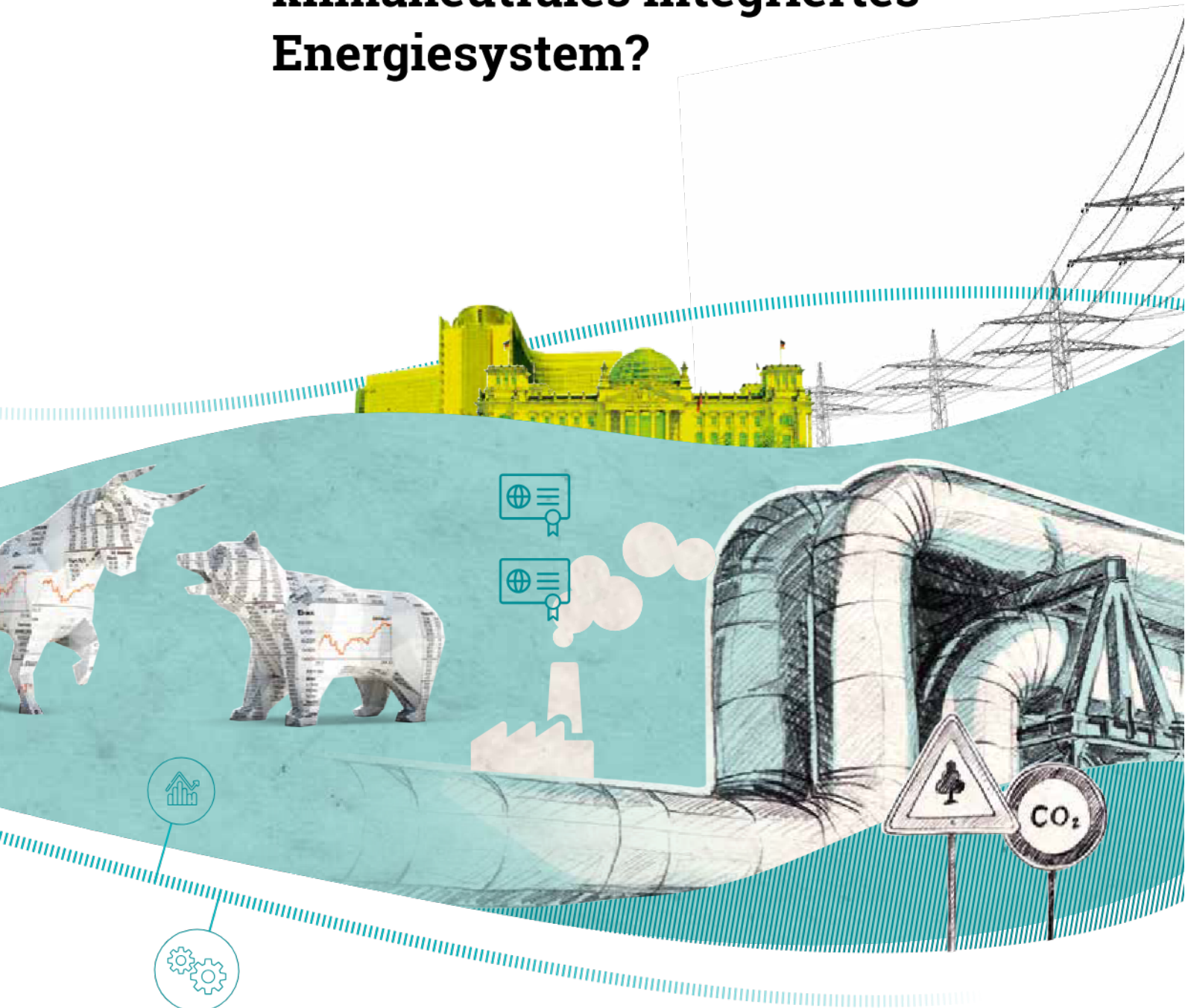
Bundesregierung und Bundestag sollten mit dem Start der neuen Legislaturperiode die kommunikative Begleitung von Energiewende und Klimaschutz deutlich ausbauen, einen gesamtgesellschaftlichen Diskursprozess initiieren und im Rahmen von entsprechenden Ausschüssen im Bundestag stärker an einem gemeinsamen Verständnis für die Pfade zur Erreichung der Klimaziele arbeiten.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- **Chancen durch aktives Changemanagement erkennen und nutzen**
(Kapitel 3 „Innovation“)
- **Eine positive gesamtgesellschaftliche Zukunftsvision**
(Kapitel 4 „Transformation“)
- **Sicherstellung der notwendigen Negativemissionen für Klimaneutralität**
(Kapitel 10 „Natürliche Ökosysteme und technische Senken“)

2 Marktdesign

**Wie wird das Energiemarkt-
design zur Basis für ein
klimaneutrales integriertes
Energiesystem?**



Die heutigen Energiemärkte sind stark segmentiert. Im zukünftigen, integrierten Gesamtrahmen ist ein Austarieren zwischen verschiedenen Anforderungen nötig

Um das Ziel Klimaneutralität zu erreichen, bedarf es einer kohärenten Ausgestaltung des Gesamtrahmens für das Energiesystem – während und nach der Transformation. Darunter sind die Marktregeln und Regulierungsvorschriften zu verstehen, die die Energieversorgung langfristig in effizienter und sicherer Weise gewährleisten. Dazu gehören aber auch Maßnahmen, die kurz- und mittelfristig die Transformation und Marktveränderung im Energie- und in den Verbrauchssektoren einleiten und sich politisch in ausreichendem Maße steuern lassen.

Die heutigen Energiemärkte sind stark segmentiert und einschränkend geregelt

Die heutigen Energiemärkte sind durch ein gewachsenes Geflecht von Rahmenbedingungen geprägt, die aus dem Frühstadium der Liberalisierung und der ersten Phase der Energiewende stammen. Sowohl die Marktstrukturen als auch die Netzregulierung im Strom- und Gassektor haben sich in vielerlei Hinsicht parallel, aber nicht integriert entwickelt. Hierdurch sind viele Regeln auf eine sektorale, nicht aber auf eine systemische Optimierung ausgerichtet; ein Beispiel hierfür ist die Anreizregulierung. Hierdurch bleiben bislang Effizienzpotenziale durch eine verstärkte Sektorkopplung ungenutzt.

Auch die Umweltregulierung verschiedener Marktsegmente ist nicht aufeinander abgestimmt. So wird beispielsweise der Energieträger Strom durch eine Steuer, verschiedene Abgaben und implizit über die Erzeugung durch den EU-Emissionshandel (Emission Trading System, ETS) belastet; andere Energieträger wie etwa Heizgas unterliegen dagegen dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) mit anderen Hebesätzen. Mit Blick auf die erforderliche Transformation ergeben sich hierdurch teilweise widersprüchliche Anreizwirkungen wie die gegenüber anderen Energieträgern deutlich stärkere Belastung von Strom mit Abgaben, Steuern und Umlagen oder die regulatorischen Hürden bei der Nutzung vorhandener Flexibilisierungspotenziale von Stromverbrauchern.

Die Bepreisung von Treibhausgasemissionen bildet die wesentliche Grundlage für ein marktbasiertes System, das langfristig zu Klimaneutralität führen soll. Während dies auf europäischer Ebene für die Energiewirtschaft und die energieintensive Industrie durch den EU-ETS umgesetzt wird, erfolgt es auf nationaler Ebene für die Sektoren Wärme und Verkehr durch das BEHG. In beiden Fällen stellen jeweils der gegenwärtige Preis für CO₂-Emissionen sowie die getroffenen Festlegungen bzw. die Annahmen und Erwartungen über dessen zukünftige Entwicklung eine zentrale Orientierungsgröße sowohl für Marktakteure als auch für politische Entscheider dar. Die unterschiedliche Ausgestaltung auf verschiedenen Ebenen hat aber Schwächen: Als nationales Instrument führt das BEHG teilweise zu innereuropäischen Verzerrungen in den betroffenen Wirtschaftssektoren.

Die Energiemärkte und die Regulierung der Energieinfrastrukturen sind wesentlich durch die EU-Rahmensetzung geprägt. Die weitere Beschleunigung und Umsetzung der Energiewende in den europäischen Mitgliedsstaaten muss daher in enger Koordination erfolgen – generell beim Aus- und Umbau der grenzüberschreitenden Energieinfrastruktur und der gegenseitigen Unterstützung bei der Versorgungssicherheit sowie insbesondere beim Aufbau der Wasserstoffwirtschaft.

Für die Gestaltung des Gesamt-rahmens ist ein Ausrastieren zwischen verschiedenen Anforderungen nötig

Die übergeordneten Zielkriterien der Energiewirtschaft sind Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Versorgungssicherheit. Auch wenn im Rahmen der Transformation zur Klimaneutralität das zweite Kriterium im Sinne des Klimaschutzes in den Vordergrund rückt, so muss der Markt- und Regulierungsrahmen auch eine sinnvolle Abwägung mit Blick auf Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit gewährleisten.

Kernelement eines auf die Erreichung von Klimaneutralität ausgerichteten Marktdesigns ist der CO₂-Preis. Die Vermeidung von CO₂ (und anderen Treibhausgasen) steht im Mittelpunkt der Anstrengungen auf dem Weg zur Klimaneutralität. Die Ausgestaltung der Bepreisung von CO₂ sollte daher auch im Mittelpunkt aller Überlegungen der Politik zur Erreichung des Ziels stehen. Damit ist explizit nicht gemeint, dass der CO₂-Preis das alleinige

Der CO₂-Preis ist Kernelement eines auf Klimaneutralität ausgerichteten Marktdesigns.

Instrument sein soll. Andere Instrumente sollten sich aber möglichst aus der Gestaltung dieser CO₂-Bepreisung ableiten bzw. diesen ergänzen. Der CO₂-Preis dient während der Transformation dazu, die

Marktdurchdringung emissionsfreier Energieträger und Anwendungen gegenüber emissionsbehafteten Optionen zu fördern und damit die THG-Emissionen zu senken.

Ziel ist im Rahmen der Transition dabei die schrittweise und letztlich vollständige Verdrängung klimaschädlicher Energieträger durch eine weiter zunehmende Verteuerung der Treibhausgasemissionen.¹ Mithilfe einer CO₂-Bepreisung könnte zukünftig auch die Erzielung von negativen Emissionen wirtschaftlich vergütet werden.

Dabei gilt es für jeden Sektor zu überlegen, ob die Bepreisung der CO₂-Emissionen von Energieträgern alleine die notwendigen

Die Flankierung mit weiteren Instrumenten ermöglicht eine Beschleunigung und spezifische Steuerung der Energiewende in den Sektoren.

Investitionen für die Umrüstung auslöst oder ob zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind. Aufgrund der Zielverschärfung ist eine dynamische Transformation erforderlich. Hierzu müssen die Anreize durch den CO₂-Preis durch flankierende Instrumente

ergänzt werden, um die Dynamik der Marktentwicklung zusätzlich zu erhöhen:

- In weiten Teilen der Industrie sind zur THG-Minderung erhebliche Investitionen in neue Verfahren und Technologien notwendig. Dabei liegen die CO₂-Vermeidungskosten jedoch kurz- bis mittelfristig noch über dem erwarteten CO₂-Zertifikatspreis. Hier bedarf es zum Ausbau emissionsarmer Technologien zusätzlicher Instrumente zur Überbrückung der bestehenden Finanzierungslücke.
- Im Falle der Wasserstoffwirtschaft geht es um den Aufbau eines neuen leitungsgebundenen Energiesektors – ein Unterfangen mit zahlreichen unternehmerischen wie regulatorischen Risiken, die durch staatliche Maßnahmen begrenzt werden müssen.
- Ein weiteres Beispiel stellt der Gebäudebereich dar, in dem durch ergänzende Instrumente wirksame Anreize für energetische Sanierungen geschaffen werden, um den vielfältigen Ausgangssituationen, Eigentumsverhältnissen und Nutzergruppen gerecht zu werden.

Besonderes Augenmerk sollte auf alle Maßnahmen gelegt werden, die Markthemmnisse beseitigen oder für ein Aktivieren und Befördern von Marktkräften sorgen. Dazu gehören z. B. Informations- und Motivationskampagnen sowie Beratungsangebote, das Einrichten von Runden Tischen zur Entwicklung von gemeinsamen Strategien über verschiedene Stakeholder hinweg, aber auch die Unterstützung der Selbstverpflichtung von Branchen z. B. durch Energieeffizienznetzwerke.

Grundsätzlich gilt es, ein System dauerhafter Subventionierung und überkomplexer Einzelregelungen zu vermeiden. Ziel ist vielmehr, Akteuren den Einstieg in eine klimaneutrale Produktions- oder Konsumweise zu ermöglichen. Mittel- bis langfristig soll der CO₂-Preis die weitere Umstellung sicherstellen. Für die Ausgestaltung von Förderinstrumenten bedeutet das, idealerweise auf marktbasierende Instrumente zurückzugreifen, um eine Überförderung zu vermeiden. Zudem sollten Instrumente mit zeitlicher

¹ Im EU-ETS unterliegen neben CO₂ auch die Emissionen anderer Gase wie Nitroxid und Perfluorkarbonat einer Bepreisung auf Basis eines Faktors, der ihre Klimawirkung zu der des CO₂ ins Verhältnis setzt.

Begrenzung genutzt werden, die bei ausreichenden CO₂-Preisen automatisch auslaufen oder ausgesteuert werden können.

Beim Einsatz der verschiedenen zusätzlich zum CO₂-Preis erforderlichen sektorspezifischen Anreiz- und Förderinstrumente sind sowohl die Anforderungen an den Bundeshaushalt als auch die

Die finanzielle Belastung sowohl der öffentlichen Haushalte als auch der Energie-nutzer ist im Blick zu behalten.

finanzielle Belastung der Energienutzerinnen und -nutzer im Blick zu behalten. Bei der Einführung der Förderinstrumente ist jeweils abzuwägen, welche Finanzierungsform am sinnvollsten ist: Bei direkten Transfers wird zumeist der

Bundeshaushalt belastet, bei Quotensystemen unmittelbarer die Energienutzenden.

Auch Auflagen durch Ordnungsrecht betreffen unmittelbar oder mittelbar den Energienutzer. Es sollte geprüft werden, ob mit Blick auf die Finanzierungserfordernisse des Staates zur Gegenfinanzierung auch neue Abgaben eingeführt werden müssen. Ein Beispiel hierfür wären Abgaben auf Standardprodukte wie Stahl, dessen Produktion einem Wandel unterliegen wird (siehe Kapitel 7 „Industrie“).

Mittel- und langfristig ist Flexibilität bei der Transformation erforderlich

Bei der Gestaltung der Rahmenbedingungen gilt es, grundsätzliche Zielkonflikte zu beachten und Abwägungen zu treffen. So ist übergeordnet immer abzuwägen zwischen möglichst allgemeingültigen und flexiblen Marktdesignansätzen, mit denen eine Vielzahl verschiedener technologischer und marktlicher Entwicklungen abgedeckt werden können, und spezifischen Regelungen als konkrete Antwort auf einen Einzelaspekt. So soll der Markt- und Regulierungsrahmen einen fairen Wettbewerb verschiedener klimaneutraler Technologien ermöglichen und zugleich Technologieentwicklungen fördern, muss aber gleichzeitig die wettbewerbsfähige Energieversorgung in den Sektoren und die Versorgungssicherheit im Auge behalten. Zudem müssen übergeordnete Infrastrukturentscheidungen getroffen werden.

Ein weiterer Trade-off besteht zwischen Flexibilität und Planbarkeit im zeitlichen Verlauf, denn die technologischen Rahmenbedingungen können sich über die Zeit verändern. Auch werden manche Probleme von Regelungen erst nach einiger Zeit deutlich, wie die Entwicklung der Liberalisierung zeigt. Auf der anderen Seite benötigen die Marktakteure verlässliche Leitplanken

für ihre Planungen, die verbindlich garantiert werden müssen. Das gilt vor allem bei der Infrastrukturentwicklung, deren Rahmenbedingungen zwar verändert werden können, aber nur unter Beachtung der durch frühere Planungen entstandenen Ansprüche.

Soziale Aspekte müssen mit gesonderten Maßnahmen berücksichtigt werden.

Zur Erreichung sektoraler Klimaziele stellt sich auch die Frage nach verschiedenen Zusatzmaßnahmen, beispielsweise zur politischgesellschaftlich gewünschten Förderung von Kleinanlagen sowie zur Vermeidung bzw. Abfederung sozialer Härten.

Möglichkeiten, die Bürgerinnen und Bürger direkt an der Transition zu einer klimaneutralen Gesellschaft zu beteiligen, stellen beispielsweise die Eigenerzeugung von Grünstrom und die Nutzung erneuerbarer Wärmetechnologien dar, sowohl auf individueller Basis (die Bürgerinnen und Bürger als Prosumer) als auch in Gemeinschaften (Quartierslösungen). Die für eine solche Beteiligung notwendigen Fördermaßnahmen müssen sich von Fördermaßnahmen für Großanlagen unterscheiden, da diese Risiken und administrativen Aufwand mit sich bringen, der Kleinverbrauchende überfordern würde – zum Beispiel Ausschreibungsmodelle für Solar- und Winderzeugung.

Der Einsatz der CO₂-Bepreisung zur Verdrängung fossiler Energieträger oder andere breit angelegte Instrumente können in einzelnen Anwendungsbereichen und Bevölkerungsgruppen zu sozialen Härten führen. Das gilt zum Beispiel bei der Umstellung von Heizungen auf klimaneutrale Energieträger oder bei der Gebäudesanierung. Beides ist mit erheblichen Kosten verbunden, die letztlich die Mieterinnen und Mieter sowie die Eigenheimbesitzerinnen und -besitzer tragen müssen. Aus diesem Grund muss insgesamt geprüft werden, wie empfohlene Instrumente durch sozialpolitische Maßnahmen ergänzt werden sollten. Die Verteuerung klimaschädlichen Verhaltens sollte jedoch nicht zur Disposition gestellt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Politik für den Klimaschutz letztlich nicht nur auf Basis von klimapolitischen Instrumenten beruhen kann. Vielmehr bedarf es auch in Feldern wie der Steuer-, Qualifizierungs- und Sozialpolitik entsprechender Grundlagen, die die Menschen befähigen, die auf sie zukommenden transformativen Veränderungen auch zu bewältigen (siehe Kapitel 4 „Transformation“).

Die Auswirkungen auf die Wettbewerbssituation müssen beachtet werden, die Einbettung in den Rahmen von EU und WTO-Vorgaben muss gewährleistet werden

Bei allen Maßnahmen ist die Kompatibilität mit den geltenden EU-Rahmenbedingungen sicherzustellen. So müssen beispielsweise nationale Förderregime dem EU-Beihilferecht genügen und die nationale Energiebesteuerung muss sich in dem durch die ES-RL gesetzten Rahmen bewegen. Gleichzeitig muss die anstehende Weiterentwicklung des EU-Beihilferechts gewährleisten, dass bei der nötigen beschleunigten Umsetzung der Energiewende in Deutschland und den anderen EU-Mitgliedsstaaten mehr Offenheit und Geschwindigkeit bei der Gestaltung von nationalen Instrumenten ermöglicht wird.

Zum Erhalt der internationalen Handels- und Wirtschaftsbeziehungen muss die Gestaltung des Marktrahmens auch mit den Regelungen der WTO (World Trade Organization, Welthandelsorganisation) kompatibel sein. Die geplanten Maßnahmen zur Vermeidung von Carbon Leakage müssen im Einklang mit den Vorgaben des GATT-Abkommens (General Agreement on Tariffs and Trade – Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen) stehen. Darüber hinaus sind auch übergeordnete Aspekte zu berücksichtigen, insbesondere sind gesonderte Maßnahmen mit solchen Ländern oder Regionen abzustimmen, die ihrerseits Klimaschutz betreiben. Dabei sind verbindliche Maßnahmen internationaler Klimaschutzabkommen (soweit umsetzbar) unilateralem Handeln vorzuziehen.

Abstimmungen auf der multilateralen neu zu schaffenden Ebene – beispielsweise der EU, der WTO, der G20 oder in einem „Klimaclub“ – bieten einen unterstützenden und auch erforderlichen Rahmen dafür, dass nationale Klimapolitik gleichzeitig auch industriepolitisch erfolgreich sein kann.

2.1 Anreize durch einen starken CO₂-Preis und flankierende Instrumente

Die THG-Bepreisung durch EU-ETS und BEHG sollte vereinheitlicht werden

Im Zentrum des Marktdesigns steht die Bepreisung von Treibhausgasemissionen², die bei fortlaufender Verringerung der Emissionen zu einer absehbaren Verteuerung der Emissionsrechte führen wird. Gegenwärtig wird die Bepreisung für manche Sektoren im EU-Emissionshandel³ umgesetzt, für andere Sektoren jedoch auf nationaler Ebene durch das BEHG⁴. Zusätzlich hat die EU-Kommission im Rahmen ihres „Fit for 55“-Pakets⁵ (Juli 2021) vorgeschlagen, einen EU-weiten Brennstoffemissionshandel einzuführen, um für die Sektoren Wärme und Verkehr einheitliche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen (dieser würde dann das nationale BEHG ganz oder teilweise ersetzen). Darüber hinaus macht die EU-Kommission Vorschläge zur Adressierung des Carbon-Leakage-Problems (siehe Kapitel 5 „Internationale Einbettung“).

Im Sinne eines europäischen Binnenmarktes für Güter, Dienstleistungen und Energie sollte mittelfristig eine EU-weite Vereinheitlichung der CO₂-Bepreisung erreicht werden. Abweichungen auf sektoraler Ebene können dann gerechtfertigt werden, wenn bestimmte Sektorziele anders nicht erreicht werden können oder sozialpolitische Gründe einer Umsetzung entgegenstehen.⁵ Parallel dazu sollten sukzessive auch über die EU-Ebene hinausgehend wirksame internationale Mechanismen zur Bepreisung von Emissionen geschaffen werden, um Klimaneutralität global zu erreichen und dabei wirtschaftliche Verschiebungen zur Ausnutzung von Lücken in den Regelungen zur Klimaneutralität zu vermeiden.

² Neben CO₂ auch weitere Gase wie Nitroxid und Perfluorkarbonat, deren Klimabelastung durch einen Umrechnungsfaktor zu CO₂ ins Verhältnis gesetzt wird.

³ EU-ETS-Sektoren: Stromerzeugung, zentrale Wärmezeugung, energieintensive Industrie, zivile Luftfahrt.

⁴ BEHG-Sektoren: dezentrale Wärmezeugung, straßengebundener Verkehr, Schifffahrt.

⁵ Soweit möglich sollten die sozialpolitischen Aspekte allerdings besser durch direkte Transfers adressiert werden.

Bestehende Verzerrungen der THG-Bepreisung von Endenergieträgern müssen abgebaut werden

Um einen verzerrungsfreien Wettbewerb zwischen verschiedenen Energieträgern, Infrastrukturen und Anwendungen zu ermöglichen und Effizienz und Steuerungswirkung der CO₂-

Die Abschaffung der EEG-Umlage baut administrative Hürden ab und ermöglicht Energiewende-Dynamik.

Bepreisung zu erhöhen, sollten außer dem CO₂-Preis und Infrastrukturabgaben (z. B. Strom- und Gasnetzentgelte) alle sonstigen Abgaben möglichst abgeschafft und die Steuern unter Berücksichtigung der Haushaltslage auf

das laut EU-Recht zulässige Minimum gesenkt werden. Insbesondere sollte die EEG-Umlage schnellstmöglich auf null gesetzt werden. Eine unmittelbare Abschaffung der EEG-Umlage führt überdies zu einem drastischen Abbau administrativer Hürden und Regelungen und würde dadurch eine enorme Dynamik für eine erfolgreiche Energiewende auslösen.^{6,7}

CO₂-Differenzverträge zur Förderung der Nachfrage nach klimaneutralen Energieträgern und Grundstoffen nutzen

Die CO₂-Bepreisung im Rahmen von Emissionshandelssystemen allein wird aufgrund der zeitlich begrenzten Handelsperioden und der dadurch entstehenden Unsicherheiten voraussichtlich nicht ausreichen, um die notwendige Beschleunigung der Transition zur vollständigen Bereitstellung klimaneutraler Energieträger und Grundstoffe zu erreichen. Daher muss die CO₂-Bepreisung durch die Einführung bzw. Weiterentwicklung von Förderinstrumenten flankiert werden, um Investitionshemmnisse beseitigen und gleichzeitig Versorgungssicherheit gewährleisten zu können.

Der Fokus sollte dabei im Energiemarkt auf einer nachfrageseitigen Förderung liegen um insbesondere die Umstellung auf die Nutzung von Powerfuels zu ermöglichen. Hierfür können sektorale CO₂-Differenzverträge (Carbon Contracts for Difference, CCfD, auch „Klimaschutzverträge“ genannt) eingeführt werden, die in Ausschreibungsverfahren vergeben werden. Solche CCfDs verknüpfen eine finanzielle Förderung des Einsatzes erneuerbarer Energieträger und Grundstoffe mit der Entwicklung des CO₂-Preises, da dieser für die Wettbewerbsfähigkeit dieser klimaneutralen gegenüber fossilen Alternativen entscheidend ist.

Die Vergabe des CCfD an einen Energienachfrager erfolgt per Ausschreibung über den Ausübungspreis (auch Fixpreis oder „Strike Price“ genannt), wobei sich das Fördervolumen auf die nachweislich vermiedene Menge CO₂ bezieht. In einer Phase mit niedrigen CO₂-Preisen⁸, wie sie in den nächsten Jahren zu erwarten sind, erhält der Nachfrager nach klimaneutralen Energieträgern Transferzahlungen, die sich an der vermiedenen CO₂-Menge ausrichtet. Übersteigt der CO₂-Preis den vertraglich vereinbarten Fixpreis, muss der Produzent die Differenz an die staatliche Organisation erstatten, die den CCfD bereitstellt. Gleichzeitig stellt ein CCfD ein Absicherungsinstrument (Hedging) gegen starke Schwankungen des CO₂-Preises dar.

CO₂-Differenzverträge können darüber hinaus auch zur Unterstützung der Transformation des Industriesektors beitragen (siehe Kapitel 7 „Industrie“). Sollte der Einsatz erneuerbarer Energieträger oder Grundstoffe mit Investitionen in neue Produktions- oder Verfahrenstechnologien verbunden sein, sollte sich die Vertragslaufzeit an den typischen Abschreibungsfristen der Investition orientieren. Die Umsetzung der Investition ist dabei zugleich Fördervoraussetzung: Erfolgt sie nicht, werden – in Analogie zu den bestehenden Ausschreibungsverfahren für Investitionen in erneuerbare Energien – Pönalen fällig.

Der Einsatz von CCfD hat Konsequenzen für den öffentlichen Haushalt, da der Staat die Förderkosten trägt, solange der CO₂-Preis unterhalb des in den Ausschreibungen ermittelten Fixpreises liegt. Mit Rücksicht auf die hiermit verbundenen fiskalischen Risiken, sollte der Einsatz dabei auf bestimmte Einsatzgebiete (Industriezweige oder Anwendungen) beschränkt werden. Dabei sind die begünstigten Branchen und Akteure in Bezug auf ihre Förderbedürftigkeit auszuwählen. Grundsätzlich ist beim Einsatz von CCfD zu prüfen, inwieweit die Einführung einer Produktabgabe zur Finanzierung der CCfD herangezogen werden kann.

⁶ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020b: 20 ff.

⁷ Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, 2020.

⁸ „Niedrig“ im Sinne von zu niedrig, um durch die CO₂-Bepreisung bereits die Kostendifferenz zu z.B. fossil erzeugtem Wasserstoff auszugleichen und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit des erneuerbar erzeugten Energieträgers herzustellen.

Der Einsatz von weitergehenden Maßnahmen und Instrumenten in den verschiedenen Sektoren erfordert eine bewusste Gestaltung

Zur Beschleunigung der Transformation müssen die übergeordneten bzw. sektorübergreifenden Anpassungen des Marktdesigns zusätzlich durch Anpassungen in den Sektoren ergänzt werden. Hierbei sind die oben skizzierten Kriterien zu beachten und Abwägungen zu treffen – in Bezug auf die zeitliche und technologische Flexibilität und in Bezug auf marktliche versus ordnungsrechtliche Ansätze, zum Beispiel:

- **Reduzierung der Komplexität:** In manchen Sektoren bzw. für manche Akteursgruppen sind die technologieneutralen CCfD zur Nachfrageförderung nicht gut anwendbar. Dies gilt beispielsweise für kleinere Akteure, für die aufgrund der Komplexität etwa eine Teilnahme an Ausschreibungsverfahren nicht in Frage kommt. Das betrifft vor allem den Raumwärme- und den Verkehrssektor (siehe Kapitel 6 „Gebäude“ bzw. Kapitel 8 „Verkehr“). In diesen Bereichen kann die Anwendung von Quotensystemen für klimaneutrale Energieträger geprüft werden. In der Industrie kann zudem die Schaffung von Leitmärkten für grüne Produkte sinnvoll sein, sofern die Produkte für produktbezogene Quotensysteme ausreichend einheitlich sind (Grünstahlquote, siehe Kapitel 7 „Industrie“).

- **Marktorientierte Lösungen:** Die für die Versorgungssicherheit erforderliche gesicherte Leistung im Stromsektor beruht heute zu einem erheblichen Anteil auf fossilen Kraftwerken. In Zukunft müssen Vorkehrungen getroffen werden, diese u. a. durch wasserstofffähige Gaskraftwerke und die weitergehende Aktivierung von Nachfrageflexibilität zu ersetzen. Da nicht zu erwarten ist, dass die notwendigen Investitionen durch die Preissignale am Strommarkt allein rechtzeitig angereizt werden, muss geprüft werden, inwieweit die bestehenden Reservemechanismen erweitert oder durch zusätzliche Kapazitätsmechanismen ergänzt werden, in jedem Fall im Kern auf Basis einer marktlichen Beschaffung (z. B. Ausschreibung) der erforderlichen Kapazitäten.

- **Übergang von Förderregimen in den Markt:** Auch wenn in den nächsten Jahren die Förderung für erneuerbare Energien im Stromsektor noch erforderlich sein wird, rechnen die meisten Marktteilnehmer angesichts des technologischen Fortschritts bei den Erneuerbaren mit einer sukzessiven Reduzierung des zusätzlich zu den Einnahmen am Strommarkt erforderlichen Förderbedarfs in der kommenden Dekade. Die ausschreibungsbasierte Förderung für EE-Großanlagen ist hierauf ausgelegt. Ergänzend sollten die Rahmenbedingungen von auf PPA (Power Purchase Agreements) basierenden Investitionen verbessert werden, die bereits heute ohne direkte Förderung auskommen.

Neben den Anpassungen am Marktdesign sind auch Regulierungsanpassungen in den Verbrauchssektoren erforderlich, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Dabei handelt es sich in erster Linie um die Energieeffizienzregulierung, die vor allem im Gebäudesektor und in der Industrie Anwendung findet. Diese Themen werden in Kapitel 6 „Gebäude“ und Kapitel 7 „Industrie“ behandelt.

2.2 Integrierte Planung für Weiterentwicklung und Aufbau der nötigen Infrastrukturen

Die notwendige Transformation des Energiesystems mit den bestehenden Infrastrukturen zu einem vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden System mit teilweise gänzlich neuen oder anders erzeugten Energieträgern stellt auch die Netzplanung und -regulierung vor besondere Herausforderungen. Hierbei ist ein integrierter Ansatz wichtig, sowohl für die Weiterentwicklung der bestehenden Infrastrukturen für Strom und Gas als auch für den Aufbau neuer Infrastrukturen für Transport, Speicherung und Verteilung von Wasserstoff. Der Grund: Um die Effizienzpotenziale durch eine engere Verknüpfung der verschiedenen Verbrauchssektoren zu heben und die Versorgungssicherheit mit allen erforderlichen Energieträgern jederzeit zu gewährleisten, muss die zukünftige Infrastrukturplanung sektorübergreifend gestaltet werden und die Regulierung muss spürbare Investitionsanreize für synergetische Lösungen setzen.

Die Einführung eines die Sektoren übergreifenden Systementwicklungsplans ist von zentraler Bedeutung

Zentraler Ansatz sollte ein die Sektoren übergreifender Planungsprozess zur strategischen Ausrichtung des Energiesystems als Ganzes, ein Systementwicklungsplan (SEP), sein. Wie dieser ausgestaltet und umgesetzt werden kann, hat die dena im Rahmen der dena-Netzstudie III mit einer Vielzahl von Stakeholdern ausgearbeitet.⁹ Hierdurch können die Bedarfe, die Potenziale sowie geeignete Lösungen über die verschiedenen Energieträger hinweg abgewogen und systemische Optimierungspotenziale sichtbar gemacht bzw. genutzt werden. Zudem wird durch den SEP ein konsistenter Ausgangspunkt für alle weiteren, einzelne Energieträger betreffenden Planungsprozesse geschaffen. Durch die Einbindung wesentlicher gesellschaftlicher, politischer und energiewirtschaftlicher Akteursgruppen sollten dabei die verschiedenen Perspektiven hinsichtlich der Energiewende einbezogen werden, um eine größere Akzeptanz für spätere Infrastrukturprojekte sicherzustellen.

Die im Systementwicklungsplan gemeinsam entwickelten Rahmenbedingungen bilden Ankerpunkte für die Netzentwicklungspläne Strom und Erdgas sowie auch für die Planung der neu zu schaffenden Wasserstoffinfrastruktur, bieten aber auch Orientierung für die Weiterentwicklung der Verteilnetze und die Transformationsprozesse zum Beispiel in der Industrie.

Für den größtenteils nicht leitungsgebundenen Transport von flüssigen Kraftstoffen und Industriegasen – also beispielsweise auch für neue synthetische flüssige Powerfuels – wird keine regulierte Infrastruktur benötigt. Der Transport findet über Tanklastwagen bzw. -züge oder in nicht regulierten Pipelines statt. Der Aufbau von Transportwegen für diese neuen klimaneutralen Energieträger erfolgt also durch den Markt. Die Akteure werden in die Entwicklung des Systementwicklungsplans eingebunden und bauen in ihrer eigenen Planung auf den dort identifizierten Bedarfen auf. Das gilt insbesondere auch für die öffentliche und private Planung von Wärmelösungen, die perspektivisch auf der Nutzung von synthetischen Energieträgern aufbauen, und sich an der aus dem SEP ergebenden Gesamtstrategie für die Systementwicklung orientieren können.

⁹ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020c: 15 ff.

Eine integrierte Energieleitplanung sollte auch auf regionaler und kommunaler Ebene erfolgen

Zukünftig sollte analog zur überregional integrierten Infrastrukturplanung auch auf regionaler bzw. kommunaler Ebene eine Energieleitplanung erfolgen. Im Zuge der fortschreitenden Sektorkopplung ist zu erwarten, dass der Ausbaubedarf bei Stromnetzen insbesondere bei städtischen Verteilnetzbetreibern in den kommenden Jahren aufgrund neuer und steuerbarer Verbrauchseinrichtungen weiter steigen wird. Auch für die Fernwärmenetze ist ein erhöhter Ausbaubedarf zu erwarten. Hinzu kommt die Fragen nach der Weiterentwicklung der Gasverteilnetze einschließlich der möglichen Umstellung in Wasserstoffnetze. Zentraler Bestandteil für die Energieleitplanung ist die kommunale Wärmeplanung.¹⁰ Beides zusammen bietet einen integriert entwickelten Ausgangspunkt für die detaillierten Netzausbauplanungen durch die jeweiligen Netzbetreiber der verschiedenen Spartenverknüpft werden sollte. Darüber hinaus können im Zuge der Energieleitplanung lokal hochaufgelöste Daten zu Energiequellen und -senken erfasst werden. Wichtig ist, durch eine geeignete Governance-Struktur die Unabhängigkeit des zuständigen Gremiums in den Kommunen mit Blick auf kommunale Beteiligungen und Betriebe sicherzustellen.

Eine integrierte Planung muss durch integrierte Regulierung gestützt werden

Das Pendant zur sektorübergreifenden Planung ist eine Regulierung, die die Belange der integrierten Energiewende berücksichtigt. Dies bedeutet, dass die bestehende Anreizregulierung im Strom- und Gassektor um Elemente einer Output-Orientierung weiterentwickelt werden sollte. Das heißt, dass zukünftig auch solche Investitionsmaßnahmen honoriert werden sollten, die auf die stärkere Verknüpfung verschiedener Energieträgerinfrastrukturen ausgerichtet sind. Ein Beispiel dafür ist der Netzanschluss eines Elektrolyseurs, der ein verknüpfendes Element zwischen dem Strom- und dem Wasserstoffnetz darstellt. Der Anschluss an einem bestimmten Ort, der mit Blick auf die Wasserstoffinfrastruktur besonders geeignet ist, erfordert vom Stromnetzbetreiber unter Umständen einen zusätzlichen Leistungsausbau mit entsprechenden Kosten. Um die erforderliche Abwägung in geeigneter Weise zu berücksichtigen, sollte ein Faktor in der Anreizregulierung Strom diese Verknüpfung positiv bewerten.

Auch Netzanschlussgebühren und Netznutzungsentgelte könnten stärker am übergeordneten Ziel der integrierten Energiewende, das heißt der Kopplung der Sektoren, ausgerichtet werden. Dazu müsste ihre Ausgestaltung derart gefasst sein, dass die identifizierte übergeordnete Infrastrukturoptimierung beim sektoralen Netzausbau angereizt wird. Hierfür kann eine geografische Flexibilisierung der Gebühren und Entgelte hilfreich sein. Es geht insbesondere um die Möglichkeit, Standortentscheidungen im Sinne der verfügbaren Netzkapazitäten anzureizen. Im Falle der Standortwahl eines Elektrolyseurs im Stromnetz sollte demnach die Anschlussgebühr dort günstiger ausfallen, wo die Netzkapazitäten Strom in größerem Maße vorhanden sind.

Langfristig sollte sich die neu zu errichtende Wasserstoffinfrastruktur an der heutigen Regulierung der Erdgasinfrastruktur orientieren und eine perspektivische Zusammenführung sollte geprüft werden. Auf dem Weg dahin werden sowohl regulatorische und marktliche Ansätze benötigt.

Weitere Aspekte und Handlungsbedarfe in Bezug auf die Planung und Regulierung der Stromnetze, der Transformation der Gas- und der Errichtung der Wasserstoffinfrastruktur werden in Kapitel 9 „Energie“ beschrieben.

¹⁰ Die dena baut derzeit im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) das Kompetenzzentrum Kommunale Wärmewende (KWW) in Halle (Saale) auf. Das KWW wird zukünftig eine Plattform für den Austausch der Bundesländer zur Einführung und Weiterentwicklung der kommunalen Wärmeplanung anbieten und Kommunen sowie weitere Stakeholder zum Einstieg in die Kommunale Wärmeplanung informieren und beraten.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode



AUFGABE 5

EU-weite Vereinheitlichung der CO₂-Bepreisung vorantreiben und Abgleich mit den nationalen Regelungen vornehmen

Die EU sollte bei der CO₂-Bepreisung mittelfristig anstreben, die heute im nationalen BEHG abgedeckten Sektoren, v. a. die betroffenen Verkehrssektoren (Individualverkehr, Schifffahrt, Schwertransport) in ein einheitliches europäisches Handelssystem zu überführen. Mittelfristig sollte geprüft werden, ob dieses neu geschaffene Emissionshandelssystem mit dem bereits bestehenden EU-ETS verschmolzen werden kann.

Für ein europäisches BEHG sind Reduktionsvereinbarungen sowie eine Lastenteilung (Effort Sharing) mit den Mitgliedstaaten auszuhandeln, die sich einerseits an den entsprechenden sektoralen Zielen der NECP und andererseits an den beobachteten Wirtschaftsaktivitäten der BEHG-Sektoren ausrichten sollte.



AUFGABE 6

Abgaben auf Energie auf CO₂-Bepreisung und Infrastrukturabgaben fokussieren

Die Bundesregierung sollte anstreben, die Abgaben auf Energie – soweit finanzierbar und EU-rechtlich zulässig – auf die CO₂-Bepreisung und Infrastrukturabgaben zu fokussieren, um die Effizienz der CO₂-Bepreisung zu erhöhen und Verzerrungen zwischen den Energieträgern zu beseitigen, wie es auch der Vorschlag der Kommission für die neue Energiesteuer-Richtlinie vorsieht.

Dazu sollte in einem ersten Schritt die EEG-Umlage auf null abgesenkt werden.

Im Zug einer möglichen Absenkung der Energiesteuer (früher Mineralölsteuer) muss gegebenenfalls die Einführung einer Infrastrukturabgabe für den Straßenbau in Erwägung gezogen werden.



AUFGABE 7

Eine integrierte Finanzierungsplanung für die Energiewende entwickeln

Die Bundesregierung sollte eine ganzheitliche Finanzierungsplanung für die Energiewende entwickeln.

Grundlage hierfür bildet eine genaue Bewertung der laufenden und perspektivisch erwartbaren Einnahmen und Ausgaben im Kontext der Energiewende auf Basis der bestehenden Rahmenbedingungen. Diese Bewertung sollte dann ergänzt werden um die in verschiedenen Studien zur Erreichung der Klimaneutralität aufgezeigten Transformationserfordernisse und die hierbei bezifferten erforderlichen Investitionen. Darüber hinaus sollte eine Analyse der zur Zielerreichung zusätzlich nötigen Finanzierungserfordernisse erfolgen – sowohl über die verschiedenen politischen Handlungsebenen (Bund, Land, Kommunen) und Stakeholder (öffentliche Institutionen, Unternehmen, private Verbraucher) sowie in Abwägung des gewählten Instrumentenmix aus Marktaktivierung, Ordnungsrecht, staatlichen Förderinstrumenten und marktlichen Rahmensetzungen wie beispielsweise Quotensysteme.

Im Ergebnis soll ein über die Zeit tragfähiges Konzept zur Finanzierung der für die Energiewende erforderlichen und durch staatliche Fördermechanismen und Instrumente angezeigten Investitionen sowie notwendiger flankierender Maßnahmen entstehen.



AUFGABE 8

Einen Systementwicklungsplan für eine integrierte Infrastrukturplanung gesetzlich einführen

Zur zukünftigen Planung von Energieinfrastrukturen sollte die Bundesregierung die Einführung eines neuen, partizipativen Prozesses zur Erarbeitung eines Systementwicklungsplans auf gesetzlicher Basis auf den Weg bringen.¹¹ Vorschläge zur genauen Ausgestaltung können den Ausarbeitungen der dena-Netzstudie III entnommen werden. Wichtige Elemente des Prozesses sind:

- Die Erarbeitung des Systementwicklungsplans umfasst die Ableitung eines Kriterienkatalogs zur Erfassung der gesellschaftlichen Erwartungen an die Infrastrukturentwicklung, eine daten- und modellgestützte Szenarioanalyse, eine Bewertung verschiedener Optionen und schließlich die Ableitung von Entscheidungen zur Zielplanung.
- Die Ableitung von Folgerungen für die sektoralen Netzentwicklungspläne, die dann einen verbindlichen Rahmen für die sektoralen Akteure und für die anschließenden regionalen Planungen bilden. Das Ineinandergreifen der verschiedenen Prozesse muss insgesamt so gestaltet sein, dass es nicht zu einer Verlängerung bereits existierender Planungsprozesse kommt, sondern Potenziale für deren Straffung geprüft werden.
- Die Sicherstellung der ausgewogenen Partizipation aller relevanten Stakeholder sowie Vertreter aus Politik und Gesellschaft in einem transparenten Verfahren.

Mit Blick auf die verschärfte Zielsetzung von Klimaneutralität 2045 besteht der Bedarf, sehr schnell eine neue Energieinfrastruktur für Wasserstoff aufzubauen grundsätzliche Fragen zur Ausgestaltung des Energiesystems zeitnah beantwortet werden. Daher sollte die erste Umsetzung der Systementwicklungsplanung unmittelbar in der neuen Legislaturperiode gestartet werden, gegebenenfalls zunächst in einer vereinfachten Variante, die sich vor allem darauf konzentriert, Konsistenz in der Planung der Transportnetze herzustellen und die systemischen Optimierungspotenziale zu heben. Dieser erste Planungsdurchgang auf Gesamtsystemebene sollte in jedem Fall genutzt werden, um das parallel zu erarbeitende Konzept für das Startnetz für Wasserstoff aus Gesamtsystemperspektive zu validieren (siehe Kapitel 9 „Energie“).



AUFGABE 9

Einführung einer integrierten kommunalen Energieleitplanung voranbringen

Die in einigen Bundesländern bereits eingeführte und auf Bundesebene befürwortete verbindliche kommunale Wärmeplanung nach dem Vorbild Dänemarks stellt einen wichtigen Schritt zur Defossilisierung des Wärmesektors dar.

Die Bundesregierung und die Landesregierungen sollten darüber hinaus die kommunale Wärmeplanung zu einer mit der Netzausbauplanung abgestimmten, integrierten Energieleitplanung weiterentwickeln, um einen sektorübergreifenden Abgleich der strategischen Ausrichtung und der Planungsprozesse zu etablieren. Es ist dabei zu prüfen, auf welcher Verwaltungsebene (Gemeinde, Stadt, Landkreis, Bezirk) die Planung sinnvoll angesiedelt werden sollte. Wichtig ist, durch eine geeignete Governance-Struktur die Unabhängigkeit des zuständigen Gremiums z. B. in den Kommunen mit Blick auf kommunale Beteiligungen und Betriebe sicherzustellen. Die kommunale Energieleitplanung kann sich dabei an den Grundprinzipien des Systementwicklungsplans orientieren, das heißt, sie ergänzt die sektorale Planung durch eine übergeordnete und ganzheitliche Gesamtstrategie und schafft Synergien. Gleichzeitig kann sie durch die Erhebung detaillierter lokaler Daten die überregionale integrierte Infrastrukturplanung unterstützen.

¹¹ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020c.



AUFGABE 10

Regulierung von Energieinfrastrukturen mit dem Ziel einer sektorübergreifenden Optimierung weiterentwickeln

Die Bundesregierung sollte die Bundesnetzagentur auffordern, Vorschläge zur Weiterentwicklung der Kostenregulierung von Energieinfrastrukturen vorzulegen, um auch eine effektive Optimierung über Sektor- oder Infrastrukturgrenzen hinweg zu erreichen, beispielsweise durch Outputorientierte Regulierungselemente sowie eine Reform der Netzentgelte und -anschlussgebühren mit Blick auf Anreize für eine sektorübergreifende Netzdienlichkeit von Investitionen und Fahrweisen.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- ▶ **Abstimmung auf EU-Ebene zur Weiterentwicklung integrierter Energieinfrastrukturen und Erzeugungskapazitäten verstärken** (Kapitel 5 „Internationale Einbettung“)
- ▶ **Die Lenkungswirkung von THG-Emissionen auf den Konsum erhöhen und die Kostengerechtigkeit verbessern** (Kapitel 7 „Industrie“)
- ▶ **Umfassendes Konzept für ausreichend gesicherte Leistung im Stromsektor** (Kapitel 9 „Energie“)
- ▶ **Gesamtstrategie Systemsicherheit und Netzstabilität umsetzen** (Kapitel 9 „Energie“)
- ▶ **Ein Konzept für die Transformations- und Versorgungssicherheit der neuen Energiemärkte erstellen** (Kapitel 9 „Energie“)

3 Innovation

Welchen Beitrag leisten Innovationen auf dem Pfad zur Klimaneutralität?



Innovationen sind Möglichmacher, Beschleuniger, Gestalter und Erhalter auf dem Weg zu Klimaneutralität

In allen für den Klimaschutz relevanten Sektoren ist gegenwärtig eine faszinierende Innovationsdynamik zu beobachten. Die Innovationsgeschwindigkeit in den Bereichen Energie, Mobilität, Materialforschung, Digitalisierung und selbst Lebensmittel ist immens, die Entwicklungen in diesen Sektoren interagieren miteinander und sorgen damit für eine nochmalige Beschleunigung der Innovationsdynamik. Mit Blick auf die zu bewältigenden Herausforderungen bei Energiewende und Klimaschutz sind das ermutigende Entwicklungen.

Und dennoch hat die Diskussion um den Beitrag, den Innovationen zur Erreichung der Klimaneutralität leisten können, in Deutschland einen schweren Stand. Denjenigen, die die Bedeutung der Innovationen für das Erreichen von Klimaneutralität besonders hervorheben und die dafür erforderlichen Rahmenbedingungen einfordern, wird entgegengehalten, die Ziele seien auch mit heute bereits zur Verfügung stehenden Technologien

Der Begriff Innovation umfasst gleichermaßen neue Technologien sowie nicht-technische Neuerungen, wie neue Prozesse, Konzepte, Geschäftsmodelle oder soziale und politische Handlungsweisen.

erreichbar und ein Fokus auf Innovationen führe lediglich zur Verzögerung von Entscheidungen. Die in dieser Studie dargelegten Betrachtungen zu diesem Thema wollen dem etwas entgegenstellen. Es bedarf sofortigen Handelns und eines klaren Blicks für das zu hebende Innovationspotenzial gleichermaßen. Denn eine Nichtbeachtung dieser

teils disruptiven Entwicklungen schränkt die Optionen für die Pfade zur Zielerreichung unnötigerweise ein und schadet damit am Ende dem Klimaschutz. Chancen werden nicht erkannt und die Aktivitäten nicht ausreichend auf diese technologischen Entwicklungen und Perspektiven ausgerichtet.

Die Internationale Energieagentur schätzt, dass etwa die Hälfte der zur Erreichung von globaler Klimaneutralität notwendigen Technologien derzeit noch keine Marktreife erreicht haben.¹ Es geht also darum, **der globalen Innovationsdynamik eine neue Richtung zu geben** und sie für den Klimaschutz und die industriepolitischen Perspektiven nutzbar zu machen. Der Investitionszyklus in manchen Branchen beträgt 25 Jahre oder mehr. Wenn es nicht gelingt, diese Innovationszyklen zu verkürzen und die für den Klimaschutz förderlichen Technologien zu identifizieren und sie rechtzeitig zu skalieren, sinkt die Wahrscheinlichkeit der Erreichung der Klimaziele dramatisch. Es würde zudem dazu führen, dass die damit verbundenen industriepolitischen Chancen auf grünes Wachstum, Jobs und nachhaltige Perspektiven nicht genutzt werden.

Fortwährende Innovationen sind zum Aufbau und zur Aufrechterhaltung der Marktposition von Unternehmen außerordentlich wichtig. In manchen Branchen wird teilweise ein erheblicher Anteil des Umsatzes mit Produkten und Leistungen erzielt, die jünger als drei Jahre sind. Diesen innovativen, sich ständig erneuernden Branchen stehen andere gegenüber, die seit Jahrzehnten mit fast unveränderten Produkten und Geschäftsmodellen erfolgreich sein konnten. Diese Wirtschaftszweige sind durch die Klimakrise gezwungen, sich und ihre Produkte ebenfalls zu erneuern und in zukunftsfähige Geschäftsmodelle zu investieren.

¹ International Energy Agency (IEA), 2021a.

Der Innovationsanteil am Umsatz ist beispielsweise in der Chemieindustrie und in der Metallerzeugung, im Bereich Transport und Verkehrsdienstleistungen sowie in der Energieversorgung verhältnismäßig gering (siehe unten). Diese Wirtschaftszweige sind Schlüsselstellen auf dem Pfad zur Klimaneutralität. Auch diese Branchen müssen in der Lage sein, die Geschwindigkeit bei der Entwicklung erforderlicher Innovationen zu erhöhen, ihre Geschäftsmodelle und Produkte zukunftsfähig zu gestalten

Die laufende Erneuerung von Produkten und Geschäftsmodellen ist in vielen Branchen fest verankert. Aber: Die durch Klimaneutralität in ihren Geschäftsmodellen herausgeforderten Branchen investieren noch (zu) wenig in Innovation.

und Erneuerungen als Teil des Unternehmens zu betrachten.

Um die nötigen innovativen Lösungen für diese Umgestaltung zu finden und auch den Innovationsanteil am Umsatz zu steigern, müssen zunächst die Ausgaben für Forschung und Entwicklung (F&E) entsprechend angepasst werden. Die Ausgaben für F&E sind ein aussagekräftiger Indikator für das Innovationsverhalten

verschiedener Wirtschaftszweige. In den vergangenen Jahren stiegen die Innovationsausgaben der deutschen Industrie kontinuierlich an und lagen im Jahr 2019 bei über 130 Milliarden Euro – rund 4,8 Prozent des Gesamtumsatzes der Industrie (= Innovationsintensität). Insgesamt 17,8 Prozent der Industrieunternehmen betrieben im Jahr 2019 kontinuierliche Forschung und Entwicklung; im Dienstleistungsbereich waren es 7,6 Prozent der Unternehmen.²

Ein genauerer Blick auf die Branchen zeigt, dass die Anteile sehr unterschiedlich sind. Während die Innovationsintensität im Automobilbau bei fast 10 Prozent liegt, liegt die Innovationsintensität insbesondere bei Energieversorgung und im Baubereich bei deutlich unter 1 Prozent.³ Auch die F&E-Ausgaben im Bereich Verkehrsdienstleistungen sowie Straßen- und Schienentransport liegen mit ca. 2 Prozent vom Umsatz deutlich unter dem branchenübergreifenden Durchschnitt. In der energieintensiven Industrie variieren die Intensitäten: Die Chemieindustrie investiert knapp unter 5 Prozent des Umsatzes in F&E, die Metallerzeugung dagegen nur rund 2 Prozent.

Insgesamt sind die Innovationsausgaben in deutschen Unternehmen in den vergangenen Jahren leicht gestiegen und im weltweiten Vergleich liegt die deutsche Volkswirtschaft nach Angaben der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) hinter den USA, China und Japan auf dem vierten Platz der größten F&E-Investoren.⁴ Um weiterhin eine bedeutende Rolle als führende Export- und Technoligionation einzunehmen, muss die Innovationskultur in den Unternehmen, aber auch in der Politik noch deutlich gestärkt werden. Denn auch die Konkurrenz forscht an zukunftsorientierten Technologien und Möglichkeiten, einen starken Wirtschaftsstandort zu sichern und eine nachhaltige Wertschöpfungskette zu errichten.

Viele gute Ideen kommen aus Deutschland, das zeigt der Anteil der Patentanmeldungen: Deutschland belegte im Jahr 2018

Deutschland ist ein erfolgreicher Erfinder. Die Dynamik zur erfolgreichen Umsetzung einer Invention am Markt als Innovation muss aber erhöht werden.

mit einem Anteil von 15 Prozent hinter den USA Platz 2 der weltweit meisten Patentanmeldungen. Mit einer Zunahme von 4,7 Prozent im Vergleich zum Vorjahr verzeichnete Deutschland den größten Zuwachs seit 2010. Laut dem europäischen Patentamt ist dies vor allem

auf die Automobilbranche und damit verbundene Branchen, wie beispielsweise Mess- und Sensortechnik, zurückzuführen.⁵ Deutschland möchte innovativ sein.

Entscheidend ist dafür aber nicht nur die Stimulation von Ideen, sondern auch die Umsetzung dieser Ideen und Inventionen in marktgängige Produkte. Ein Beispiel für das Scheitern der Umsetzung in Deutschland ist die Magnetschwebbahn „Transrapid“ mit EMS-Technologie (Electro Magnetic Suspension). Mit dieser in Deutschland entwickelten Technologie werden Hochgeschwindigkeitszüge elektromagnetisch betrieben. Erfolgreich umgesetzt wurde EMS als Prototyp bereits in den 1970er-Jahren in Deutschland, die technische Einsatzreife wurde Anfang der 1190er-Jahre erzielt. Erstmals im Regelbetrieb eingesetzt wird die Technologie jedoch in China, wo 2004 die erste Strecke in Betrieb ging.⁶ Dort wird derzeit an der nächsten Generation der Züge geforscht und es werden erste Prototypen getestet, die bis zu 620 km/h fahren.⁷

² Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), 2021a: 2 ff.

³ Die Innovationsintensität im Baubereich ergibt sich durch den Umsatz von 135,2 Mrd. Euro 2019 (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021: 24) und die F&E-Ausgaben von 0,127 Mrd. Euro 2019 (Stifterverband, 2021: 5).

⁴ Siebel, 2021.

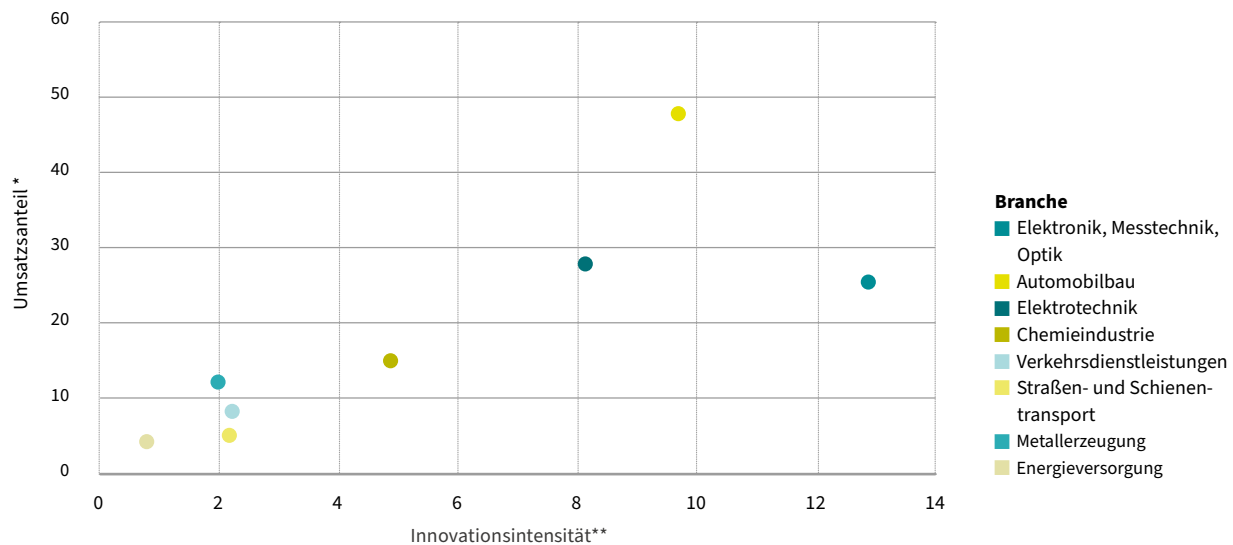
⁵ Europäisches Patentamt, 2019.

⁶ Hashim & Sudin, 2020: 204.

⁷ The next generation of magnetic-levitation trains has been presented in China, 2021.

Abb. 3.1 Innovationsintensität

Angaben in %



Branche (%)	Innovationsintensität	Umsatzanteil
Elektronik, Messtechnik, Optik	12,9	26,5
Automobilbau	9,7	47,9
Elektrotechnik	8,1	28,5
Chemieindustrie	4,8	14,5
Verkehrsleistungen	2,1	8,6
Straßen- und Schienentransport	2,1	4,7
Metallerzeugung	2	11,9
Energieversorgung	0,7	4,5

* Der Umsatz von Produktinnovationen bezieht sich auf den im Berichtsjahr erzielten Umsatz mit Produktinnovationen, die im vorangegangenen Dreijahreszeitraum eingeführt wurden. Umsatzanteile beziehen sich auf den gesamten Branchenumsatz (inkl. des Umsatzes von Unternehmen ohne Produktinnovationen).

** Die Innovationsintensität misst die gesamten Innovationsausgaben der Unternehmen einer Branche in % des gesamten Branchenumsatzes (inkl. des Umsatzes nicht innovativ tätiger Unternehmen).

Quelle: Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), 2021b



TECH FOR NET ZERO ALLIANZ

Deutschland hat eine starke Universitäts- und Forschungsinfrastruktur. Das sind sehr gute Voraussetzungen, um eine zentrale Rolle in den innovativen Zukunftsmärkten zu spielen. Oft gelingt es jedoch nicht, Innovationen aus dem Labor in den Markt zu bringen und zu skalieren.

Die Tech for Net Zero Allianz, gegründet von Breakthrough Energy und der dena, will relevante Akteure aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft zusammenbringen, um gemeinsam Impulse zu setzen und Handlungsempfehlungen für innovationsfördernde Rahmenbedingungen in Deutschland zu entwickeln. Sie sollen dabei unterstützen, dass sich die Rahmenbedingungen für Unternehmerinnen und Unternehmer und Innovationen verbessern. Vor allem kleinere Unternehmen und Climate Tech Start-ups sollen schneller in den Markt kommen und wachsen können.

Die Expertenkommission für Forschung und Innovation, die regelmäßig die Leistungsfähigkeit Deutschlands analysiert und die Bundesregierung beratend unterstützt, hat bezüglich der Nutzung von radikal neuen Technologien und deren Anwendungen Rückstände in Deutschland im internationalen Vergleich identifiziert. Dies betrifft beispielsweise Technologien und Anwendungen wie Servicerobotik, künstliche Intelligenz (KI), autonome Systeme, Cybersicherheitsapplikationen, E-Government, digitale Geschäftsmodelle und die Digitalisierung der Hochschulen.⁸ Im Bereich Elektrolyse- und PtX-Technologien hat Deutschland jedoch nun die Möglichkeit, sich beispielsweise wie im Ausbau erneuerbarer Energien global als ein Vorreiter zu positionieren und eine wichtige, hoch innovative Branche zu etablieren. Im Jahr 2016 hielt Deutschland im Bereich Elektrolyseure einen Marktanteil von fast 20 Prozent am Weltmarkt, dahinter Japan, Thailand, China und die USA. Laut einer Studie von Frontier Economics könnte durch die Produktion und den Export von Elektrolyse- und PtX-Anlagen bis zum Jahr 2050 durchschnittlich eine zusätzliche jährliche Wertschöpfung von knapp 36 Milliarden Euro für die deutsche Wirtschaft entstehen.⁹

Neben technischen Innovationen leisten auch nicht-technische Innovationen einen wichtigen Beitrag auf dem Weg zur Klimaneutralität. So haben 44 Prozent der deutschen Unternehmen im Zeitraum von 2017 bis 2019 eine Veränderung an ihrem Geschäftsmodell vorgenommen. Eine Neugestaltung der Art und Weise, wie Erlöse erzielt werden, fand in 6,2 Prozent der deutschen Unternehmen statt. Hier kamen neue Modelle wie zum

Auch nicht-technische Innovationen sind zur Erreichung von Klimaneutralität notwendig – für Unternehmen ebenso wie für die öffentliche Hand und die Bürgerinnen und Bürger.

Beispiel „Nutzen statt besitzen“ zur Anwendung.¹⁰

Bei nicht-technischen Innovationen im öffentlichen Sektor übernimmt die Zivilgesellschaft eine tragende Rolle. Dazu nutzen Bürgerinnen und Bürger, Initiativen, Vereine oder Nichtregierungsorganisationen (NGOs) die verschie-

denen Möglichkeiten, gesellschaftlichen Wandel mitzugestalten und innovative Ideen und wichtige Themen auf die politische Agenda zu bringen (Partizipation und politische Beteiligung). Dies erfolgt u. a. über das Demonstrations- oder das Petitionsrecht. So wurde die Dringlichkeit der Klimakrise beispielsweise maßgeblich durch die Demonstrationen von Fridays for Future in den politischen Fokus gerückt und das Verbot von Plastiktüten durch

verschiedene Petitionen, beispielsweise der Deutschen Umwelthilfe, angestoßen. Darüber hinaus werden konkrete Pilotprojekte eigenständig von Vereinen und Initiativen umgesetzt, so zum Beispiel Repair Cafés oder das Forschungsprojekt KoMoDo (Kooperative Nutzung von Mikro-Paketdepots durch die Kurier-, Express-, Paket-Branche für den nachhaltigen Einsatz von Lastenrädern in Berlin), welches die „letzte Meile“ klimaneutral gestalten will.

Zunehmend findet das Konzept der offenen (gesellschaftlichen) Innovation sowohl in der Wirtschaft als auch im öffentlichen Sektor Anwendung und ermöglicht durch die aktive Beteiligung der Akteure (Kunden, Nutzer, Zivilgesellschaft etc.) und die strategische Nutzung ihrer Innovationskraft die stärkere Identifizierung

Offene Innovationen erhöhen die Akzeptanz durch stärkere Identifizierung und größere Legitimität.

mit Innovationen und erhöht deren Legitimität.¹¹ Den Willen zur Erneuerung braucht es jedoch auf allen Ebenen, um innovative Ideen auch umzusetzen. Insgesamt sind die innovativen Impulse aus der

Politik und die Förderung von Innovationen in Wirtschaft und Gesellschaft durch die Politik aktuell noch nicht ausreichend, um das Potenzial von Innovationen für den Weg zur Klimaneutralität voll auszuschöpfen.

Durch das gesteckte Ziel Klimaneutralität in 2045 und die Folgen des Klimawandels wird es disruptive Veränderungen geben (müssen). Im Gegensatz zu den bisherigen industriellen Revolutionen betrifft die jetzt anstehende transformativische Veränderung viel mehr Lebensbereiche und ist dadurch entschieden komplexer. Sie ist gekennzeichnet durch neue Prozesse, insbesondere im Bereich Ressourcenmanagement, sowie den Wandel von linearer Wirtschaftsweise zur Kreislaufwirtschaft und von fossilen Energieträgern und Rohstoffen zu erneuerbaren Energieträgern und Rohstoffen und final zur Klimaneutralität. Dabei müssen der Erhalt des Wohlstandes und Klimaschutz mit Innovationen keinen Gegensatz bilden.

Zur Bewältigung dieser komplexen Herausforderung braucht es innovative Ideen und Rahmenbedingungen, die auch eine Umsetzung und breite Anwendung ermöglichen, wobei Innovationen hier auf verschiedenen Ebenen wichtig sind und somit auch unterschiedliche Wirkweisen haben:

⁸ Expertenkommission Forschung und Innovation, 2021: 33.

⁹ Perner, J. et al., 2018: 42.

¹⁰ Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), 2021a: 10.

¹¹ Herzog, 2012: 15 ff.

- **Innovationen als Möglichmacher:** (Technische) Innovationen sind ein wichtiger Bestandteil der Transformationspfade der einzelnen Sektoren. Ohne neue Technologien und Konzepte gibt es keine disruptive Veränderung und die Klimaziele können nur schwer bis gar nicht erreicht werden. Hierbei geht es u. a. auch darum, bereits vorhandene Innovationen zügig auf den Markt zu bringen und großflächig zu skalieren. Dafür braucht es wiederum innovative bzw. neue Geschäftsmodelle.
- **Innovationen als Beschleuniger:** Es gibt bereits viele neue Lösungen, die uns dabei helfen, Emissionen zu reduzieren. Um den Klimaschutz noch beschleunigen zu können, brauchen wir darüber hinaus neue, andere und zusätzliche (Sprung-)Innovationen in Wirtschaft und Politik.
- **Innovationen als Gestalter:** Die Gesellschaft wird auf disruptive Veränderungen reagieren müssen. Besser (und günstiger) ist es, diese Veränderungen aktiv aus der Gesellschaft heraus mitzugestalten und sich zum Beispiel durch innovative Wohn- oder Arbeitskonzepte, neue Ernährungsweisen, innovative Mobilitätskonzepte etc. zukunftsorientiert zu transformieren und die Volkswirtschaft nachhaltig zu gestalten.
- **Innovationen als Bewahrer:** Insbesondere technische Innovationen ermöglichen den Erhalt der Wertschöpfung in Deutschland, erhalten Arbeitsplätze und sichern Deutschland die Technologieführerschaft im zukünftigen Produktmix.

3.1 Erneuerungen bei Technologien und Konzepten als Basis der Transformation

In den Transformationspfaden wird deutlich, dass Veränderungen im Sinne von Erneuerung notwendig sind, um die Klimaziele zu erreichen. Diese notwendigen Veränderungen umfassen sowohl technologische Neuerungen als auch neue Ansätze bei Produkten, Prozessen, Konzepten, Dienstleistungen, Geschäftsmodellen oder sozialen und politischen Handlungsweisen.

Viele der notwendigen Ansätze sind grundsätzlich bereits verfügbar oder werden in absehbarer Zeit umsetzbar sein. Über diese erforderlichen Anpassungen und Veränderungen hinaus können Innovationen zusätzlich zu einer beschleunigten Emissionsreduktion beitragen.

Innovationen als Möglichmacher in den Transformationspfaden der Sektoren

Viele technische und nicht-technische innovative Veränderungen werden von den Gutachtern und den projektbeteiligten Unternehmen im Rahmen der dena-Leitstudie als fester Bestandteil des Transformationspfads auf dem Weg zur Klimaneutralität gesehen und sind daher auch bereits in der Modellierung berücksichtigt.

Im **Gebäudesektor** (siehe Kapitel 6 „Gebäude“) geht es vor allem darum, neue Marktmodelle, wie beispielsweise serielles Sanieren, von der Pilotphase in den Markthochlauf zu bringen. Darüber hinaus spielen Innovationen im Bereich Digitalisierung und Automatisierung von Gebäuden eine Rolle, durch die sich mit optimierter Datenverwendung und Anlagensteuerung erhebliche Einsparungen im Energieverbrauch lassen. Für einen klimaneutralen Gebäudesektor braucht es zudem innovative neue Konzepte, etwa um das Mieter-Vermieter-Dilemma aufzulösen, und so die Investitionen in Effizienzmaßnahmen zu fördern.

Im **Industriesektor** (siehe Kapitel 7 „Industrie“) enthält die Modellierung insbesondere für die energieintensiven Industrien Stahl, Zement und Chemie innovative Technologien, mit denen Emissionen maßgeblich reduziert werden können. In der Zementproduktion und anderen Industrieprozessen werden CCU (Carbon Capture and Utilization) und CCS (Carbon Capture and Storage) zur Reduktion der Emissionen eingesetzt (siehe Kapitel 10 „Natürliche Ökosysteme und Technische Senken“). Bereits ab 2030 erfolgt die CO₂-Abscheidung über das Post-Combustion-Verfahren und durch innovative Oxyfuel-Abscheidetechnologien bei 5 Prozent der Zementproduktion. Ein früher Hochlauf ist wichtig, um bereits Kapazitäten im Bereich des CO₂-Transports und der CO₂-Speicherung aufzubauen.

In der Chemieindustrie erfolgt die Reduktion der Emissionen über die Prozesse zur Erzeugung von Olefinen oder Aromaten aus Methanol (Methanol-to-Olefins (MtO) bzw. Methanol-to-Aromatics (MtA)). Dabei wird konventionelles, fossiles Naphtha durch biogenes oder synthetisches Naphtha ersetzt. Bis 2045 werden etwa 60 Prozent der Aromate und Olefine über das MtO/MtA-Verfahren erzeugt, weshalb die Nachfrage nach Naphtha nach 2030 stark abnehmen wird. Bereits 2030 wird für grünes Naphtha eine Produktionsmenge von 0,6 Millionen Tonnen angenommen, für das Jahr 2045 weist die Modellierung sogar einen Bedarf von rund 7,5 Millionen Tonnen aus. Die Prozess-emissionen bei der Verarbeitung von Eisenerz werden durch den Einsatz von Wasserstoff reduziert, die Primärstahlerzeugung erfolgt bis 2045 vollständig über den Einsatz der DRI/EAF (Direct Reduced Iron / Electric Arc Furnance). Mit dieser Technologie werden bereits 2030 rund 10 Millionen Tonnen Stahl emissionsfrei produziert, 2045 werden es 30 Millionen Tonnen sein.

Zu den Innovationen im **Verkehrssektor** (siehe Kapitel 8 „Verkehr“) zählen neben technischen Innovationen auch neue Konzepte und Prozesse, so zum Beispiel im Logistikbereich. Dadurch werden beispielsweise Leerfahrten reduziert und die Fahrzeugausnutzung wird erhöht. Durch eine höhere Auslastung der Fahrzeuge kann die zu erbringende Transportleistung (Tonnenkilometer) in weniger Fahrzeugkilometern erzielt werden.

Auch neue Kraftstoffe und neue Antriebstechnologien nehmen zu: So wird in der Modellierung angenommen, dass ab 2030 Brennstoffzellen für Nutzfahrzeuge in größerem Maßstab in den Markt drängen. In der Luftfahrt sind alternative Antriebe nur in geringem Maße möglich. In der Power to Liquid (PtL)-Roadmap der Bundesregierung wird für die Luftfahrt bis 2030 ein Bedarf von mindestens 2,4 TWh PtL-Kerosin erwartet. Langfristig wird Kerosin komplett erneuerbar bereitgestellt. Auch die Schifffahrt kann durch den Einsatz klimaneutraler Kraftstoffe sowohl im Binnenbereich als auch in der internationalen Schifffahrt defossilisiert werden. In der Modellierung wird wegen ihrer Relevanz für die deutsche Klimabilanz nur die Binnenschifffahrt betrachtet. Hier werden aktuell Diesel-, LNG- (Liquefied Natural Gas) und Wasserstoffantriebe berücksichtigt.

Darüber hinaus wird die Zunahme von Mikromobilität erwartet. Mikromobilität ist hauptsächlich eine Ergänzung auf der „letzten Meile“ und kann dort eingesetzt werden, um Zulieferverkehre durch Pkw und leichte Nutzfahrzeuge teilweise zu ersetzen. Mikromobilität trägt zum einen zur Verkehrswende bei, weil die Antriebe in diesem Segment (nahezu) keine Emissionen erzeugen. Zum anderen kann sie die Verkehrsdichte (im urbanen Raum) lockern, da die Fahrzeuge im Vergleich zu herkömmlichen Pkws und Lieferwagen wesentlich kleiner sind.

In der **Energiewirtschaft** (siehe Kapitel 9 „Energie“) werden in der Modellierung die Weiterentwicklung und der Markthochlauf innovativer Technologien in allen Bereichen, das heißt Erzeugung, Speicherung, Flexibilisierung und Transport, sowie übergreifend im Bereich CCU (Carbon Capture and Utilization), CCS (Carbon Capture and Storage) und DAC (Direct Air Capture), angenommen. Auch in der Energiewirtschaft spielt Wasserstoff eine entscheidende Rolle, da grüner Wasserstoff fossile Energieträger substituieren kann. Bis 2030 werden die Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) in Deutschland (5 Gigawatt) und der Europäischen Wasserstoffstrategie in Europa umgesetzt. Langfristig werden hohe Kapazitäten in Deutschland, Europa und weltweit erwartet. Mit der Zunahme der Elektrolysekapazitäten werden Wasserstoffspeicher im kleinen Maßstab bei Onsite-Elektrolyse eingesetzt (ab 2030) und im großen Maßstab (Kavernenspeicher u. Ä.) verwendet, sobald H₂-Rückverstromung betrieben wird (ab Mitte der 2030er Jahre). Dies erhöht die Versorgungssicherheit und ermöglicht die Bereitstellung hoher Leistung über längere Zeiträume für die Rückverstromung.

In den Modellierungsergebnissen wird außerdem schon bis 2030 ein Zubau von wasserstofffähigen Gas- und Dampf-Kombikraftwerken (GuD), Gasturbinen und Gas-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) erwartet. Mit Wasserstoff betrieben werden die Anlagen aber erst Ende der 2030er, Anfang der 2040er. Bis dahin wird in den Anlagen Methan verstromt. Reine Gaskraftwerke werden bis 2050 von wasserstofffähigen Kraftwerken verdrängt. Im Fernwärmenetz werden zur klimaneutralen Fernwärmebereitstellung ab sofort Großwärmepumpen, Geothermie und Solarthermie eingebunden. Im Ausland wird über die bisher genannten Innovationen hinaus DACCUS (Direct Air Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage) angenommen. DACCUS kann als negative Senke oder als CO₂-Quelle für Produkte, insbesondere PtL-Energieträger, dienen.

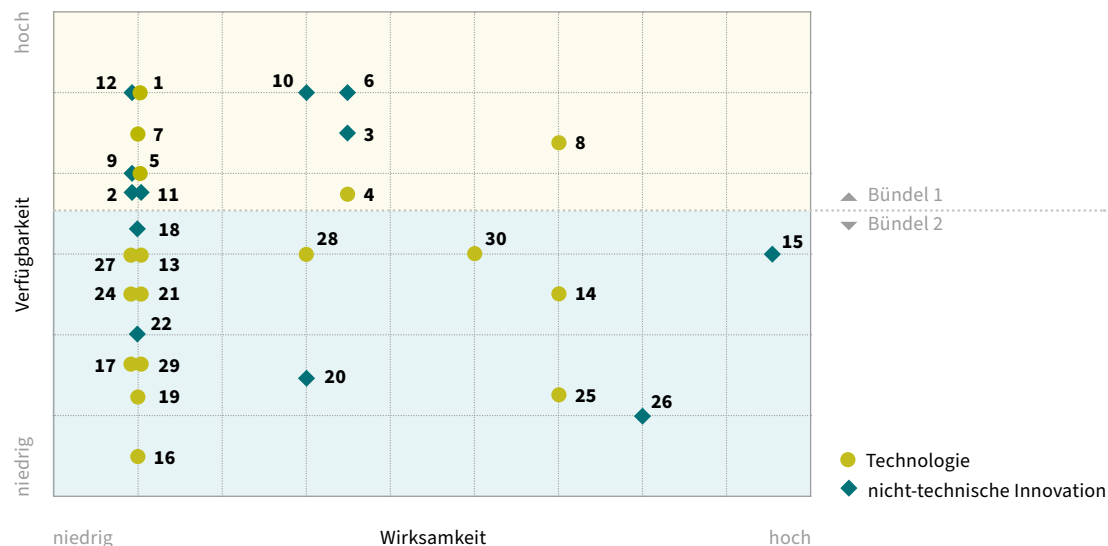
3.2 Innovationen beschleunigen den Weg zur Klimaneutralität

Zusätzlich zu den Innovationen, die bereits in der Modellierung enthalten und fester Bestandteil des Transformationspfads sind, können weitere Innovationen zur beschleunigten Reduktion der Emissionen beitragen. Berücksichtigt werden dabei neben Technologien auch nicht-technische Innovationen. Das sind neue Konzepte und Prozesse (beispielsweise Geschäftsmodelle) und Ansätze zur gesellschaftlichen Transformation, die durch neue Angebote eine (freiwillige) Verhaltensänderung anstoßen sollen.

Die Innovationen, die Schätzungen von Expertinnen und Experten zufolge das Potenzial zur Reduzierung der nationalen THG-Emissionen für ein Industrieland wie Deutschland um mindestens 1 Millionen Tonnen CO₂-ä haben, sind hier beispielhaft aufgeführt und nach Wirksamkeit und Verfügbarkeit geordnet (siehe Abbildung).¹²

Abb. 3.2 Wirksamkeit und Verfügbarkeit der Innovationen

Qualitative Einschätzung



Bündel 1:

hohe Wirksamkeit, kurzfristige Verfügbarkeit

- 1 Agri-Photovoltaik (Agri-PV, APV), (Energie)
- ◆ 2 Ausschreibung nachhaltige Mobilitätsdienstleistungen durch Kommunen (Verkehr)
- ◆ 3 CO₂-Schattenpreis bei öffentlichen Beschaffungen (Industrie)
- 4 Bauwerkintegrierte PV (BIPV), (Energie)
- 5 Künstliche Intelligenz im Energiemanagement (Gebäude)
- ◆ 6 Mobilitätspauschale (Verkehr)
- 7 Floating PV (FPV), (Energie)
- 8 Serielles Sanieren (Energiesprong), (Gebäude)
- ◆ 9 Standardisierte Mehrwegverpackungen im Pfandsystem 1: für Lebensmittel (Industrie)
- ◆ 10 Tempolimit auf Autobahnen (Verkehr)
- ◆ 11 Transparenz durch obligatorischen CO₂-Fußabdruck (Industrie)
- ◆ 12 Upgrade der Radwege (Verkehr)

Bündel 2:

hohe Wirksamkeit, mittel- bis langfristige Verfügbarkeit

- 13 Algen 1: nachhaltige Carbonfaser-Bauteile (Green Carbon), (Gebäude)
- 14 Alternative Baustoffe: Pilzfasern (Gebäude)
- ◆ 15 „Zero Emission“-Innenstädte (Verkehr)
- 16 Autonome Fahrangebote (Verkehr)
- 17 3D-Druck: Hohlraumzement (Gebäude)
- ◆ 18 Bioenergiedörfer (Energie)
- 19 CCS mit Mineralisierung in Situ (Industrie)
- ◆ 20 Kreislauf-/Recyclingpflicht (Industrie)
- 21 Lignin-Kunststoff (Industrie)
- ◆ 22 Nutzen statt besitzen 1: Fahrzeuge (Verkehr)
- 24 PV Module next generation (Energie)
- 25 Tiefengeothermie (Energie)
- ◆ 26 Umbau Güterverkehr zu Schiene (Verkehr)
- 27 Vehicle-2-Grid (Energie)
- 28 Verkehrswege PV (Road Integrated PV, RIPV), (Energie)
- 29 Vermaschtes HGÜ-Stromnetz (DC Overlay), (Energie)
- 30 Höhenwind (Energie)

Quelle: Eigene Erhebung.

¹² Die ausführlichen Ergebnisse des Innovationsdiskurses werden in einem gesonderten Bericht, dessen Veröffentlichung für November 2021 geplant ist, nachzulesen sein.

Um schnell Emissionen zu reduzieren, sollten insbesondere kurzfristig verfügbare Innovationen zügig um- und eingesetzt werden. Innerhalb der Matrix lassen sich die Innovationen mit einer hohen Wirksamkeit und einer Verfügbarkeit innerhalb der nächsten 3 bis 5 Jahre identifizieren. Auffällig ist dabei, dass es sich innerhalb dieses Bereichs zum Großteil um nicht-technische Innovationen handelt. Bei einer genaueren Betrachtung dieser Innovationen zeigt sich außerdem, dass auch die Skalierbarkeit mindestens teilweise möglich ist und die CO₂-Vermeidungskosten vor allem für die neuen Konzepte und Transformationsansätze als gering bewertet sind. Diese Innovationen können als „Quick Wins“ betrachtet werden, da sie im Prinzip „einfach nur umgesetzt“ werden müssen.

Die aufgeführten Innovationen betreffen zu einem großen Teil den Verkehrssektor: die Mobilitätspauschale, das Upgrade der Radwege, das Tempolimit auf Autobahnen und die Ausschreibungen für nachhaltige Mobilität durch Kommunen im Randgebiet. Die Umsetzung der „Quick Wins“ in diesem Bereich zeigt deutlich, dass verschiedene Akteure aktiv werden müssen, um Innovationen voranzubringen: Das Tempolimit muss auf Bundesebene eingeführt werden, für das Upgrade der Radwege sind die Städte und Kommunen verantwortlich und die Mobilitätspauschale muss von Unternehmen umgesetzt werden. Diese Ansätze greifen teilweise in das Mobilitätsverhalten der Bürgerinnen und Bürger ein, daher sind auch ihre Akzeptanz und ihre Bereitschaft zur Veränderung hier von Bedeutung.

Neben den Konzepten und Prozessen sowie transformatorischen Ansätzen sind in diesem Bündel 1 auch fünf technische Lösungen enthalten, die bereits in den Markt eingetreten sind oder kurz davor stehen. Dabei handelt es sich insbesondere um alternative Photovoltaik-Anwendungen. Mit Ausnahme von Energiesprung werden für die Technologien ebenfalls geringe CO₂-Vermeidungskosten erwartet. Auch diese Ansätze können bei zügiger Markteinführung und breiter Anwendung schnell einen relevanten Beitrag zur Reduktion der Emissionen leisten.

Das Bündel 2 enthält dagegen nur fünf Innovationen, bei denen es sich nicht um eine Technologie handelt: Recyclingpflicht, „Nutzen statt besitzen“-Fahrzeuge, Umbau des Güterverkehrs, „Zero Emission“-Innenstädte und Bioenergiedörfer. Auch diese Konzepte benötigen ausreichend Zeit zur Umsetzung und sollten daher in der langfristigen Planung bereits jetzt mit bedacht werden.

Im Gegensatz zu diesem Bündel 1 der kurzfristig verfügbaren Innovationen zeigt die Matrix, dass unter den mittel- bis langfristig (in 5 bis 10 Jahren und danach) verfügbaren Innovationen vor allem Technologien, nur wenige nicht-technische Lösungen enthalten sind. Die Skalierbarkeit und die CO₂-Vermeidungskosten variieren in diesem Bündel 2

Innovative Technologien können mittel- bis langfristig erheblich zur Beschleunigung der Klimawende beitragen.

stark. Sehr gut bewertet ist die Skalierbarkeit bei Photovoltaik-Module Next Generation, Vehicle-2-Grid und Autonome Fahrangebote. Insgesamt werden die Skalierbarkeit und

die CO₂-Vermeidungskosten in diesem Bündel eher mittelmäßig eingeschätzt. Das bedeutet, dass insgesamt die Einführung und die breite Umsetzung schwieriger sind als bei den Innovationen in Bündel 1. Dennoch kann jede dieser Technologien einen wichtigen Beitrag zur beschleunigten Emissionsreduktion leisten. Damit diese Technologien langfristig verfügbar sind, muss bereits jetzt die (Weiter-)Entwicklung vorangetrieben und die Chancen des Markteintritts erhöht werden.

Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, dass kurzfristig insbesondere nicht-technische Neuerungen „einfach umgesetzt“ werden und so maßgeblich zur beschleunigten Reduktion der Emissionen beitragen können und langfristig der Fokus eher auf technologischen Innovationen liegt, deren Weiterentwicklung und Marktreife bereits jetzt vorangebracht werden muss.

3.3 Aktives Chancenmanagement und ein innovationsfreundliches Umfeld

Ein innovationsfreundliches Umfeld zeichnet sich durch transparente Kommunikation, Zugang zu Wissen, eine positive Fehlerkultur, Technologieoffenheit, Freiraum für Ideen und die Bereitstellung der nötigen Ressourcen (z. B. finanzielle Unterstützung oder Zeit) aus. Die Erfüllung dieser Kriterien bildet eine gute Grundlage für die Entwicklung von Ideen. Die Idee an sich macht allerdings noch keine erfolgreiche Innovation aus. Jede Idee steht dann vor der Herausforderung der Umsetzung.

Innovative Ideen stehen vor besonderen Herausforderungen

Beide Bündel enthalten einen Mix aus Innovationen, die jeweils vor individuellen Herausforderungen stehen. Um insgesamt die Umsetzung zu ermöglichen und Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Innovationen zu erhöhen, müssen dafür Rahmenbedingungen geschaffen werden. Auf allen Ebenen gibt es bereits innova-

tive Ideen, deren Umsetzung, Markteinführung und Skalierung aktuell jedoch häufig noch deutlich zu langsam gehen und zum Teil sogar gänzlich scheitern.

In der Gesamtsicht lassen sich diese Herausforderungen grob folgenden vier Kategorien zuordnen:

- **Technische Herausforderungen:** Die Markteinführung neuer Technologien scheitert aktuell immer wieder an technischen Herausforderungen bzw. am mangelnden Reifegrad der Technologien (Technology Readiness Level, TRL) und einem zu geringen Tempo bei der Weiterentwicklung. Gründe hierfür können zum Beispiel fehlende Forschungs- und Fördergelder für Pilotprojekte oder auch aktuell noch nicht lösbare technische Probleme sein (Beispiel Kernfusion).
- **Hohe Kosten:** Die Einführung und der Betrieb neuer Technologien, aber auch die Umsetzung innovativer Konzepte sind häufig noch mit einem hohen Kostenaufwand verbunden. Die Gründe dafür können beispielsweise in einem hohen Verwaltungs- und Logistikaufwand bei der Umsetzung neuer Konzepte oder einer fehlenden Anpassung des Steuer- und Abgabensystems liegen.
- **Regulatorische Hemmnisse:** Die schnelle Einführung und Umsetzung innovativer Technologien und Konzepte scheitert häufig an Barrieren durch die aktuelle Gesetzgebung. Hier spielen zum Beispiel mangelnde Rechtssicherheit, aber auch Fehlanreize, die eine Umsetzung finanziell unattraktiv machen, eine Rolle. Auch aufwendige und langwierige Genehmigungsprozesse stellen immer wieder eine große Hürde dar (Beispiel Agri-PV). Zu den regulatorischen Herausforderungen zählt auch, dass nicht nur die Bundesebene für die Umsetzung einiger Innovationen zuständig ist, sondern auch die Landes- und Kommunalebene eine Umsetzung aktiv voranbringen muss.

- **Akzeptanzprobleme:** Sowohl bei der Einführung neuer Technologien als auch bei der Umsetzung innovativer Konzepte kann eine mangelnde Akzeptanz zum Stillstand bzw. zum Scheitern führen. Die Gründe für Akzeptanzprobleme sind vielschichtig und können zum Beispiel in mangelndem Vertrauen in neue Technologien, in fehlendem Wissen oder in bewusster Fehlinformation über die Zusammenhänge, aber auch in einer zum Teil tief verankerten Angst vor Veränderungen liegen (Beispiel Windenergie an Land).

Ein aktives Chancenmanagement ist ein strategischer Lösungsansatz

Um die Möglichkeitsräume, die durch Innovationen entstehen, für die Umsetzung und Beschleunigung der Energiewende nutzen zu können, braucht es nun ein aktives Chancenmanagement seitens der Politik. Hierfür muss die Vielzahl der Chancen, die in den bereits bestehenden innovativen Ideen und Ansätzen stecken, erkannt und die Umsetzung deutlich erleichtert werden. Dafür müssen Wirtschaft, Wissenschaft und Politik vernetzt, innovatives Denken weiter gefördert und offene Räume dafür geschaffen und erhalten werden.

Außerdem ist zu beachten, dass bestehende Technologien und verfügbare Lösungen ebenfalls genutzt und nicht abgewertet werden, da die Hoffnung nicht nur auf zukünftige Innovationen gesetzt werden darf. Dies würde nicht ausreichen, um die Klimaziele zu erreichen.

AGENTUR FÜR SPRUNGINNOVATIONEN – SPRIND¹³

Die Agentur für Sprunginnovationen wurde im Dezember 2019 mit dem Ziel gegründet, Ideen mit dem Potenzial zur disruptiven Innovation zu identifizieren, zu fördern und den Markteintritt zu ermöglichen. Thematisch stehen dabei Innovationen, die eine gesellschaftliche Herausforderung angehen, im Mittelpunkt. Die Ideen werden zum einen in Innovationswettbewerben und zum anderen durch die Untersuchung bereits bestehender Forschung identifiziert. Im Aufsichtsrat der Agentur sitzen zehn Mitglieder aus Wissenschaft, Wirtschaft und der Politik.

Zu den aktuellen Projekten zählt beispielsweise die erste Höhenwindanlage im Binnenland, die mit größerer Höhe und effizienter Bauweise die Fertigungskosten pro erzeugter Kilowattstunde deutlich reduzieren kann.



¹³ Sprin-D, kein Datum.

Digitalisierung der Energiewende

Die Energiewende bedeutet den Umbau des Energiesystems von einem zentral organisierten System mit wenigen Hundert großen Erzeugern (Kraftwerken), zu einem System mit Millionen von dezentralen, erneuerbaren Erzeugern sowie Speichern und steuerbaren Verbrauchern. Dabei verschmelzen die Rollen von Erzeugern und Verbraucher zunehmend zu Prosumern (kombinierte Produzenten und Konsumenten) bzw. Flexumern (flexible Verbraucher). Diese können Energie verstärkt dann nutzen, wenn sie aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht und haben zudem die Möglichkeit, Energie sektorübergreifend zu beziehen oder in anderen Sektoren bereitzustellen. Für diese Verknüpfung von Erzeugern, Verbrauchern, Speichern, Prosumern und Flexumern (auch über Sektorgrenzen hinweg) bedarf es digitaler Lösungen, welche durch teil- bzw. vollautomatisierte Prozesse eine laufende Steuerung und Abstimmung der unzähligen Akteure sicher und in Echtzeit ermöglichen und gleichzeitig Transaktionskosten senken. Die Digitalisierung ermöglicht dabei auch das Monitoring und die Steuerung von Marktteilnehmern auf lokaler Ebene, beispielsweise in Kommunen und Quartieren. Durch effiziente und umfassende Digitalisierung kann das Energiesystem trotz der höheren Komplexität durch neue Akteure und Rollen weiterhin stabil und robust gestaltet bzw. gesteuert werden.

Digitalisierung stellt daher einen wichtigen Baustein der Energiewende dar und unterstützt die direkte oder indirekte Minderung von THG-Emissionen und die Transformation zu Klimaneutralität.

Wesentlicher Kern der Digitalisierung ist die Erfassung und Verarbeitung von Daten in digitaler Form, häufig über die Grenzen einzelner Akteure (bspw. Unternehmen) hinweg. Auf Basis von digitaler Datenverarbeitung und -austausch können neue Lösungen entwickelt oder bestehende verbessert werden. Insbesondere wird hierdurch eine Erhöhung der Anteile erneuerbarer Energien, der Erhalt und die Steigerung von Versorgungssicherheit, Systemeffizienz und Energieeffizienz, sowie eine höhere Akzeptanz und Partizipation in der Energiewende ermöglicht.

So kann beispielsweise eine zentrale Datenaustauschplattform für die Marktkommunikation¹⁴, wie sie in vielen EU-Ländern bereits aktiv ist, den Datenaustausch zwischen Anbieter bzw.

Lieferant, Netzbetreiber und Verbraucher vereinfachen. In Dänemark wird die Abrechnung der Stromkosten über einen solchen Data Hub abgewickelt. Dieser Hub bietet eine hohe Transparenz der Kosten und fördert mit Hilfe

Vereinfachung und Standardisierung im Datenaustausch: Digitalisierung verbessert die Marktkommunikation.

der verfügbaren Daten die Sektorkopplung und einen flexiblen Verbrauch. Energieverbrauchende profitieren außerdem von vereinfachten Prozessen zum Wechsel des Energieversorgers. In Estland ist über eine digitale Identität der Abruf von Verbrauchsdaten und die Abwicklung sämtlicher energierelevanter behördlicher Prozesse über eine zentrale Datenplattform möglich, was die Energiemarktteilnahme vereinfacht.

Auch der Einsatz von Algorithmen bis hin zur Künstlichen Intelligenz (KI) hat Potenzial. Die wichtigsten Anwendungsfälle in der Energiewirtschaft sind die Erkennung von Mustern in Daten, die Koordinierung und Optimierung von Energiesystemen mit wachsendem Anteil an erneuerbaren Energien sowie die Verwaltung komplexer, dezentraler Energiesysteme. Zunehmend intelligente

Zunehmend intelligente Algorithmen erleichtern die Erkennung von Mustern und die Optimierung komplexer Systeme.

Algorithmen kommen beispielsweise bei der Lastvorhersage¹⁵ zum Einsatz. KI unterstützt die Betriebsoptimierung von PV-Anlagen mit Speicher und erhöht durch gezielte Spitzenlastkappung die Versorgungssicherheit. Die Identifikation der Lastverschiebung kann außerdem zur Erhöhung

der Eigenverbrauchsquote beitragen und eine automatisierte Lastverlagerung in Zeiten eines hohen Angebots eine bessere Integration erneuerbarer Energien ermöglichen.

¹⁴ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021d: 74 ff.

¹⁵ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2019: 40 f.

Auch bei der Individualisierung von Produkten und Marketingmaßnahmen¹⁶ auf Basis von Struktur- und Verbrauchsdaten kann KI passgenaue Lösungen für Nutzerinnen und Nutzer zu niedrigeren Kosten generieren, da große Datenmengen automatisch ausgewertet werden können.

Individualisierung von Produkten und Kommunikation erhöht den (wahrgenommenen) Wertbeitrag.

Durch die Personalisierung nach Clustern (z. B. geografische und demografische Daten) kann beispielsweise ein Angebot zur Installation einer PV-Anlage gezielt an Besitzerinnen und Besitzer eines Eigenheims mit geeigneter Dachfläche gerichtet werden. Durch zugeschnittene Produkte kann zudem der Nutzen für Verbraucher und somit möglicherweise auch die Akzeptanz der Energiewende gesteigert werden.

Dateninfrastrukturen als technische Basis für Digitalisierung

Durch den steigenden Koordinations- und Steuerungsaufwand für die Markt- und Netzintegration im Zuge der Energiewende wird die Bedeutung von Daten für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit weiter zunehmen. Um die Chancen und Möglichkeiten der Digitalisierung nutzen zu können, muss eine Grundlage für einen verlässlichen Umgang mit qualitativ hochwertigen Daten geschaffen werden. Gleichzeitig macht der steigende Digitalisierungsgrad das Energiesystem als „kritische Infrastruktur“¹⁷ zu einem immer attraktiveren Ziel für Cyber-Angriffe. Wie die Frage nach der sicheren Erzeugung und Übertragung von Energie ist die sichere Digitalisierung der Energiewende insbesondere eine Infrastrukturfrage. Auch digitale Infrastrukturen liegen daher im besonderen Verantwortungsbereich des Staates und bedürfen einer umfassenden Regulierung.

Es lassen sich drei Komponenten unterscheiden, die auf eine solide Dateninfrastruktur einzahlen: Infrastrukturen zur Datenerfassung, zur Datenübertragung, sowie zur Datenhaltung. Jede Ebene muss dabei ein hohes Maß an Datenschutz sowie Daten- und IT-Sicherheit gewährleisten können – jeweils für sich als auch im Zusammenspiel mit den anderen Komponenten.

In Deutschland stehen „intelligente Messsysteme“ (iMSys) als zentraler Baustein einer sicheren Dateninfrastruktur für die Energiewende im Mittelpunkt. Ein iMSys besteht dabei nach dem Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende aus einer „modernen Messeinrichtung“ (mMe) und deren Anbindung an ein Kommunikationsnetz über ein „Smart-Meter-Gateway“ (SMGW). Dabei erhebt die mMe energiewirtschaftlich relevante Daten, während das SMGW die sichere Datenübertragung und die Datenhaltung steuert. Zudem sollen über das SMGW zukünftig Erzeugungsanlagen und Lasten gesteuert werden. Als zentrale Kommunikationseinheit soll das SMGW die aktive und selbstbestimmte Teilnahme von Verbrauchern, Prosumern und Flexusern an der Marktkommunikation ermöglichen. Die Akteure können damit mehr Einfluss auf Verbrauch oder Einspeisung erneuerbarer Energie nehmen und gleichzeitig mehr Kontrolle über die dabei anfallenden Daten erhalten.

Aus einer datengetriebenen Perspektive heraus trägt die SMGW-Entwicklung dem dezentralen Charakter der Energiewende Rechnung: Daten sollen lokal verarbeitet und nur anwendungsfallsscharf direkt an die jeweils betroffenen Marktteilnehmer gesendet werden. Zum einen bricht dies die kettenförmige Kommunikation der bisherigen Marktkommunikation zugunsten einer sternförmigen Kommunikation auf. Zum anderen kann auf diese Weise die Wertschöpfung aus lokaler Energieeinsparung und dezentraler Energieeinspeisung in Zukunft um eine dezentrale Datenwertschöpfung ergänzt werden.

¹⁶ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2019: 41 f.

¹⁷ Kritische Infrastrukturen sind Anlagen, Systeme oder ein Teil davon, die von wesentlicher Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen, der Gesundheit, der Sicherheit und des wirtschaftlichen oder sozialen Wohlergehens der Bevölkerung sind und deren Störung oder Zerstörung erhebliche Auswirkungen hätte.“ Kritische Infrastrukturen, kein Datum.

Neben dem SMGW benötigt die Digitalisierung der Energiewende einen schnellen, sicheren und kostengünstigen Übertragungsweg. Für die Anbindung von SMGWs in der Fläche und im ländlichen Raum sind jedoch weder kabelgebundene Kommunikationsnetze noch das kommerzielle Mobilfunknetz geeignet. Zur Sicherstellung der Steuerungs- und Monitoring-Funktionalität sowie der Kommunikation auch im Falle großflächiger Stromausfälle (Schwarzfall) wird daher ein autarkes Funknetz für die Energiewirtschaft im 450 MHz-Frequenzbereich aufgebaut, welches durch sehr gute Ausbreitungseigenschaften und gute Durchdringung von Wänden eine Flächenabdeckung mit vergleichsweise wenigen Funkmasten ermöglicht.

In Ergänzung zu SMGWs und den hierfür notwendigen Netzen werden künftig vermehrt Niedrigenergie-Weitverkehrs-Netzwerke (Low Power Long Range Wide Area Network, LoRaWAN) eingesetzt. Solche regionalen oder kommunalen Funknetze sind auf digitale Kommunikations- oder Steuerungsleistungen mit zahlreichen verteilten, häufig batteriebetriebenen Sensoren und Aktoren im „Internet der Dinge“ (Internet of Things, IoT) ausgelegt. Dabei ermöglicht LoRaWAN eine sichere bidirektionale Kommunikation, Lokalisierung und Mobilität von Dienstleistungen mit Ende-zu-Ende Verschlüsselung. Insbesondere im Rahmen kommunaler Smart City-Projekte und kostengünstiger Sensorik für Umweltdaten hat sich LoRaWAN bewähren können.

Gute Governance der Digitalisierung schafft Vertrauen

Neben der Notwendigkeit zum Aufbau von technischen Dateninfrastrukturen müssen auch Maßnahmen ergriffen werden, die das Vertrauen in die Erweiterung des physischen Energiesystems durch ein digital-informatorisches System stärken. Bestehende Rollen müssen daher um die hierfür notwendigen Kompetenzen und Aufgabengebiete erweitert bzw. neue Rollen gestaltet werden. Diese Fragen zu Vertrauen und Rollen können aggregiert als Governance der Digitalisierung zusammengefasst werden. Diese spielt eine wesentliche Rolle, um notwendige Sicherheitsaspekte in einem digital geprägten Energiesystem frühzeitig zu adressieren und zudem wettbewerblich faire Voraussetzungen zu schaffen, damit die Akteure des zukünftigen vernetzten Energiesystems wirtschaftlich nachhaltig agieren können. Gleichzeitig wird auf der Ebene der Governance definiert, inwieweit neue Geschäftsfelder im Energiesystem der Zukunft entstehen können.

Für viele zukünftige Anwendungen wie die teil- bzw. vollautomatisierte Anmeldung sowie zukünftige Teilhabe von Erzeugern, Speichern und Verbrauchern an unterschiedlichen Energiemärkten ist es notwendig, zunächst eine eindeutige digitale Identität

Digitale Identitäten
als Schlüssel für die
Teilhabe von Akteu-
ren und Geräten am
Energiesystem.

aller am Energiesystem beteiligten Akteure und Geräte zu definieren. Eine solche digitale Identität ist auch Voraussetzung, um die Herkunft und mögliche Verarbeitungen bzw. Veränderungen digitaler Daten nachvollziehen zu können. Nur

so kann die Datenqualität gefördert und eine Vertrauensbasis etabliert werden, welche Interoperabilität sowie Akteurs- und Technologieoffenheit ermöglicht und diese mit den Prinzipien von Datenschutz, Datensparsamkeit und Datensouveränität verknüpft.

Bei einem Energiesystem mit einer Vielzahl dezentraler und volatiler Einspeiser und Verbraucher dürften automatisch ablaufende Vorgänge für eine effiziente Steuerung an Bedeutung zunehmen. Hier bietet sich insbesondere der Einsatz von Smart Contracts an, die sich als „in Programmcode übersetzte Verträge“ vor allem für Vorgänge eignen, die in großer Zahl immer wieder auftreten und standardisiert ablaufen. So lassen sich beispielsweise relativ einfach Systeme umsetzen, die etwa Strom aus der Batterie des Elektroautos einer Privatperson einspeisen, wenn der gebotene Preis eines Netzbetreibers eine bestimmte Grenze überschreitet.

Datenanalyse ermöglicht neue Wertschöpfung

Die Datenanalyse nimmt als letzte Wertschöpfungsstufe der Digitalisierung eine zentrale Rolle ein. Dabei erhalten Daten häufig erst durch die Analyse und Ableitung von Handlungen (beispielsweise die Durchführung steuernder Maßnahmen oder marktlicher Transaktionen) eine Verwertungslogik und damit einen Wert. Dabei sind konkrete Anwendungs- bzw. Nutzungsfälle mitunter bei der Erhebung noch nicht erkennbar. Es besteht daher seit mehreren Jahren eine Diskussion um offene oder geschlossene digitale Informationssysteme bzw. eine verpflichtende Offenlegung von Energiedaten (Open Data). Treiber der Diskussion ist einerseits das übergeordnete Interesse, durch frei verfügbare Energiedaten die Hebung von volkswirtschaftlichen Potenzialen durch neue, auf innovativer Datenanalyse basierende Leistungen und Geschäftsmodelle zu erleichtern. Dem entgegenstehend ist die Erkenntnis, dass es für die Akteure vorteilhaft bleiben muss, von durch eigene Datenerhebung geschaffenen Werten auch selbst wirtschaftlich profitieren zu können.

Um dieses natürliche Spannungsfeld aufzulösen, sollten Diskussionsprozesse gestartet werden, um nachhaltige und faire Konzepte für eine Akteursübergreifende Datenökonomie zu entwickeln und auszuweiten. In einem ersten Schritt wären dazu Ansätze notwendig, um den Wert von Datensätzen zu bestimmen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der gleichzeitig eine Möglichkeit bietet, um den Wert von Datensätzen greifbarer zu machen, ist die Frage nach der Datenqualität. Dabei lassen sich Daten ebenso wie Technologien und Anwendungen in Abhängigkeit der spezifischen Anforderungen anhand der Eigenschaften Integrität, Authentizität, Verfügbarkeit, Vertraulichkeit, Anonymität, Durchsatz und Ressourcenbedarf bewerten. Dabei stehen diese Eigenschaften teilweise in einem Spannungsverhältnis zueinander bzw. haben widersprechende Schutzziele.¹⁸ Eine systematische Bewertung dieser Eigenschaften soll zu einem hohen Maß an Datenschutz, Datensicherheit und Datensouveränität beitragen und die Grundvoraussetzung für den Einsatz von Digitalisierung in den kritischen Infrastrukturen der Energiewirtschaft gewährleisten.

Gleichzeitig zählt bei der Datenanalyse nicht nur Qualität, sondern auch Quantität. Auch qualitativ hochwertige Daten, die aber nicht in der notwendigen Menge vorhanden sind, können ein Hemmnis darstellen. Eine KI-Software zur Schadenserkenennung von Bauteilen an Windkraftanlagen benötigt ausreichend Daten schadhafter Teile um verlässliche Aussagen treffen zu können. Sind diese Daten nicht in ausreichender Menge vorhanden, ist auch die Software nur begrenzt nützlich.

¹⁸ Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), 2019.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode



AUFGABE 11

Chancen durch aktives Chancenmanagement erkennen und nutzen

Der Staat sollte als aktiver Change-Agent Innovationen anstoßen und ermöglichen. Durch das Zusammenbringen und Miteinbeziehen von treibenden Innovationsakteuren in den unterschiedlichen Sektoren sollte ein aktives Chancenmanagement ermöglicht werden, indem Chancen erkannt und die Eintrittswahrscheinlichkeit durch entsprechende Maßnahmen erhöht wird. Innovationsakteure sollten als Treiber, Gestalter und Umsetzer von innovativen Technologien, Prozessen und Konzepten agieren. Durch die Vernetzung von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft sollte ein Umfeld geschaffen werden, in dem Ideen entwickelt sowie der Markteintritt und die Skalierbarkeit ermöglicht werden. Start-ups können dabei von der Expertise etablierter Unternehmen profitieren und die Unternehmen von Start-Ups Anpassungsfähigkeit und Adaptionsgeschwindigkeit lernen.

Für die Politik als Innovationstreiber und Innovations-Portfoliomanager sollten auch Misserfolge und Experimente Teil des Innovationsprozesses sein und aktives Lernen aus Fehlern und Experimenten ermöglicht werden. Ein innovationsfreundliches Umfeld benötigt neben einer positiven Fehlerkultur auch transparente Kommunikation, Technologieoffenheit, Zugang zu Wissen, Freiraum für Ideen und die Bereitstellung der nötigen Ressourcen. Ziel muss sein, „Klimaneutralität Made in Germany“ zu etablieren und Deutschland als Industrie- und Technologiennation zu stärken.



AUFGABE 12

Skalierung durch Nachfrageförderung sicherstellen

Die Innovationspolitik sollte nicht nur die Förderung der Entwicklung von Ideen auf der Angebotsseite enthalten, sondern ebenfalls eine Stärkung der Nachfrageseite. Denn für einen erfolgreichen Markthochlauf und eine langfristige Etablierung muss eine dem Angebot entsprechende Nachfrage gesichert werden. Zum einen kann die Nachfrage durch den Erwerb und die Nutzung der Innovationen durch die öffentliche Hand gesteuert werden (Green Procurement). Hier kann beispielsweise die Einführung eines Schattenpreises pro Tonne CO₂ die entsprechende Lenkungswirkung haben. Zum anderen kann die private Nachfrage unmittelbar durch Subventionen oder Steuervorteile und mittelbar ebenfalls durch die Schaffung von Nachfragekompetenz (das heißt, Nutzerinnen und Nutzer wissen, wie die Innovation angewendet wird, usw.) gefördert werden. Darüber hinaus können die Einführung von Normen und Regulierungen, grüner Leitmärkte, Quoten, Zertifikate oder ein starker CO₂-Preis eine zusätzliche Lenkungswirkung hin zu nachhaltigen und grünen Innovationen haben.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- ▶ **Technologieführer werden** (Kapitel 1 „Gesamtstrategie“)
- ▶ **Rolle der Kommunen stärken** (Kapitel 4 „Transformation“)
- ▶ **Mehr Freiräume für Kommunen** (Kapitel 4 „Transformation“ und Kapitel 8 „Verkehr“)
- ▶ **Nachfrage stärken** (Kapitel 7 „Industrie“)



AUFGABE 13

Innovationen auch auf Landes- und Kommunalebene ermöglichen

Der Staat als Treiber und Möglichmacher von Innovationen ist nicht nur die Bundesebene. Viele Innovationen betreffen andere Verwaltungsebenen, so beispielsweise das Upgrade der Radwege, das von den Städten und Kommunen umgesetzt werden muss. Für die Umsetzung benötigen die Städte und Kommunen außerdem finanzielle Unterstützung und den nötigen Spielraum in der Stadtplanung, beispielsweise bei der Anpassung des Straßenverkehrs.

Da die einzelnen Regionen teilweise vor ganz individuellen Herausforderungen stehen, ist eine dezentrale Förderung sinnvoll. Dabei sollten Bundescluster und regionale Cluster dennoch koordiniert werden. Für die Koordination einer erfolgreichen, bundesweiten Umsetzung müssen die Zuständigkeiten optimiert werden. Eine klare Kommunikation und Informationsaustausch ist zum einen zwischen den unterschiedlichen Verwaltungsebenen notwendig. Darüber hinaus ist auch die Kommunikation innerhalb der Ebenen wichtig, da der Austausch von Best-Practice-Beispielen und Erfahrungen dazu beitragen kann, Projekte erfolgreich umzusetzen. Auch Leitfäden können den Ländern, Städten und Kommunen als Hilfestellung bei der Umsetzung dienen. Für die sogenannten Pop-up-Radwege in Berlin hat der Berliner Senat beispielsweise einen Regelplan zur Identifizierung geeigneter Straßen erarbeitet und ergänzend erfolgreich umgesetzten Projekte in einem Onlineportal gesammelt.



AUFGABE 14

Vernetzung auf EU-Ebene

In der EU gibt es bereits verschiedene Rahmen- und Förderungsprogramme, die neben der finanziellen Unterstützung auch sicherstellen sollen, dass es innovative Ideen langfristig in den Markt schaffen. Dies soll vor allem durch die Intensivierung der internationalen Zusammenarbeit und durch den Aufbau von Partnerschaften zwischen der Industrie und der öffentlichen Hand geschehen. Ein Aufbau solcher Partnerschaften ist nicht nur für Ideen, die auf EU-Ebene gefördert werden, sinnvoll, sondern ebenfalls für Innovationen, die von der Ebene der Nationalstaaten kommen. Daher bedarf es einer Vernetzung über diese Ebenen hinaus. Die Kommunikation solcher Programme muss in die Mitgliedstaaten hinein erfolgen, damit die entsprechenden Akteure wirklich von der Vernetzung profitieren können.



AUFGABE 15

Auch Unternehmen müssen auf Erneuerung setzen

Der Staat soll die Rahmenbedingungen für ein innovationsfreundliches Umfeld schaffen. Die Aufgabe von privaten Akteuren ist es, dieses Umfeld zu nutzen und im Wettbewerb die besten Ideen zu entwickeln. Dieses innovationsfreundliche Umfeld soll nicht nur zur Neugründung genutzt, sondern ebenfalls von etablierten Unternehmen stärker wahrgenommen werden. Vor allem die Unternehmen, die in den Schlüsselbranchen der Energiewende tätig sind, so beispielsweise im Bereich Energieversorgung oder Bauwirtschaft, müssen Erneuerungen und Nachhaltigkeit als Teil des zukünftigen Geschäftsmodells verstehen und mehr auf Forschung und Entwicklung setzen. Neben der eigenen Forschung und Entwicklung von Ideen ist auch die Förderung von Start-Ups sinnvoll.

4 Transformation

Wie wird die Transformation zu Klimaneutralität in der Gesellschaft verankert?



Der Weg zur Klimaneutralität betrifft Unternehmen aller Branchen, alle öffentlichen oder privaten Einrichtungen und Institutionen sowie alle Bürgerinnen und Bürger

Der Weg zur Klimaneutralität ist in der Gesamtheit der dafür erforderlichen sozioökonomischen Transformationen einer der **größten Transformationsprozesse in der Geschichte der Menschheit**. Infolge der industriellen Revolution und technischer Entwicklungen wurde global eine beeindruckende Verbesserung der Lebensstandards erreicht.¹ Jedoch sind dafür große Energiemengen erforderlich, die auch heute noch hauptsächlich fossil gedeckt werden. Die Nichtberücksichtigung der planetaren Grenzen und der Endlichkeit natürlicher Ressourcen in den ökonomischen Theorien und Entwicklungen seit Beginn der industriellen Revolution hat ganz erheblich zu dem heutigen desolaten globalen Zustand der Umwelt, insbesondere der Destabilisierung des Klimasystems, beigetragen.

Sowohl global² als auch in Deutschland³ stammen 80 Prozent des Energieverbrauchs aus fossilen Quellen. Daher sind **große und kleine Unternehmen sämtlicher Branchen** aus Industrie, produzierendem Gewerbe und Handel und Dienstleistungen sowie sämtliche öffentlichen und privaten Einrichtungen und Institutionen mehr oder weniger direkt von der Energiewende betroffen: Sie alle müssen sich damit auseinandersetzen, erneuerbare Energieträger und Rohstoffe zu nutzen und ihre Prozesse und Anwendungen emissionsfrei zu gestalten.

Auch für die **Bürgerinnen und Bürger** in Deutschland werden die notwendigen Veränderungen in jedem Lebensbereich spürbar. Durch zentrale Vorgaben einerseits, aber auch die oft dezentrale Umsetzung von Energiewende und Klimaschutz wird zumeist ihr privates Lebensumfeld berührt – im persönlichen Wohnraum, bei der täglichen Mobilität, selbst bei einem Blick auf die umgebende Landschaft und bei ihren beruflichen Perspektiven. Gleichzeitig gibt die Energiewende den Bürgerinnen und Bürgern auch die Möglichkeit, unmittelbar an der klimaneutralen Energieerzeugung teilzuhaben, beispielsweise durch die eigene Photovoltaik-Anlage auf dem heimischen Dach, Balkon oder Fensterbrett. Andere Optionen sind der Bezug von Mieterstrom, eine Beteiligung an einer Energiegenossenschaft oder der Bezug von regionalem Grünstrom des lokalen Versorgers. Weiterhin können sich Bürgerinnen und Bürger bewusst für zukunftsfähige Jobs und die Beschäftigung in zunehmend auf Klimaneutralität ausgerichteten Unternehmen entscheiden.

¹ Zum Beispiel messbar an der in allen Regionen dramatisch gestiegenen Lebenserwartung: Roser et al., 2013.

² International Energy Agency (IEA), 2021b.

³ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2018c.

Neben den technischen Herausforderungen der Energiewende müssen daher auch ökonomische, kulturelle und strukturelle Faktoren dieses gesamtgesellschaftlichen Wandels und die damit verbundenen **immensen gesellschaftlichen und sozialen Herausforderungen**

Das technische System muss umgestaltet werden und die Menschen müssen „mitgenommen“ sowie bei der Veränderung von Verhaltensweisen und Routinen begleitet werden.

betrachtet werden. Auch in der dena-Leitstudie wird ersichtlich, dass der Weg zur Klimaneutralität mit erheblichen transformativen Herausforderungen verbunden ist und in vielen Bereichen eine Trendumkehr erfordert. So sinkt in dem Szenario KN100 die Zahl der Pkws

in Deutschland bis 2045 signifikant, die durchschnittliche Pro-Kopf-Wohnfläche nimmt ab und der Zubau von erneuerbaren Energien vervielfacht sich. Das Verständnis von Mobilität und selbst der Konsum von Nahrungsmitteln verändern sich.

Diese Entwicklungen eröffnen neue Perspektiven, sie bringen aber auch die Gefahr sozialer Spannungen mit sich. Aktuell werden insbesondere steigende Energiekosten, die (erwartete)

finanzielle Belastung durch eine CO₂-Bepreisung und die u. a. sanierungsbedingt steigenden Mietkosten wahrgenommen. Vor allem Haushalte am unteren Ende der Einkommensverteilung sorgen sich vor negativen finanziellen Auswirkungen und dem Verlust von Arbeitsplätzen. Bei einer notwendigen Beschleunigung der transformativen Veränderungen zur Klimaneutralität werden diese gesellschaftlich-sozialen Herausforderungen weiter zunehmen. Und spätestens bei der Diskussion konkreter Maßnahmen zur Umsetzung der Energiewende wird deutlich, dass eine sozial gerechte Ausgestaltung der Maßnahmen ein entscheidender Faktor für das Gelingen von Energiewende und Klimaschutz ist.

Die große gesellschaftliche Herausforderung besteht darin, dass nicht nur ein gewachsenes System technischer Anlagen und Infrastrukturen auf erneuerbare Energien und Rohstoffe sowie emissionsfreie Prozesse und Anwendungen umgestellt werden muss. Es müssen auch die Routinen und Verhaltensweisen der Menschen den Erfordernissen einer nachhaltigen, klimagerechten und ressourcenschonenden Entwicklung angepasst werden, denn die Klimaziele sind in einer Art ambitioniert, dass allein technische Veränderungen nicht zum Ziel führen.

Vier Pfeiler für eine erfolgreiche Transformation

Klimaneutralität kann nur gelingen, wenn die transformativen Veränderungen von Politik, Wirtschaft und Bürgerinnen und Bürgern so begleitet werden, dass das Erreichen von Klimaneutralität als **solidarische Gemeinschaftsaufgabe** verankert wird und individuelle Partikularinteressen überwunden werden.

Energiewende und Klimaschutz müssen gemeinsam mit den Menschen gestaltet werden, um erfolgreich zu sein. Eine Partizipation an der Energiewende kann dabei rein ökonomisch sein, geht aber weit darüber hinaus. Bürgerinnen und Bürger können auch durch eine emotionale Identifikation partizipieren oder durch eine transparente Ausgestaltung von Prozessen Entscheidungen besser nachvollziehen und sich frühzeitig einbringen.

Die Transition zu einer klimaneutralen Gesellschaft kann für viele Menschen auch eine wahrgenommene oder tatsächliche finanzielle Mehrbelastung bedeuten oder sie in ihrem Lebensumfeld durch notwendige Verhaltensumstellungen und veränderte Bedingungen beeinflussen. Maßnahmen zu einer stärkeren Bepreisung von CO₂ werden Abnehmer von fossilen Gütern treffen und damit aktuell noch die allermeisten Verbraucherinnen und Verbraucher in Deutschland. Auch kann die Summe von verschiedenen Förderprogrammen sozialpolitisch schwierige Verwerfungen mit sich bringen, wenn hauptsächlich besserverdienende Personen davon profitieren. Insgesamt bedarf ein erfolgreicher Rahmen für den Weg zur Klimaneutralität einer befähigenden Steuer- und Sozialpolitik, die Menschen in die Lage versetzt, in bisweilen stürmischen Zeiten bestehen zu können.

Um die Akzeptanz für die transformatorischen Veränderungen zu bewahren, müssen Maßnahmen sozial gerecht ausgestaltet sein. Das bedeutet, dass insbesondere einkommensschwache Haushalte nicht über die Maßen durch Kostensteigerungen belastet werden dürfen, sondern größere wirtschaftliche Nachteile durch Ausgleichsmechanismen aufgefangen werden. Es bedeutet auch, dass denen, die direkt betroffen sind (etwa Beschäftigte im Kohlebergbau) neue Chancen eröffnet werden und sie eine Perspektive im neuen System finden. Die Ausweitung von Weiterbildung und Qualifizierung wird dazu beitragen müssen, dass transformatorische Veränderungen in verschiedenen Wirtschaftssektoren nicht zur Perspektivlosigkeit bei Beschäftigten führen.

Eine erfolgreiche Klimawende beinhaltet damit notwendigerweise die beiden Pfeiler **Partizipation** und **soziale Gerechtigkeit** (die sich auf die wirtschaftlichen Strukturen insgesamt bezieht). Dabei ist über die Wege zu einer solchen „sozialen

Gerechtigkeit“ im politischen Diskurs der Parteien sicherlich genauso zu streiten wie über die bestmöglichen Pfade zur Erreichung der Klimaneutralität. Um die Menschen bei diesem Strukturwandel zu begleiten und die Sorge vor möglichen persönlichen Risiken und Verlusten zu reduzieren, ist eine gute, offene und ehrliche Kommunikation mit positiven Narrativen erforderlich, die die Implikationen der grundlegenden Entscheidungen zugunsten der Klimaneutralität plausibel darstellt.

Zum dritten Pfeiler, der verbesserten und offenen **Kommunikation**, gehören dabei aber neben dem Vermitteln der mit der Energiewende verbundenen Chancen und Partizipationsmöglichkeiten auch die klare Darstellung und gute Begründung von erforderlichen Maßnahmen zur Erreichung des Zielpfads – seien sie steuerpolitischer oder auch ordnungspolitischer Natur. Die Unterstützung durch das **Ordnungsrecht** ist damit die vierte Säule für die Begleitung der gesellschaftlichen Transformationsprozesse.

4.1 Eine partizipative Energiewende verankert Klimaneutralität in der Gesellschaft

Die Teilhabe an Energiewende und Klimaschutz ist ein zentraler Pfeiler für die Unterstützung und Akzeptanz für dieses Großprojekt. Es sollte stets das Ziel sein, möglichst vielen Menschen eine seriöse und nachvollziehbare Teilhabe zu ermöglichen und einfache Zugänge zur Partizipation anzubieten. Diese Teilhabe ist einerseits im Sinne einer finanziellen Beteiligung möglich, andererseits auch durch nicht monetäre Formen, beispielsweise durch die frühe Einbindung in Entscheidungsprozesse oder durch andere wahrgenommene positive Veränderungen im eigenen persönlichen Lebensumfeld. Teilhabe und Partizipation können und müssen selbstverständlich auch über die konstitutionell vorgegebenen Wege der vorhandenen demokratischen Strukturen gestärkt werden. Eine aktive Rolle des Deutschen Bundestags bei den anstehenden Entscheidungen – wie sie das Bundesverfassungsgericht auch beim Klimaschutzgesetz angemahnt hat – ist ein wesentlicher Teil von alledem.

Ökonomische Partizipation kann direkt oder indirekt erfolgen und sollte idealerweise unmittelbar für die Bürgerinnen und Bürger wahrnehmbar sein

Bei der Betrachtung von Möglichkeiten zur Partizipation wird oft insbesondere die ökonomische Teilhabe genannt. Hierunter wird verstanden, dass Bürgerinnen und Bürger bzw. Unternehmen oder andere Institutionen finanziell durch Energiewendeprojekte profitieren, also beispielsweise durch eigene Anlagen zur Energieerzeugung, -speicherung oder -umwandlung zusätzliche Erträge erwirtschaften oder Energieausgaben reduzieren können. Finanzielle Beteiligung kann auch Ausgleichszahlungen von Betreibern von Erneuerbare-Energien-Anlagen an die im Umfeld Betroffenen oder die Kommunen bedeuten.

Dabei gilt es, geeignete Formen ökonomischer Partizipation zu identifizieren und gleichzeitig in ein größeres Bündel an Maßnahmen einzubetten. Die ökonomische Partizipation kann dazu beitragen, dass die dezentrale Energiewende als „gerecht“ wahrgenommen wird. Diese **positive Wahrnehmung eines unmittelbaren persönlichen Nutzens** kann zudem die Wahrnehmung von höheren Kosten oder anderen (vermeintlichen) nicht finanziellen Nachteilen der Energiewende ausgleichen.

Dabei kann finanzielle Teilhabe sowohl **unmittelbar** als auch **indirekt** erfolgen, insbesondere bei größeren Erzeugungs- oder Infrastrukturprojekten. Hierbei wird sichergestellt, dass die Gemeinde durch eine EE-Erzeugungsanlage finanziell profitiert. Eine indirekte ökonomische Partizipation erfolgt – erstens – bereits grundsätzlich durch Zahlungen der Gewerbesteuer. Zweitens können Kommunen finanziell von einer EE-Anlage profitieren, wenn diese auf kommunalen Flächen errichtet wird und dadurch Pachteinnahmen erzielt werden. Drittens sieht die letzte Überarbeitung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) eine finanzielle Beteiligung der Kommune durch die Anlagenbetreiber vor.

Da insbesondere die Gewerbesteuerzahlung durch die Energieerzeugungsanlage an die Gemeinde im Gesamthaushalt aufgeht, ist bei den Bürgerinnen und Bürgern damit kaum eine **direkte, nachvollziehbare** positive Wahrnehmung verbunden. Die Gemeinde sollte die vereinnahmten Finanzmittel daher möglichst explizit zur Verbesserung der lokalen Energie-, Wirtschafts- oder Mobilitätsstrukturen oder zur Stärkung des sozialen Zusammenhalts insgesamt verwenden und den Nutzen dieser Regelung entsprechend kommunizieren. Hier bieten sich beispielsweise der Aufbau von Elektroauto-Ladestationen mit

dem Angebot kostenloser Ladevorgänge für die Anwohnerinnen und Anwohner, ein lokales energetisches Sanierungsförderprogramm oder die Sanierung kommunaler Einrichtungen, etwa des Schwimmbads, an. Im Idealfall kann damit dazu beigetragen werden, dass die dezentrale Energiewende auch von Personen als „vorteilhaft“ wahrgenommen wird, die keine direkte persönliche Beteiligung an einer Anlage haben (können).

Finanzielle Ausschüttungen können jedoch auch kritisch gesehen werden. Da beispielsweise das Beteiligungsinstrument nach § 6 EEG 2021 nicht verpflichtend ist, wird diese Regelung voraussichtlich in unterschiedlichem Maße angewandt werden und ist damit uneinheitlich. Durch eine freiwillige Zahlung des Anlagenbetreibers könnte daher bei manchen Bürgerinnen und Bürgern der Eindruck entstehen, „gekauft zu werden“. Eine verpflichtende finanzielle Beteiligung könnte dagegen Vertrauensbrüchen entgegenwirken und ökonomische Teilhabe schaffen, die von den Bürgerinnen und Bürgern vor Ort wahrgenommen werden kann. Eine wirtschaftliche Beteiligung kann zudem bei manchen Menschen das Gefühl verursachen, dass die Zahlung einen (gefühlten) „Schaden“ durch den Ausbau erneuerbarer Energien ausgleichen soll, wodurch eine negative Wahrnehmung der Energiewendemaßnahmen verstärkt werden könnte.

Darüber hinaus sollte man bei der Ausgestaltung einer finanziellen Beteiligung beachten, dass eine monetäre Beteiligung auch Verteilungskonflikte auslösen kann. Insbesondere sollten sich einzelne Gruppen nicht im Vergleich zu ihren Mitbürgerinnen und Mitbürgern benachteiligt fühlen. Dieses Gefühl der ungerechten Behandlung kann entstehen, wenn die ökonomische Partizipation ungleich ausfällt und nur Teile der Bevölkerung davon profitieren.

FINANZIELLE BETEILIGUNG VON KOMMUNEN

Das Beteiligungsinstrument nach § 6 EEG 2021

Betreiberinnen und Betreiber von EE-Anlagen dürfen künftig bis zu 0,2 Cent je erzeugter Kilowattstunde erneuerbaren regionalen Stroms den betroffenen Gemeinden vor Ort anbieten. Dieses Geld können sich die Anlagenbetreiberinnen und -betreiber von den Netzbetreibern zurückerstat-ten lassen. Als betroffen gelten Gemeinden, deren Gebiet sich zumindest teilweise innerhalb eines 2,5-Kilometer-Umkreises um ein Windrad befindet.

Entgegen dem ursprünglichen BMWi-Vorschlag ist die Zahlung nicht verpflichtend, sondern nur freiwillig zu leisten.



Arbeit und Fachkräfte in der Transformation

Die Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft zur Klimaneutralität bis 2045 schafft Unsicherheiten. Viele Dinge sind in dynamischem Wandel und das bekommen auch die Beschäftigten zu spüren, egal ob in der Industrie, im Handwerk oder im privaten und öffentlichen Dienstleistungsbereich.

Gleichzeitig birgt die Transformation aber auch enorme Chancen. Dabei werden der Wirtschaftsstandort Deutschland grundlegend modernisiert, neue Produkte, Prozesse und Dienstleistungen etabliert und die Grundlage für den nachhaltigen Wohlstand von morgen geschaffen.

Chancen der Klimaneutralität nutzen

Deutschland hat beste Voraussetzungen, diese Chancen nutzbar zu machen und den Beschäftigten im digitalen und ökologischen Wandel Sicherheit zu geben. Werden diese Chancen jedoch nicht genutzt und die Voraussetzungen für die Arbeit von morgen nicht frühzeitig geschaffen, können die Abwanderung von Arbeitsplätzen und reduzierter Wohlstand die Folge sein.

Aspekte wie gute Arbeitsbedingungen sowie Mitbestimmung und Tarifbindung haben in den letzten Jahrzehnten in vielen Branchen zum wirtschaftlichen Erfolg und einer langfristigen Geschäftsausrichtung beigetragen. Gerade in Zeiten mit starkem Wandel können diese Faktoren dazu beitragen, den Beschäftigten in der Transformation soziale Sicherheit zu geben und den sozialen Frieden zu schützen – auch und gerade in neuen Branchen sowie im Dienstleistungssektor. Allerdings sind neue Tätigkeitsfelder wie Plattformarbeit, Mikromobilität oder Ride-Sharing-Angebote heute zu oft mit prekären Arbeitsbedingungen für die Beschäftigten verbunden. Dabei könnten Zukunftsbranchen durch gute Arbeitsbedingungen und eine gestärkte Rolle der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer nicht nur wirtschaftlich erfolgreich gestaltet, sondern auch für die Beschäftigten attraktiv gemacht werden.

Die aktive Gestaltung von Zukunftsbranchen auf eine Art und Weise, dass diese den Bürgerinnen und Bürgern soziale Sicherheit geben und dadurch eine gesamtgesellschaftlich sozial ausgewogene und gerechte Transformation unterstützen, muss vom Staat auch eingefordert und unterstützt werden. Mögliche Hebel dafür sind ein Bundestariftreuegesetz, eine Erleichterung des Verfahrens zur Allgemeinverbindlicherklärung von Tarifverträgen oder ein angehobener Mindestlohn. Auch verbindliche Tariftreueklauseln in der öffentlichen Auftragsvergabe und die Vergabe von Fördermitteln mit Blick auf die vorherrschenden Arbeitsbedingungen im Unternehmen/Betrieb sind wichtige unterstützende Instrumente.

Qualifiziert die Zukunft gestalten

Gleichzeitig verändert die Transformation auch die Anforderungen an Arbeitsplätze und die Beschäftigten. Der Qualifizierungsbedarf nimmt deutlich zu. Es braucht deshalb breite Qualifizierung und Weiterbildung für neue Technologien, Prozesse und Dienstleistungen, um die Menschen fit zu machen für neue Tätigkeitsfelder in neuen Branchen. Mit dem Arbeit-für-morgen-Gesetz und dem Qualifizierungschancengesetz hat die Bundesregierung bereits wichtige Grundlagen geschaffen, um dem Qualifizierungsbedarf in der Transformation zu begegnen. Diese müssen nun von den Unternehmen auch aktiv aufgegriffen werden, um Beschäftigte vor allem auch in Zeiten reduzierter Nachfrage oder schwächerer Auslastung zu qualifizieren und weiterzubilden.

Darüber hinaus sollten in allen Berufsfeldern ein kontinuierliches Kompetenz-Monitoring zu den sich ändernden Anforderungen ausgebaut und Weiterbildungsangebote für die Beschäftigten weiterentwickelt werden. Dabei muss es über einen ganzheitlichen Ansatz der Qualifizierung und Weiterbildung insbesondere auch gelingen, Arbeitskräfte aus nicht zukunftsfähigen Berufen im Arbeitsmarkt zu halten und für neue Aufgabenbereiche oder Branchen zu qualifizieren.

Personalknappheit und Fachkräftemangel begegnen

In der Transformation hin zur Klimaneutralität kann an vielen Stellen auf bestehende Berufsabschlüsse zurückgegriffen werden. Doch handelt es sich dabei oft um Berufe, in denen heute bereits ein Mangel besteht. Die doppelte Transformation von Digitalisierung und ökologischem Wandel kann Synergieeffekte haben, verschärft jedoch gleichzeitig bestehende Engpässe bei Fachkräften. Naturwissenschaftliche Kompetenzen werden beispielsweise in beiden Feldern gesucht.

Deutschland hat gut ausgebildete Fachkräfte. Durch einen Fachkräftemangel in den für die Klimaneutralität unbedingt notwendigen Kernberufen könnte die Gefahr bestehen, dass wichtige Teile der Wertschöpfungsketten abwandern oder neue nicht hier etabliert werden. Damit die Transformation erfolgreich gestaltet werden kann, braucht es daher mehr Studierende und Auszubildende in diesen Kernbereichen. Die Politik sollte diesbezüglich eine Abschätzung vorlegen, welche Fachkräfte für zukunftsfähige Berufe in welchem Umfang gebraucht werden – auch mit Blick auf die zukünftige demografische Entwicklung. Kapazitäten in Lehre und Praxis müssen vorausschauend aufgebaut werden.

Gleichzeitig gibt es an wichtigen Positionen eine spürbare Personalknappheit. Das trifft z. B. auf Bereiche des Handwerks, MINT-Berufe und die öffentliche Verwaltung mit Blick auf genehmigungsintensive Prozesse rund um Anlagen und Infrastrukturen zu. Um die notwendigen Beschäftigten zu gewinnen und zu halten, müssen entsprechende Anreize geschaffen und die Beschäftigten entsprechend qualifiziert werden.

Deckung des Fachkräftebedarfs im Handwerk

Mögliche Ansätze zur Überwindung des Fachkräftebedarfs werden im Folgenden für das Handwerk skizziert. Diese Ansätze ergänzen auch die Erkenntnisse und Inhalte des Branchenblicks Handwerk mit Fokus auf dem Gebäudesektor, siehe Kapitel 6.

Zur Deckung des Fachkräftebedarfs im Handwerk sind im Besonderen Anreize für die verstärkte Investition in Aus und Weiterbildungsprogramme sowie die Stärkung von Handwerksbetrieben wichtige Handlungsfelder.

Aus- und Weiterbildung

Insbesondere Klein- und Kleinstbetriebe sollten bei der Ausbildung von jungen Menschen mit Förderbedarf verstärkt unterstützt werden. Hierzu sollte die „Assistierte Ausbildung“ verstetigt werden. Auch ist die räumliche Mobilität durch ein flächendeckendes Angebot an landesweiten Azubi-Tickets zu erhöhen.

Für ein dauerhaftes Angebot zur Validierung von beruflichen Kompetenzen bedarf es der Etablierung eines Rechts- und Förderrahmens. Im Kontext der „Höheren Berufsbildung“ sind die Dachmarke „Höhere Berufsbildung“ und der Aufbau attraktiver Bildungsmarken zu stärken. Die mit der technologischen Transformation verbundenen Kompetenzen müssen zukünftig zielgerichtet im Handwerk gefördert werden. Finanzielle Anreize wie „Schulungsprämien“ können dabei unterstützen, dass in den Betrieben verstärkt entsprechende Weiterbildungen absolviert werden.

Insbesondere zur Umsetzung der vielfältigen Aufgaben im Gebäudesektor braucht es eine breitere Berücksichtigung des Handwerks in der Energieberatung. Handwerkerinnen und Handwerker sind die Personengruppe der Wertschöpfungskette Bau, die den häufigsten Kundenkontakt hat. Daher sollte das Angebot der Weiterbildung zum Gebäudeenergieberater für Handwerkerinnen und Handwerker weiter ausgebaut werden. Insbesondere Erwerbstätige der Bau, Ausbau und anlagentechnischen Gewerke werden häufig anlassbezogen seitens der Gebäudeeigentümer angefragt. Insofern gilt es, bei den umzusetzenden Energieeffizienzmaßnahmen umfassend die Expertise des Handwerks zu nutzen, u. a. auch bei der Antragstellung von Einzelmaßnahmen im Rahmen der „Bundesförderung effiziente Gebäude“ (BEG).

Weiterhin ist die bedarfsgerechte Förderung der beruflichen Weiterbildung von Geringqualifizierten durch die Bundesagentur für Arbeit zu flexibilisieren und die Beratungs- und Förderstrukturen für die abschlussorientierte Erwachsenenqualifizierung auszubauen.

Stärkung der Handwerksbetriebe als Umsetzer der Energiewende

Um den Herausforderungen der Betriebsübergabe zu begegnen, sollten Initiativen wie „Unternehmensnachfolge – aus der Praxis für die Praxis“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie künftig weiter gestärkt werden.

Bund und Länder sollten prüfen, ob die bestehenden bürokratischen Vorgaben für die Betriebsübergabe alle nötig sind. Beispielsweise sollten bestehende Betriebsnutzungsgenehmigungen in Wohngebieten uneingeschränkt weiter genutzt werden können.

Ein wichtiger Aspekt für die Zukunftssicherheit eines Betriebsstandorts ist das Vorhandensein einer Breitband-Internetverbindung, die eine zentrale Standortbedingung unternehmerischen Handelns darstellt. Daher bedarf es Strategien, um solche Anschlüsse nicht nur möglichst schnell, sondern auch flächendeckend in ländlichen Regionen sicherzustellen.

Handwerksbetriebe sind bei der Marktentwicklung neuer Fertigungstechnologien und Prozesse wie der „Seriellen Sanierung“ verstärkt zu unterstützen. Insbesondere kann dies dadurch gelingen, dass die Organisationseinheiten der Handwerksorganisation wie die Handwerkskammern, Fachverbände, Kreishandwerkerschaften und Innungen sowie deren angegliederte Einrichtungen in dem „Bundesförderprogramm Serielle Sanierung“ selbst antragsberechtigt sind. So können sie für die Handwerksbetriebe als Partner fungieren und bei Know-how, Geschäftsmodellen und Qualifizierung unterstützen.

Im Zusammenhang mit der Digitalisierung des Bauprozesses sowie der digitalen Gebäudebewirtschaftung ist der gleichberechtigte Zugang zu Daten für Handwerksbetriebe herzustellen. Nur wenn Handwerksbetriebe dieselben Daten nutzen können wie bspw. Energielieferanten oder Mobilitätsanbieter, können sie Gebäudeeigentümern attraktive und zukunftsfähige Geschäftsmodelle in den kommenden Jahrzehnten anbieten und weiterhin zur Steigerung der Sanierungsquote beitragen.

Ein zusätzlicher Fokus auf lokale Wertschöpfung und „emotionale“ Beteiligung erhöht die positive Wahrnehmung von Energiewende und Klimaschutz in der Region

Neben der rein finanziellen Beteiligung ist auch die Möglichkeit einer emotionalen Bindung und **Identifikation mit lokalen Projekten der Energiewende** ein wichtiger Bestandteil der (ideellen) Partizipation. Hierbei stehen insbesondere die nicht monetären positiven Effekte von Energiewende und Klimaschutz im Vordergrund der Kommunikation zur gesellschaftlichen Teilhabe. Hierzu gehören beispielsweise neue lokale nachhaltige Wertschöpfungsketten, saubere Luft und eine gesunde Umwelt. Die Problematik besteht darin, dass die Vorteile der Transformation oftmals allgemeiner Natur sind, während die wahrgenommenen Nachteile lokal auftreten. Wichtig ist es daher, eine lokale Infrastruktur zu schaffen, welche die konkreten Vorteile des Transformationsprozesses spürbar machen und von welcher die Bevölkerung einen gemeinschaftlichen Nutzen hat. Die wahrgenommenen Nachteile sollten durch spürbare Vorteile ausgeglichen werden, ohne dass dies direkt eine finanzielle Kompensation bedeuten muss.

Weiter gefasste Formen der Partizipation drücken sich daher insbesondere in der **Sichtbarmachung lokaler Wertschöpfung**, der **Unterstützung lokaler identitätsstiftender Projekte** oder auch der **Mitwirkung an Entscheidungsprozessen (Selbstwirksamkeit)** aus. Neben direkten finanziellen Vorteilen können Gemeinden von einem indirekten finanziellen Nutzen wie der Schaffung von Arbeitsplätzen profitieren. Eine wichtige Rolle spielen Maßnahmen, welche die eigene Identifikation mit der Energiewende betonen und die Regionalität hervorheben. Besonders der vergünstigte Bezug von erneuerbarem regionalen Strom für die Anwohnerinnen und Anwohner kann eine verstärkte Identifikation mit der Energiewende erreichen und für Bürgerinnen und Bürger die Vorteile etwa des EE-Ausbaus spürbar machen. Auch lokale Förderprogramme für energetische Sanierungen oder die Sanierung des öffentlichen Schwimmbads können gute Beispiele sein, wie durch die Einnahmen aus der EE-Erzeugung ein positiver gesellschaftlicher Effekt erreicht wird. Die Bereitschaft, Veränderungen im persönlichen Lebensumfeld zu akzeptieren und zu unterstützen, ist umso höher, je mehr man sich damit emotional identifiziert.⁴

Für eine emotionale Identifikation mit der Energiewende müssen diese positiven lokalen Effekte als spezifische Narrative gefördert und verstärkt kommuniziert werden. Sichtbar gemachter Klimaschutz etwa auch durch Klimaschutzmodellregionen und durch nachhaltige Gemeinden kann nicht nur positive Effekte auf den Tourismus und damit auf die wirtschaftliche Entwicklung haben, sondern verdeutlicht auch die regionale Verwurzelung der Projekte und bringt Lokales in Einklang mit den übergeordneten Zielen.

Bürgerenergie-Projekte, Mieterstrom und Prosumer-Anlagen verbinden ökonomische und emotionale Teilhabe

Die Förderung von Bürgerenergie und von Prosumern ist eine Möglichkeit, finanzielle Teilhabe mit emotionaler Identifikation zu verbinden und Bürgerinnen und Bürger zum aktiven Teil und Mitgestalter der Energiewende zu machen und regionale Wertschöpfung zu steigern. Bürgerenergie kann insbesondere der Photovoltaik einen starken Schub verschaffen, aber auch für die Windenergie spielen Bürgerenergiegesellschaften eine große Rolle. Aktuell sind mehr als 30 Prozent der installierten Leistung von EE-Anlagen im Eigentum von Privatpersonen.⁵ Diese sind also bereits in der Realität Mitgestalter der Energiewende.

Insgesamt wird die aktive Beteiligung an der Energiewende in Form von Bürgerenergieprojekten, Energiegemeinschaften (etwa in Form von Quartiersprojekten mit Einbindung von EE, beispielsweise PVMieterstrom) und Prosumeranlagen jedoch häufig durch undurchsichtige Regulierungen erschwert.

Die administrativen Aufwände für die Realisierung solcher Projekte sind derzeit erheblich und sollten, beispielsweise durch die Einrichtung lokaler oder regionaler „One Stop Shop“-Stellen, vereinfacht werden. Geprüft werden sollte, ob die Ausstellung von Herkunftsnachweisen auch für Kleinanlagen (z. B. im Rahmen von Prosumermodellen und Energiegemeinschaften) vereinfacht werden kann. Es müssen im Rechtsrahmen zielgenaue und rechtssichere Definitionen von Bürgerenergiegesellschaften geschaffen werden.

⁴ Lösche, Erdmann, Staiß, & Ziesing, 2019.

⁵ Zählt man Landwirtinnen und Landwirte dazu, sind es über 40 %. Quelle: Agentur für Erneuerbare Energien, 2021.

Die Teilnahme an Ausschreibungen ist mit erhöhten Projektrisiken sowie erheblichem Aufwand verbunden. Dies stellt für Bürgerenergiegesellschaften, die das mit der Projektentwicklung verbundene wirtschaftliche Risiko nicht auf mehrere Projekte verteilen können, eine erhebliche Zugangsschwierigkeit dar. Es müssen daher für Bürgerenergieprojekte **bürokratische Hemmnisse abgebaut und Beteiligungsmöglichkeiten** verbessert werden, beispielsweise über separate Ausschreibungskontingente mit separater Vergütung.

Im EEG 2021 sind gemeinsam zur Eigenversorgung handelnde Bürgerinnen und Bürger nicht vorgesehen bzw. genießen keine Vergünstigungen. Der **Begriff der Eigenversorgung** ist auf Individuen beschränkt, deren Stromverbrauch im unmittelbaren räumlichen Zusammenhang mit der Produktion steht. Dies verhindert einen Zusammenschluss von Bürgerinnen und Bürgern zu den im EU Clean Energy Package geforderten „Renewable Energy Communities“, die im Sinne eines „Energy Sharing“ den durch die Bürgerenergieanlage produzierten Strom unter Nutzung der vorhandenen örtlichen Netzinfrastruktur innerhalb der Gemeinschaft nutzen können. Die EU-Regeln zur „gemeinschaftlichen Eigenversorgung“ wurden im deutschen Recht nur unzureichend umgesetzt.⁶

Das EEG 2021 begrenzt zudem die Einspeisevergütung für große Aufdach-PV-Anlagen bei Eigenverbrauch. Da dies insbesondere bei niedrigem Eigenverbrauch Nachteile mit sich bringt, wird hierdurch beispielsweise das große Potenzial von Gewerbeflächen und anderen größeren Dachflächen nicht ausgeschöpft, etwa bei landwirtschaftlichen Betrieben.

Für Prosumer sind zudem hohe Investitionskosten eine größere Hürde als langfristig gedachte Amortisationszeiträume. Eine effektive Unterstützung sowohl von Einzelhaushalten als auch von gemeinschaftlichen Verbraucherinnen und Verbrauchern, aber auch beim Mieterstrom, könnte anstelle einer Verbesserung der Vergütung des eingespeisten Stroms daher zukünftig über einen Investitionskostenzuschuss erfolgen. Ein mögliches Beispiel findet sich in der Schweiz, wo einmalige Prämien die Situation des Mieterstroms verbessern.

Administrative Verbesserungen sind nötig in der „Nutzererfahrung“ und dem persönlichen Erleben von Energiewende und Klimaschutz durch die Bürgerinnen und Bürger

Glaubwürdigkeit und Akzeptanz schwinden, wo Technologien, Fördermittel und gesetzliche Regelungen nur mit erheblichem administrativen Aufwand eingeführt, beantragt bzw. umgesetzt werden können. Hier gibt es angesichts der Vielfältigkeit der Fördermittel und gesetzlichen Vorgaben ein erhebliches Verbesserungspotenzial.

Viele Start-ups haben sich dieser Fragen angenommen und entwickeln diverse Tools zur Verbesserung. Bundesregierung und Landesregierungen müssen daher die Erfahrungen der Bürgerinnen und Bürger im Umgang mit den Berührungspunkten zu Energiewende und Klimaschutz laufend beobachten und verbessern. Die Bundesregierung sollte im Rahmen der ohnehin erforderlichen Überlegungen zur Beschleunigung der Energiewende ein gesondertes Projekt zur deutlichen Verbesserung der „User Experience“ durchführen, aus dem unmittelbare Rückschlüsse für die Gesetzgebung und die Ausgestaltung und Abwicklung von Fördermaßnahmen gezogen werden können.

⁶ Boos, 2021: 10 ff.

4.2 Der Weg zur Klimaneutralität muss sozial gerecht gestaltet werden

Neben der Betonung der Teilhabe an der Energiewende besteht die gesellschaftliche Transformation auch darin, mit den Auswirkungen von Energiewende und Klimaschutz für die einzelnen Menschen umzugehen. **Soziale Gerechtigkeit ist ein zentraler Pfeiler** für Klimaneutralität. Zu ihrer Erreichung gibt es dabei im politischen Diskurs ganz unterschiedliche Ansätze.

Es sei darauf hingewiesen, dass für ein sozialpolitisches Gelingen von Energiewende und Klimaschutz nicht allein klimapolitische Instrumente in Frage kommen. Die Erhöhung oder Sicherung der sozialen Gerechtigkeit ist nicht genuine Aufgabe von Klimapolitik bzw. klimapolitischen Instrumenten. Vielmehr gilt es, einen steuer- und sozialpolitischen Rahmen zu schaffen, der alle Bürgerinnen und Bürger in die Lage versetzt, sich den transformato-

Die Transformation zur Klimaneutralität darf soziale Ungleichheiten nicht verschärfen – soziale Gerechtigkeit ist ein zentraler Pfeiler von Klimaneutralität.

rischen Herausforderungen zu stellen und sie in ihrem Sinne mitzugestalten.

Die Diskussionen um soziale Gerechtigkeit und um die Kosten des Klimaschutzes und der Energiewende werden jedoch oft zusammen geführt. Für

die Akzeptanz der Energiewende ist es daher wichtig, dass sie soziale Ungleichheiten nicht verschärft. Preissignale, aber auch Auswirkungen des Ordnungsrechts müssen sozial abgefedert werden.

Durch die Bepreisung der mit der Bereitstellung von Gütern und Leistungen des täglichen Bedarfs verbundenen Emissionen werden grundsätzlich alle Haushalte finanziell belastet. Bezogen auf den prozentualen Anteil am verfügbaren Haushaltsbudget wirken steigende Kosten für Raumwärme und Mobilität bei einkommensschwachen gegenüber einkommensstarken Haushalten jedoch in der Regel überproportional. Als wichtige Voraussetzung für eine breite Akzeptanz und damit für die gesamtgesellschaftlich erfolgreiche Transformation gilt es daher, zu verhindern, dass einkommensschwache Haushalte durch den CO₂-Preis finanziell überlastet werden.

Als zentrales Instrument für eine Dynamisierung der Energiewende wurde bereits im Kapitel 2 „Marktdesign“ eine Entlastung bei den Abgaben und Umlagen, insbesondere der EEG-Umlage (die möglichst unmittelbar auf null gesetzt werden sollte), gefordert. Eine Abschaffung der EEG-Umlage wäre auch verteilungspolitisch im Sinne einer Entlastung insbesondere unterer Einkommen sinnvoll. Einkommensschwächere Haushalte geben einen größeren Anteil ihres Nettoeinkommens für Strom aus als die reicheren Haushalte, sodass eine Entlastung über die Stromkosten entsprechend wirkungsvoll wäre.⁷

Sie würde zudem erhebliche Komplikationen durch bürokratische Sonderregelungen abbauen und damit der Energiewende und dem Klimaschutz einen enormen Schub verleihen.⁸ Eine Absenkung der EEG-Umlage auf null ist daher energiewirtschaftlich und sozialpolitisch ein wichtiges Instrument und wird deshalb von der dena bereits seit zwei Jahren eingefordert. In einer dena-Publikation⁹ wurden die Vorteile dieser Maßnahme ausführlich betrachtet. Eine Analyse von Bekk et al. (2021) zeigt auf, dass die Abschaffung der EEG-Umlage unter Verwendung der Einnahmen der CO₂-Bepreisung aufkommensneutral sein kann.^{10, 11}

Zur Vermeidung von sozialen Härten können aber auch andere Instrumente wie zum Beispiel ein Ausgleichsmechanismus wie eine Pro-Kopf-Ausschüttung sinnvoll sein.

⁷ Löschel, Erdmann, Staiß, & Ziesing, 2019.

⁸ Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, 2020.

⁹ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020b.

¹⁰ Eine Abschaffung der EEG-Umlage hätte im Jahr 2025 einen Finanzierungsbedarf von rund 25,8 Milliarden Euro. Eine vollständige Refinanzierung über den CO₂-Preis auf fossile Brenn- und Kraftstoffen nach dem BEHG 2019 würde zu einer CO₂-Belastung in Höhe von 82 Euro/Tonne CO₂ für das Jahr 2025 führen.

¹¹ Bekk, Held, & George, 2021.

Wichtig bei einer Entlastung des Strompreises und allen weiteren Maßnahmen zur Förderung der sozialen Gerechtigkeit ist es, dass diese spürbar und für alle sichtbar sind.¹² Allgemein sollte bei der Ausgestaltung von Maßnahmen zum Klimaschutz darauf geachtet werden, dass sie möglichst soziale Ungerechtigkeiten nicht verschärfen. Dies gilt für Belastungen in gleicher Weise wie für Fördermaßnahmen.

Im Gebäudesektor hat die Erhebung eines CO₂-Preises durch das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) erhebliches soziales Spannungspotenzial. Während Vermieterinnen und Vermieter keinen Einfluss auf das Heizverhalten der Mieterinnen und Mieter haben, so haben diese keinen Einfluss auf die Beheizungsstruktur und den energetischen Zustand des Mietobjekts. Eine Aufteilung der Kosten zwischen Mieterschaft und Vermietern gemäß der Effizienzklasse der jeweiligen Gebäude könnte Anreize zu klimafreundlichem Verhalten auf beiden Seiten schaffen und sollte keine Seite überproportional belasten. Einen konkreten Vorschlag dazu hat die dena Anfang Januar 2021 vorgelegt (siehe auch Kapitel 6 „Gebäude“).¹³

Es muss jedoch parallel zu allgemeinen entlastenden Instrumenten durch zielgerichtete Härtefallausgleiche verhindert werden, dass besonders belastete Bürgerinnen und Bürger bzw. mittelständische Unternehmen durch ansteigende CO₂-Preise etwa in der Ausübung ihrer beruflichen Tätigkeiten behindert werden. Adäquate Härtefallregelungen für Geringverdienerinnen und Geringverdiener, die in hohem Maße von fossilen Brennstoffen, abhängig sind, müssen die allgemeinen Maßnahmen zur sozial gerechten Ausgestaltung von Energie und Klimapolitik zusätzlich ergänzen. Härtefallregelungen können als direkte finanzielle Unterstützung oder als Beihilfe zum Umstieg auf THG-arme Technologien erfolgen.

Eine Gegenfinanzierung für notwendige Klimaschutz-Investitionen und/oder zum Ausgleich sozialer Härtefälle könnte über das Abschmelzen und Beseitigen klimaschädlicher Subventionen erfolgen. Einige dieser klimaschädlichen Subventionen wie beispielsweise das „Dienstwagenprivileg“, die steuerliche Begünstigung von Dieselmotoren, die Mehrwertsteuerbefreiung für internationale Flüge oder die Energiesteuerbefreiung für Kerosin begünstigen darüber hinaus überproportional einkommensstarke Haushalte.¹⁴

PRO-KOPF-RÜCKZAHLUNG



Als weiteres verteilungspolitisches Instrument im Rahmen der Diskussion von Klima- und Energiepolitik wird häufig eine Pro-Kopf-Rückverteilung der Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung genannt.

Eine Pro-Kopf-Auszahlung kann einen Ausgleichsmechanismus schaffen, von dem einkommensschwache Haushalte besonders profitieren. Neben der Botschaft, dass Energiewende und Klimaschutz nicht zulasten einkommensschwacher Haushalte gehe, würde ein solcher Ausgleich als Form finanzieller Beteiligung aber auch eine gewisse Verpflichtung signalisieren. Ein Teil des persönlichen Beitrags zur Energiewende würde damit gegenfinanziert. Eine Pro-Kopf-Rückzahlung gilt, abhängig auch von Höhe und Art der Rückerstattung, als sehr salient, also durch die Bürgerinnen und Bürger unmittelbar wahrnehmbar. Hierdurch können auch hohe CO₂-Preise in der Bevölkerung Rückhalt finden.¹⁵

Zur konkreten Ausgestaltung dieses Mechanismus gibt es eine Reihe von Konzepten und rechtliche Fragestellungen. Wichtig ist zuvorderst die Frage der Finanzierung. Sollten die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung für die Abschaffung der EEG-Umlage verwendet werden, wären diese Gelder nicht mehr für eine Pro-Kopf-Rückzahlung verfügbar.

Zur konkreten Umsetzung wurden bereits verschiedene Vorschläge gemacht. Möglich wäre beispielsweise die Verknüpfung mit der Steuer-ID und die Auszahlung über die Krankenversicherung oder Arbeitsämter.

¹² Setton & Renn, 2021.

¹³ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021e.

¹⁴ Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft, 2021.

¹⁵ Pahle et. al., 2021.

4.3 Mit einer offenen und positiven Kommunikation die Menschen mitnehmen

Verbesserung der Kommunikation: Raus aus der Defensive!

Eine geeignete Kommunikation ist unabdinglich für die Steigerung der Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen wie auch für die Verbesserung der Wahrnehmung von Möglichkeiten zur Teilhabe. Sie sollte die Sinnhaftigkeit emissionsmindernder Maßnahmen verdeutlichen und beispielsweise auch die **Folgekosten des Nichthandelns** transparent kommunizieren. Die mittel- und langfristigen Folgen des Klimawandels werden sehr viel teurer als heute einzuleitende nationale und internationale Energiewendemaßnahmen.

Zu einer offenen, proaktiven Kommunikation gehört aber auch, besondere Herausforderungen ebenso wie die notwendigen Aufwendungen und Investitionsbedarfe **transparent zu machen und zu kommunizieren**. Energiewende und Klimaschutz können nicht gelingen, ohne den Bürgerinnen und Bürgern etwas zuzumuten und zuzutrauen. Eine Kommunikation der Politik, die betont, dass diese Transformation der Gesellschaft nichts abverlangt, ist unehrlich und schadet mittelfristig der Akzeptanz. Durch diskursbegleitende Maßnahmen sowie die Aufbereitung und offensive Kommunikation von Daten und Fakten zur Energiewende kann Orientierung geschaffen werden.

Ökonomische Steuerungsinstrumente sollen vor allem Unternehmen Anreize bieten, weitsichtig in nachhaltigere oder klimaneutrale Geschäftsmodelle zu investieren und dadurch idealerweise kostengünstige Alternativen für die Bürgerinnen und Bürger zu schaffen. Ein anderer Teil der Wirkung entsteht allerdings auch dadurch, dass die Steuerungsinstrumente – trotz eines sozialen Ausgleichs – in gewisser Weise für die Verbraucherinnen und Verbraucher auch spürbar werden. Insgesamt gilt: Klimafreundliche Alternativen müssen so ausgebaut werden, dass durch Konsumanpassung und Verhaltensänderung steigende Kosten vermieden werden können. Die klimafreundliche, emissionsfreie Alternative muss jeweils auch zur wirtschaftlichsten Option werden.

Viele der anstehenden Veränderungen werden über den Klimaschutz hinaus weitere **positive Wirkungen** zeigen. Die Energiewende und Klimaschutz tragen zu leiseren Städten, sauberer Luft, geringeren Mobilitätskosten, einer gesünderen Umwelt und damit zu einer höheren Lebensqualität bei. Die Informationen sollten daher nicht einseitig auf die zu vermeidenden Negativfolgen begrenzt sein, sondern insbesondere positive Wirkungen und bereits erzielte Erfolge ins Zentrum der Kommunikation rücken. Der Fortschritt der Energiewende muss anhand konkreter Positivbeispiele verdeutlicht werden. Diese **Positivbeispiele** müssen besser erfasst und mit konkreten Daten hinterlegt werden.

Ein weiterer Weg zu mehr Partizipation kann die **frühzeitige Einbindung** in zentrale Planungsprozesse zum Beispiel über die Ausgestaltung des Systementwicklungsplans sein (siehe dena-Netzstudie III und Kapitel 2 „Marktdesign“).

Die Energiewende wird für die gesamte Gesellschaft spürbar werden und auch Anpassungen im Verhalten oder Konsum nach sich ziehen müssen. Damit Bürgerinnen und Bürger von der Energiewende überzeugt sind und auch einzelne lokale „Belastungen“ und Veränderungen des gewohnten Lebensraums akzeptieren, ist eine vertrauensbasierte Kommunikation ein entscheidender Schlüssel. Genauso wichtig ist eine gesamtheitliche Kommunikation, in der sich jede und jeder Einzelne als Teil der Energiewende versteht und sieht, welcher Beitrag persönlich geleistet werden kann, um zu **einem positiven gemeinsamen Zielbild** beizutragen. Dazu wird eine noch stärkere, stabile politische Rahmensetzung benötigt, die die Bürgerinnen und Bürger, regionale Entscheider und Unternehmerinnen und Unternehmer mehr befähigt, sich an der Energiewende zu beteiligen. Diese stabile politische Rahmensetzung muss sich auch in der Governance für Energiewende und Klimaschutz wiederfinden (siehe Kapitel 1 „Gesamtstrategie“).

Information und Wissensvermittlung sind zentral

Neben dem Aspekt der Kommunikation ist auch die **Wissensbildung** von großer Bedeutung. Denn Kommunikation, Wissen und Partizipation hängen mit dem Vertrauen in konkrete Projekte und in die gesamte Energiewende zusammen. Durch Information, Beratung und Unterstützung wird den Bürgerinnen und Bürgern die Möglichkeit gegeben, Zusammenhänge besser zu verstehen, unterschiedliche Argumentationen besser nachzuvollziehen und klimaschädliche Propaganda frühzeitiger zu erkennen.

Wissensbildung beschränkt sich jedoch nicht auf reine Wissensvermittlung, sondern bezieht sich auch auf die Generierung neuer Erkenntnisse und Wissen zu gesellschaftlichen Themen im Kontext neuer Technologien und der anstehenden transformativen Herausforderungen. Forschungsprojekte etwa zu Wasserstoff oder CCU/S sollten daher über eine wissenschaftliche Begleitforschung auch die gesellschaftsrelevanten Komponenten mit abdecken und diesbezüglich Wissen schaffen.

In diesem Zusammenhang erscheint es auch sinnvoll, bei einer Institution der Bundesregierung eine „**Geschäftsstelle Szenarios & Analysen für Energiewende und Klimaneutralität**“ zur laufenden, strukturierten Auswertung und Aufbereitung der Vielzahl von aktuell vorgelegten Studien und Berichten zu Energiewende und Klimaneutralität einzurichten. Auch wenn sich eine solche Geschäftsstelle vor allem an die informierten Kreise und Akteure richten würde, könnte eine derartige Einrichtung helfen, Rahmenbedingungen, Eingangsindikatoren und Einschränkungen verschiedener Studien und Argumentationen besser zu erkennen, und damit den Diskurs auf ein qualitativ höherwertiges Niveau heben.

Der Bundespolitik kommt bei der Information und Kommunikation eine wichtige Rolle zu und sie sollte diese stärker ausfüllen. Dennoch darf man ihr diese Aufgabe nicht allein überlassen. Es ist wichtig, für die Kommunikation und Wissensvermittlung auch Multiplikatoren einzubinden, denen vor Ort Vertrauen entgegengebracht wird.¹⁶ Dies können insbesondere **Kommunen und lokale Akteure** sein, die beispielsweise mithilfe passender Kommunikationsleitfäden und lokaler Netzwerke die Bürgerinnen und Bürger ansprechen und zu aktiven Mitwirkenden der Energiewende machen können. Lokale Initiativen und Unternehmen können hier als Positivbeispiele große Strahlkraft entfalten. Kommunen können als Intermediär und als Akteur für die Kommunikation der Vorteile der Energiewende eine wichtige Rolle einnehmen. Als ein Positivbeispiel seien Klimaschutzmanagerinnen und -manager erwähnt, die oft großes Vertrauen genießen und damit die konkreten Umsetzungsprojekte positiv beeinflussen können. Wichtig ist dafür, dass Kommunen und Einrichtungen der Bundesländer und des Bundes ihre Vorbildfunktion bei der Umsetzung erforderlicher klimapolitischer Maßnahmen stärken und Orte der Umsetzung dadurch auch zu Orten der Begegnung und des konkreten Austauschs gemacht werden.

¹⁶ Leopoldina, Rat für nachhaltige Entwicklungen, 2021.

Kommunen als Multiplikatoren und Gestalter von Klimaschutz und Energiewende

Kommunen als Vorreiter

Kommunen sind für das Erreichen der Klimaziele von größter Bedeutung. Viele Kommunen haben sich ambitionierte Klimaziele gesetzt, die vielfach über die bundespolitischen Ziele hinausgehen. Dies verdeutlicht ihre Motivation zur Übernahme von Verantwortung beim Klimaschutz. Kommunale Klimaschutzpläne, Energiemasterpläne und nachhaltige Mobilitätskonzepte sowie die mehr als 18.000 kommunalen Klimaschutzprojekte sprechen eine deutliche Sprache.

Städte und Kommunen benötigen für diese Entwicklung einen verlässlichen Ausbaupfad und insbesondere entsprechende finanzielle und rechtliche Rahmenbedingungen. Häufig stehen strukturelle, personelle oder finanzielle Restriktionen der proaktiven Gestaltung von nachhaltigen Transformationsprozessen entgegen. Sie müssen durch eine verbesserte kommunale Finanzausstattung und entsprechende Förderprogramme abgebaut werden, um die Kommunen in ihrer gestaltenden Rolle zu unterstützen.

Kommunen setzen Energiewende und Klimaschutz um

Kommunen befinden sich bei der Umsetzung der dezentralen Energiewende und bei der Transformation zur Klimaneutralität gleichzeitig in einer Vielzahl von Rollen.

Kommunen sind selbst Verbraucher und können eine Vorbildfunktion einnehmen, wenn sie bei der Beschaffung von Geräten und Fahrzeugen oder beim eigenen Gebäudebestand Klimaneutralität und Umweltfreundlichkeit als zentrale Säule in ihrem Agieren verankern. Als Verbraucher von Energie und Ressourcen ist es zudem im Eigeninteresse der Kommunen, den Energieverbrauch zu reduzieren. Modellvorhaben, Demonstrationsprojekte, Reallabore und Städte als Experimentierraum für neue Lebensweisen, Technologien und Infrastrukturen für eine nachhaltige Entwicklung spielen hier eine wichtige Rolle.

Kommunen und kommunale Unternehmen stehen für verlässliche und gleichzeitig zukunftsorientierte Angebote für die Bürgerinnen und Bürger. Als Moderator und Impulsgeber können Kommunen etwa über Informationskampagnen für Verbraucherinnen und Verbraucher, über Qualifizierungsangebote für Handwerksbetriebe oder über zielgruppenspezifische Beratungsangebote wirken.

Kommunalen Akteuren wird oft größeres Vertrauen entgegengebracht als der Bundespolitik oder externen Akteuren. Infrastrukturprojekte und EE-Anlagen, die von lokalen Akteuren unter Einbeziehung ihrer Kenntnisse über die Region und deren spezifische Interessen entwickelt und vertreten werden, haben daher eine höhere Chance, von der lokalen Bevölkerung mitgetragen zu werden. Auch Beteiligungsverfahren sind auf kommunaler Ebene nicht nur rechtlich verankert, sondern in vielfältiger Form etabliert.

Über Flächennutzungspläne gestalten Kommunen außerdem aktiv den Ausbau erneuerbarer Energien. Eine Reduktion der vorgesehenen Flächen für die Windenergienutzung über bundes- oder länderpolitische Vorgaben (z. B. 10-H-Regelung) beschneidet den Handlungsspielraum der Kommunen und gefährdet die Ausbauziele für die Windenergie. Eine finanzielle Beteiligung der Kommunen am Betrieb von Windenergieanlagen, wie in § 6 EEG geregelt, ist dagegen sinnvoll zur Erhöhung der Akzeptanz und Beteiligung der Kommunen an der Wertschöpfung der Energiewende.

Im Sinne einer Vorbildfunktion der öffentlichen Hand sollten Kommunen die vorhandenen Dachflächen und sonstige Gebäudepotenziale der sich in ihrem Eigentum befindlichen Immobilien für die Installation von erneuerbaren Erzeugungsanlagen (Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen, Geothermie) systematisch identifizieren und erschließen. Kommunen können durch die Erschließung der gebäudenahen Erzeugungspotenziale den Ausbau der erneuerbaren Energien aktiv beschleunigen.

Gestalter der Mobilitätswende

Eine große gestalterische Rolle können Städte und Kommunen bei der Mobilitätswende einnehmen. Kommunen haben über die Stadt- und Flächenplanung, Zugangsbeschränkungen, Gebühren und weitere Instrumente die Möglichkeit, die Mobilitätswende voranzutreiben und nachhaltige Mobilität anzureizen. Dabei steht auch die Frage der Zusammenarbeit der Kommunen im Mittelpunkt. Eine gute interkommunale Koordination ist beispielsweise wichtig für die Integration neuer Mobilitätsdienstleistungen. Ein kommunales Mobilitätsmanagement kann darüber hinaus Kompetenzen aus verschiedenen Fachbereichen zusammenführen und dabei helfen, Mobilität integriert zu planen. Die Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme ist hierfür die Grundbedingung. Fahrtauskunft, Buchen und Bezahlung müssen, basierend auf einheitlichen Standards, verbund- und anbieterübergreifend ausgebaut werden.

Kommunen und Städte benötigen jedoch auch den finanziellen und rechtlichen Spielraum, um diese Rollen auszufüllen. Über eine Anpassung des Straßenverkehrsrechts sollten daher Kommunen bei der aktiven Gestaltung eine größere Entscheidungsfreiheit eingeräumt werden.

Die Mittel für die kommunale Verkehrsinfrastruktur durch das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) sowie Sonderprogramme „Stadt“ und „Land“ oder zusätzliche Modellprojekte zur Stärkung des ÖPNV sind wichtige Schritte zur Erhöhung des finanziellen Spielraums von Kommunen. Eine Verringerung der CO₂-Emissionen im Verkehr und die Kapazitätssteigerung des ÖPNV erfordern weitere erhebliche Unterstützung durch Bund und Länder. Benötigt wird ein gutes Verhältnis zwischen fördernden und regulierenden Instrumenten, um die Ziele erreichen zu können. Gerade aufgrund der Folgekosten aus der Pandemiebekämpfung sollte der Bund die Investitionstätigkeiten der Städte und Kommunen beispielsweise über eine Erhöhung der Regionalisierungsmittel noch stärker unterstützen.

Nachhaltige Mobilität in den Städten definiert sich besonders über die Verwendung und Neuordnung des begrenzten Flächenangebots. Der Verkehrsraum in der Stadt wird zunehmend auch als Lebensraum gestaltet. Der Bund sollte Städte und Kommunen darin unterstützen, den begrenzten Raum bedarfsgerecht neu zuzuteilen. Hierfür muss ein neuer Konsens über die Ansprüche des Fuß- und Radverkehrs, des ÖPNV und neuer ÖPNV-Shuttles, der Elektromobilität und der Lastverkehre in der Stadt erzielt werden, der dann in der Straßenverkehrsordnung verankert werden sollte. Für eine Neuordnung des Flächenangebots und etwa eine Beschränkung des Flächenbedarfs parkender Autos müssen Kompetenzen beim Parkraummanagement geklärt werden. Über die Schaffung von attraktiven Angeboten individuell-öffentlicher Mobilität und von Sharing-Angeboten kann eine Reduktion des Verkehrsaufkommens durch einen Verzicht auf das eigene Auto zugunsten gemeinsam genutzter Fahrzeuge erreicht werden.

Kommunaler Gestaltungsspielraum Gebäude und Wärme

Im Gebäudesektor ist insbesondere die Steigerung der Sanierungsrate eine Schlüsselaufgabe, bei der das Potenzial von Städten und Kommunen groß ist, bislang jedoch bei Weitem nicht ausgeschöpft wird.

Kommunen können durch zielgruppenorientierte Maßnahmen Investitionen initiieren sowie Informationen und die Beratung zur energetischen Gebäudesanierung vermitteln. Viel Potenzial wird in dem Aufbau eines Netzwerks für eine aufsuchende Energieberatung gemeinsam mit den lokalen Akteuren (Energieberaterinnen und -berater, Stadtwerke, Verbraucherzentralen, Wohnungsunternehmen etc.) und Akteuren auf Länderebene (z. B. Landesenergieagenturen) gesehen.

Fördermaßnahmen der Stadt oder der lokalen Stadtwerke schaffen darüber hinaus zusätzliche Anreize für die Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen und verbinden diese üblicherweise mit Qualitätsstandards für Materialien und Energiebedarfe. Anstelle der alleinigen energetischen Optimierung von Einzelgebäuden liegt ein großer Hebel in integrierten Konzepten für die energetische Sanierung in Stadtquartieren (siehe auch Exkurs „Die Chance von Quartierslösungen“). Die Aufstockung des Förderprogramms „energetische Stadtsanierung“ ist daher für Städte und Kommunen sehr wichtig. Darüber hinaus müssen Förderprogramme weiter vereinfacht und stärker auf Zuschüsse und die energetische Quartierssanierung ausgerichtet werden.

Auch beim Umbau der Wärmeversorgung kommt den Kommunen eine entscheidende Rolle zu. Mit der lokalen Kenntnis der Kommunen und örtlichen Energieversorger werden Wärmepläne erstellt und Maßnahmen abgeleitet. Eine verbindliche kommunale Wärmeplanung und darauf aufbauend eine kommunale Energieleitplanung (siehe auch Kapitel 2 „Marktdesign“) ermöglichen auch einen effizienten Aufbau der klimaneutralen Wärmeversorgung.

Gestaltung durch Kommunen ermöglichen

Während Kommunen nicht nur ein wichtiger Multiplikator, sondern in den genannten Feldern und einigen mehr für die direkte Umsetzung von Klimaschutz und Energiewende verantwortlich sind, stehen ihnen doch oft finanzielle, personelle und rechtliche Hürden im Weg. Kommunen brauchen daher angemessene rechtliche und finanzielle Rahmenbedingungen. Der Bund und die Länder sollten Kommunen deshalb in deutlich größerem Umfang finanziell und beratend unterstützen.

Die vorgesehene Stärkung des Energie- und Klimafonds ist in Bezug auf diesen Aspekt zu begrüßen. Neben einer Ausweitung von bestehenden Förderprogrammen für Städte und Kommunen sollte sichergestellt werden, dass sie evaluiert und daraufhin verstetigt oder verbessert werden, um die Umsetzung von Energiewende und Klimaschutz auf kommunaler Ebene zu beschleunigen. Gerade in den Bereichen Mobilität sowie im Gebäudesektor und bei der Umstellung auf erneuerbare Wärmeversorgung benötigen Kommunen finanzielle Unterstützung und klare rechtliche Rahmenbedingungen. Besondere Bedeutung haben die auf der Kommunalrichtlinie im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative aufbauenden Förderprogramme.

Eine wertvolle Unterstützung des Transformationsprozesses können Kommunen über das Klimaschutzmanagement erhalten. Über eine offensive Kommunikation von existierenden Förder- und Beratungsprogrammen sollten alle Kommunen die Möglichkeit bekommen, über ein eigenes Klimaschutzmanagement kommunale Politik zu koordinieren und auf Klimaneutralität auszurichten. Allgemein benötigen Kommunen für die diversen Aufgaben der Koordination von Klima- und Energiepolitik und beispielsweise der Planung und den Aufbau von verschiedenen Infrastrukturen ausreichend personelle Kapazitäten.

Klimafolgenanpassung

Auch die Folgen des Klimawandels treffen die Kommunen an erster Stelle. Anpassungen an den immer spürbarer werdenden Klimawandel werden eine zentrale Aufgabe für Bund, Länder und Kommunen sein. Hier unterstützen Bundesprogramme wie das Zentrum Klimaanpassung des Umweltministeriums die Kommunen beim Finden von geeigneten, an die spezifischen Umstände angepassten Lösungen. Diesen Programmen kommt eine wichtige Rolle zu. Zukünftig sollten Förderprogramme für die Anpassung an den Klimawandel verstärkt und besser auf finanzschwache Kommunen ausgerichtet werden. Hierfür sollte der Bund auf nationaler Ebene ein tragfähiges und rechtlich abgesichertes Finanzierungsprogramm für die Klimafolgenanpassung etablieren und rechtliche Rahmenbedingungen für die Kommunen schaffen.

4.4 Ehrlich machen: Auch klar sagen, wo Gebote und Verbote nötig sein können

Ordnungsrecht und Verbote sind ein zentraler Teil des Lebens. Einschränkungen werden etwa im Straf-, Verkehrs- oder Bau-recht als strukturierende und wichtige Elemente gesehen. Auch zur Verhinderung der schlimmsten Auswirkungen des Klimawandels werden an manchen Stellen ordnungsrechtliche Maßnahmen erforderlich.

Die notwendige gesellschaftliche Transformation zur Klimaneutralität sollte vor allem aus Teilhabe, sozialer Gerechtigkeit, Kommunikation und marktlichen Strukturen und Anreizen bestehen. Wo dies aber nicht oder nicht ausreichend wirkt, muss auch über ordnungsrechtliche Maßnahmen nachgedacht werden. Eine ökonomische Incentivierung für Ladesäulen oder PV-Dächer auf Einkaufsparkplätzen beispielsweise ist eine sinnvolle Maßnahme. Sie kann zu gegebener Zeit jedoch auch in eine Pflicht umgewandelt werden, um die notwendige Dynamik zu erhöhen.

Besonders klimaschädliche Produkte und besonders klimaschädliches Verhalten werden idealerweise durch eine markt-basierte Verteuerung oder Anreize für Alternativen aus dem Markt gedrängt. Wo dies nicht schnell genug geschieht oder die Gefahr von übergroßen Lock-in-Effekten besteht, muss auch über ordnungsrechtliche Vorgaben nachgedacht werden. Ordnungsrecht kann auch dazu dienen, neben den Menschen, die über Information und Teilhabe erreicht werden und die gemeinsam die Energiewende gestalten, ein gewisses Verhalten, eine Konsument-scheidung etc. vorzugeben, wenn andere Entscheidungen nicht mit der Klimaneutralität kompatibel sind. Damit können auch den Verbraucherinnen und Verbrauchern hohe Folgekosten bei zukünftig steigenden CO₂-Preisen erspart werden. Darüber hinaus sollten Fehlanreize identifiziert werden, die zu einer aktiven Verstärkung klimaschädlichen Verhaltens führen.

KLIMAFREUNDLICHER KONSUM



Klimafreundlicher, nachhaltiger Konsum sollte zielgerichtet angereizt und über Preissignale gelenkt werden. Die Förderung klimafreundlichen Konsums kann aus drei Stufen bestehen:

1. Information und Kommunikation zu klimafreundlichem Verhalten, nachhaltigen Alternativen und (energie)sparendem Verhalten. Transparenter CO₂-Fußabdruck auf allen Endprodukten, ggf. unterstützt durch Labels zur Klimafreundlichkeit (ähnlich dem Energieverbrauchsetikett).
2. Anreize zur Vermeidung durch eine zielgerichtete Bepreisung, etwa für besonders energieintensive Werkstoffe im End-verbraucherbereich (z. B. Plastikverpackungen), um Anreize zur Vermeidung oder Substitution zu geben. Gleichzeitig müssen Fehlanreize abgebaut werden, etwa der reduzierte Mehrwertsteuersatz bei Fleisch.
3. Ergänzung durch ordnungspolitische und ordnungsrechtliche Maßnahmen wo möglich und sinnvoll. In einzelnen Fällen können Verbote sinnvoll sein. Beispiel Einwegplastik: Eine freiwillige Selbstverpflichtung des Handels zur Plastikreduktion könnte bei Zielverfehlung mit einem Verbot nicht-erneuerbarer Verpackungsformen bewehrt werden.

Wichtig bei all diesen Maßnahmen ist die Verhältnismäßigkeit der Maßnahme und die Schaffung und Förderung von Alternativen. Nur wenn diese zur Verfügung stehen, kann ein Umstieg von klimaschädlichen auf klimafreundliche Produkte auch funktionieren. Die Entwicklung dieser Alternativen sollte in der Regel marktbasierend erfolgen bei einer kostengerechten Besteuerung der umweltschädlichen Alternative. Bei innovativen Produkten (bspw. in vitro Fleisch) könnten zusätzliche Anschubförderungen einer schnelleren Marktdurchdringung Vorschub leisten. Anreizsysteme etwa für klimafreundliche Zementalternativen sollten in Einklang stehen mit dem Instrumentarium für die Transformation der Industrie.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode



AUFGABE 16

Soziale Gerechtigkeit sicherstellen, Akzeptanz für die CO₂-Bepreisung als Kernelement ausbauen

Die Bundesregierung sollte Ausgleichmechanismen schaffen, um die Kosten der Energiewende sozial gerecht zu verteilen und einkommensschwache Haushalte zu entlasten. Die Absenkung der EEG-Umlage auf null würde dabei zu den Zielen der Reform von Steuern und Abgaben beitragen (siehe Kapitel 2 „Marktdesign“) und zudem eine verteilungspolitische Wirkung entfalten.

Zusätzlich sollten Konzepte zur Pro-Kopf-Rückvergütung geprüft werden, die die Preissteigerungen infolge der CO₂-Bepreisung für die Bürgerinnen und Bürger abfedern und dabei besonders einkommensschwachen Haushalten zugute kommen. Gezielte Hilfen für Geringverdiener und die besonders von den Maßnahmen betroffenen Personen ergänzen die Betrachtung der sozialen Gerechtigkeit.

Auch auf europäischer Ebene sollte die Bundesregierung die Instrumente für einen sozialen Ausgleich stärken. So sollte sie sich etwa für eine Durchsetzung und ausreichende Finanzierung des vorgeschlagenen Klimasozialfonds einsetzen und für die Aufstockung des Modernisierungsfonds werben, um die zusätzlichen Kostenbelastungen durch die neuen Preissignale in den Sektoren Verkehr und Gebäude abzufedern.



AUFGABE 17

Klimaschädliche Subventionen und Anreizsysteme abschaffen

Die Bundesregierung sollte klimaschädliche Subventionen abschaffen und die resultierenden Zusatzeinnahmen für Klimaschutzprojekte und den Ausgleich sozialer Härtefälle verwenden. Daneben sind sämtliche staatlichen Förderungen und Anreizsysteme auf ihre Klimawirkung zu überprüfen.



AUFGABE 18

Rahmenbedingungen für Partizipation verbessern

Die Bundesregierung sollte bessere Rahmenbedingungen für eine Partizipation an der Energiewende schaffen. Sie sollte dabei prüfen, wie Zahlungen von Anlagenbetreibern an die Standortkommunen größere Freiheiten eingeräumt werden können. Dabei sollte durch eine Anpassung des § 6 EEG 2021 die Möglichkeit der finanziellen Beteiligung von Standortgemeinden von der Freiwilligkeit in die Verbindlichkeit überführt werden. Hierdurch wird Einheitlichkeit geschaffen und Vertrauen gefördert. Den Standortgemeinden wird die Verwendung dieser Zahlungen für die Entwicklung und Umsetzung lokaler Projekte, vor allem mit besonderem Bezug zum Klimaschutz oder zur Klimaanpassung empfohlen, beispielsweise Sanierungsprogramme, der Aufbau von E-Ladesäulen oder zusätzliche Begrünungen. Hierdurch und durch weitere Möglichkeiten wie dem Angebot erneuerbarer regionaler Bürgerstromtarife werden die Vorteile der Energiewende für die Bürgerinnen und Bürger unmittelbarer erfahrbar.

Die Bundesregierung sollte Beteiligungsformate auf allen Ebenen als Chance betrachten, um eine Wertepluralität sowie verschiedene regionale Wissens- und Kenntnisstände in den Planungsprozess einzubeziehen und Legitimität für die jeweiligen Ergebnisse zu schaffen, dabei gleichzeitig aber vor allem die Qualität der Ergebnisse zu erhöhen.

Die Bundesregierung sollte in Planungsprozessen auf das Beteiligungsparadoxon (das heißt Beteiligungswille steigt erst in spätem Stadium der Planung, wenn kaum Gestaltungsmöglichkeiten bestehen) eingehen und schon in einem frühen Stadium der Planung offensiv für eine Beteiligung werben und Möglichkeiten zum Austausch schaffen. Beteiligungsprozesse müssen so gestaltet werden, dass sie insgesamt für eine erhebliche Beschleunigung der Planungen sorgen und sie nicht dauerhaft verlangsamen.

Die Bundesregierung, die Länder und die Kommunen sollten die Expertise der Bürgerinnen und Bürger vor Ort nutzen, um die bestmögliche lokale Strategie zu entwickeln, Flächen zu nutzen und auf regionale Besonderheiten einzugehen. Durch eine bottom-up entwickelte Planung von Energievorhaben wird ihre Umsetzung wesentlich erleichtert.

AUFGABE 19

Bürgerenergie, Mieterstrom und Prosumer stärken

Die Beteiligung der Bürgerinnen und Bürger an der Energiewende muss vereinfacht werden. Die Bundesregierung sollte daher prüfen, ob für Bürgerenergiegesellschaften Ausschreibungen mit separaten Kontingenten und administrativ festgesetzten Fördersätzen eingesetzt werden können.

Außerdem sollte die Bundesregierung insbesondere Artikel 21 RED II (EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie) umsetzen, sodass ein funktionierender Rahmen für Energy Sharing bzw. die gemeinschaftliche Eigenversorgung innerhalb von Renewable Energy Communities in Deutschland geschaffen wird. Darüber hinaus gilt es, die regulatorischen Rahmenbedingungen für PV-Mieterstromprojekte weiter zu verbessern und die und marktlichen Hürden für Prosumer zu beseitigen.

Die Bundesregierung sollte ein Projekt zur Verbesserung der „User Experience“ durchführen und das persönliche Erleben von Energiewende und Klimaschutz durch vereinfachte administrative Prozesse erhöhen, indem beispielsweise der Zugang zu Fördermitteln erleichtert wird.

AUFGABE 20

Eine positive gesamtgesellschaftliche Zukunftsvision

Die Bundespolitik, die Landespolitik, Unternehmen, NGOs, Verbände und lokale Akteure müssen das Narrativ der Energiewende zu einem positiven Narrativ machen. Dabei dürfen Herausforderungen und Probleme nicht verschwiegen, alternative Optionen zur Zielerreichung nicht diskreditiert werden. Die Energiewende muss (wieder) zu einer Erfolgsgeschichte werden und darf nicht hauptsächlich als teure Unternehmung, die über die Köpfe der Bevölkerung hinweg entschieden wird, wahrgenommen werden. Klimaschutz darf nicht als Serie von Verzichten und Verboten wahrgenommen werden. Ein gesellschaftlicher Konsens, basierend auf einer breiten Kenntnis der damit verbundenen Aufgaben (siehe Kapitel 1 „Gesamtstrategie“), ist hierfür Grundvoraussetzung.

AUFGABE 21

Ehrlich machen, Kommunikation verbessern und Informationsangebote gestalten

Die Bundesregierung und alle Akteure der Energiewende sollten die im Rahmen der Energiewende entstehenden Investitionsbedarfe offen darstellen. So kann transparent und nachvollziehbar kommuniziert werden, welche Belastungen, Änderungen und auch finanziellen Aufwände mit der Energiewende und dem Klimaschutz einhergehen, aber auch, wie diese bestmöglich abgedeckt oder zu positiven ökonomischen Szenarien mit positiven Effekten wie verringerter Luftverschmutzung, Heizkosten und Lärm entwickelt werden können. Genauso wichtig wird es sein, Folgekosten des Nichthandelns nüchtern und auf konkreten Abschätzungen beruhend zu kommunizieren.

Die Bundesregierung sollte Informationsangebote zu Klimaschutz und Energiewende weiter ausbauen, gezielt bewerben und möglichst ressortübergreifend organisieren. Dieses Vorgehen bietet die Chance, eine Vielzahl von Kommunikationsmaßnahmen und Aktivitäten unterschiedlicher Akteure in einer kommunikativen Klammer zu bündeln und als ein gemeinsames „Anpacken“ darzustellen. Dabei sollten Fakten vermittelt werden, auf deren Grundlage die Bürgerinnen und Bürger auch komplexe Zusammenhänge verstehen und eigene Handlungsoptionen erkennen. An der Schwelle zum aktiven Handeln sollten zudem positive Beispiele des Gelingens, die das Vertrauen in die Leistungsfähigkeit unserer Gesellschaft und Wirtschaft stärken, mit digitalen oder lokalen Beratungs- und Unterstützungsangeboten kombiniert werden.

Forschungsprojekte im Rahmen der Transformation zur Klimaneutralität sollten darüber hinaus auch zur Wissensbildung gesellschaftlicher Zusammenhänge beitragen, indem Projekte vermehrt gesellschaftsrelevante Begleitforschung auch bei technologischen Themen enthalten.



AUFGABE 22

Institutionalisierung der Aufbereitung wissenschaftlicher Erkenntnisse für eine Versachlichung des politischen und gesellschaftlichen Diskurses

Zur Verbesserung des Informationsangebots sollte bei einer Institution der Bundesregierung eine „Geschäftsstelle Szenarios & Analysen für Energiewende und Klimaneutralität“ eingerichtet werden, durch die, unterstützt durch entsprechende Dialogformate, eine laufende Analyse und Aufbereitung der Vielzahl vorgelegter Studien und Berichte vorgenommen wird.



AUFGABE 23

Ausbildungs- und Qualifizierungsinitiative für Fachkräfte der Energiewende

Es sollte ein kontinuierliches Kompetenz-Monitoring ausgebaut werden und damit ausreichende und passende Weiterbildungsangebote geschaffen werden. Über eine fundierte Abschätzung des Bedarfs an hochqualifizierten Fachkräften für Zukunftsbranchen (etwa in Abstimmung mit den Industrieverbänden) sollte die Bundesregierung bei abzusehendem Fachkräftemangel Maßnahmen in die Wege leiten und Anreize schaffen, um ausreichend Kapazitäten, beispielsweise in der Lehre aufzubauen.

In Ausbildungsprogrammen sollten vermehrt Klimaschutzrelevante Technologien und Inhalte berücksichtigt werden. Auch die Zuwanderungspolitik sollte den Fachkräftebedarf berücksichtigen.

Zudem sollte die Bundesregierung dazu beitragen, dass Anreize für verstärkte Investitionen in Aus- und Weiterbildungsprogramme im Handwerk erhöht werden.

- Hierzu sollten insbesondere Klein- und Kleinstbetriebe bei der Ausbildung von jungen Menschen mit Förderbedarf verstärkt unterstützt werden. Außerdem können eigene „Schulungsprämien“ Betriebe dazu motivieren und finanziell befähigen, adäquate Weiterbildungsmaßnahmen anzubieten.
- Die Bundesregierung sollte Handwerksbetriebe stärken, etwa indem bürokratische Vorgaben für Betriebsübergaben abgebaut und Initiativen für die Überwindung von Herausforderungen bei der Betriebsübergabe unterstützt werden.
- Handwerksbetriebe sollten bei der Marktentwicklung neuer Fertigungstechnologien und Prozesse, welche für Klimaneutralität benötigt werden, gesondert unterstützt werden (beispielsweise zur Umsetzung von seriellen Sanieren).



AUFGABE 24

Rolle der Kommunen stärken

Kommunen müssen dazu befähigt werden, zu Multiplikatoren der Energiewende zu werden. Diese Rolle der Kommunen sollte gestärkt und auch mit zusätzlichen Bundesmitteln gefördert werden. Durch Finanzmittel werden Kommunen besser in die Lage versetzt, die Energiewende bottom-up voranzutreiben und die bestmöglichen Ansätze zu finden und umzusetzen.

Der Bund sollte die Investitionstätigkeiten der Städte und Kommunen beispielsweise über eine Erhöhung der Regionalisierungsmittel noch stärker unterstützen. Besondere Bedeutung für den Klimaschutz in Kommunen haben die auf der Kommunalrichtlinie im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative aufbauenden Förderprogramme.

Die Kompetenzen und der rechtliche Rahmen von Kommunen müssen es ihnen ermöglichen, etwa in der Verkehrsplanung Flächen neu zu ordnen und zu einer Mobilitätswende beizutragen. Die Digitalisierung als Treiber neuer Verkehrskonzepte und eines reduzierten Verkehrsaufkommens sollte in den Städten und Kommunen deutlich beschleunigt werden (siehe auch Exkurs „Digitalisierung der Energiewende“).

Der Einsatz von Klimaschutzmanagerinnen und -managern ist für Kommunen unbezahlbar. Die Bundesregierung sollte über eine Stärkung der Fördertöpfe und eine Vereinfachung der Anträge dazu beitragen, dass alle interessierten Kommunen Unterstützung des Bundes für Personalstellen für kommunales Nachhaltigkeitsmanagement erhalten.

Die in Kapitel 2 „Marktdesign“ dargestellte kommunale Energieleitplanung als Ergänzung zur überregionalen Planung ist eine Möglichkeit zur weiteren Stärkung der Rolle von Kommunen und ergänzt eine verpflichtende kommunale Wärmeplanung, die von Bund und Ländern unterstützt werden muss.

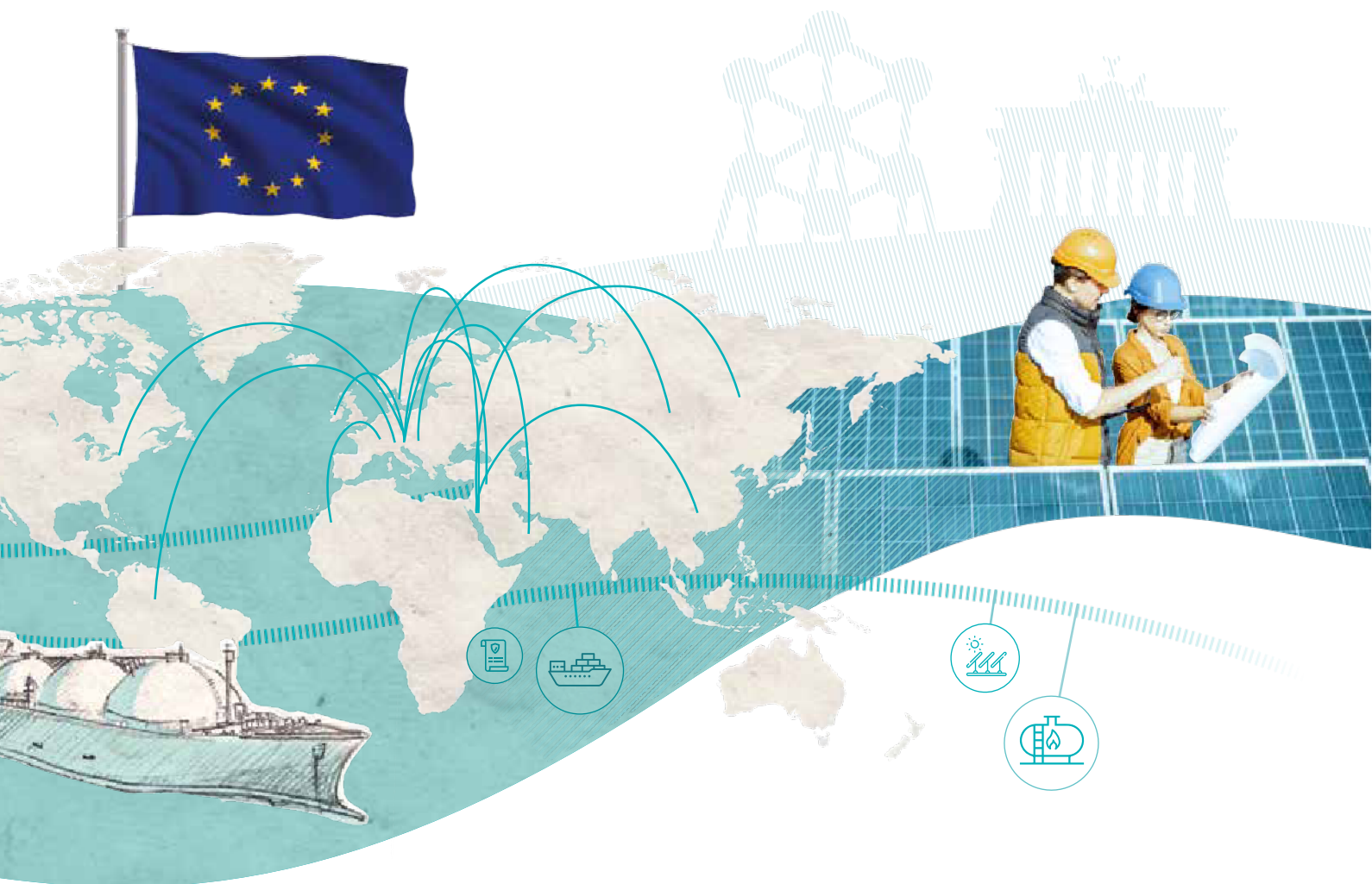
Für die Klimafolgenanpassung muss ein rechtlich abgesichertes Finanzierungsprogramm entwickelt werden. Förderprogramme für Klimafolgenanpassung sollten gestärkt und besser auf finanzschwache Kommunen ausgerichtet werden.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- ▶ **Wirksame Ausgestaltung der CO₂-Bepreisung/Aufteilung zwischen Mieterschaft und Vermietenden/ Reform der Steuern, Abgaben und Entgelte zugunsten von Klimaschutzlösungen** (Kapitel 6 „Gebäude“)
- ▶ **Abgaben auf Energie auf CO₂-Bepreisung und Infrastrukturabgaben fokussieren** (Kapitel 2 „Marktdesign“)
- ▶ **Einführung einer integrierten kommunalen Energieleitplanung voranbringen** (Kapitel 2 „Marktdesign“)
- ▶ **Private Investitionen in erneuerbare Energien stärken** (Kapitel 9 „Energie“)
- ▶ **Quartiere als Klimaschutz-Vorranggebiete etablieren** (Kapitel 6 „Gebäude“)

5 Internationale Einbettung

Wie erfolgt die Einbettung der deutschen in die europäische und die internationale Energiewende?



Deutschland ist eng in die internationalen Märkte eingebunden und kann besonders von einer europäischen und einer globalen Energiewende profitieren

Deutschland liegt im Zentrum Europas und ist der EU-Mitgliedsstaat mit der höchsten Bevölkerungszahl und der größten Volkswirtschaft. Gleichzeitig trägt es mit fast 20 Prozent den größten Anteil am Bruttoenergieverbrauch der EU und mit 23 Prozent (2018) den größten Anteil an den EU-weiten CO₂-Emissionen.¹ Die EU wiederum ist einer der größten Wirtschaftsräume weltweit und trägt damit auch erheblich zum globalen Energieverbrauch und zu den globalen Emissionen bei. Insgesamt stehen die 27 Mitgliedsstaaten für ca. 15 Prozent der globalen Wirtschaftsleistung und machen die EU mit einem Bruttoinlandsprodukt von 13,3 Billionen Euro im Jahr 2020 zur drittgrößten Wirtschaftsmacht nach China und den USA.² Ebenso ist die EU mit einem Anteil von rund 11 Prozent (2017, inklusive Großbritannien) an der globalen Energienachfrage drittgrößter Energiekonsument der Welt.³ Der Anteil der EU an den globalen THG-Emissionen liegt mit 3,5 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalenten bei 9,8 Prozent (2017, inklusive Großbritannien).⁴ Historisch gesehen entfallen sogar 18 Prozent der kumulativen Emissionen seit der industriellen Revolution auf die EU, unter den größten Emittenten ist u. a. Deutschland.⁵ Die EU als Ganzes hat somit eine gewichtige Rolle und Verantwortung in der Welt für das Erreichen der globalen Klimaziele und die Bundesrepublik speziell auch für das Erreichen der Klimaneutralität in der EU. Gleichzeitig stehen die EU und Deutschland in einem globalen Wettbewerb vor allem mit China und den USA in Bezug auf Wirtschaftsentwicklung, Innovationskraft, Klimaschutz und Schnelligkeit der Transformation. Dieser Wettbewerb wird eine Rolle spielen bei der jeweiligen Gewichtung der Ziele Wachstum, Klimaschutz und sozialer Ausgleich.

Innerhalb Europas nehmen der Aufbau und das marktliche Zusammenwachsen sowie die physische Vernetzung von europäischen Märkten für Energie und Güter weiter zu. So ist die Energiewende in Deutschland durch den europäischen Binnenmarkt für Energie eng verknüpft mit Vorgängen auf EU-Ebene und in anderen Mitgliedsstaaten. Beispiele sind gemeinsame Erdgasmärkte, gekoppelte Strommärkte sowie transeuropäische Energieinfrastrukturen; zukünftig wird sich auch ein europäisch integrierter Wasserstoffmarkt und eine grenzüberschreitende Infrastruktur für CO₂ ausbilden müssen. Die europäische Zusammenarbeit wird sich bezüglich dieser gemeinsamen Infrastrukturen und Märkte ebenso intensivieren müssen, wie zu den Themen der Versorgungssicherheit, der europäischen Erzeugung erneuerbarer Energieträger und Grundstoffe, sowie deren Import aus außereuropäischen Ländern und Regionen. Die Koordination von bi- und multilateralen Partnerschaften wird hierbei eine stärkere Bedeutung erhalten, als bislang bei der Nutzung von fossilen Rohstoffen.

¹ Statista, 2021c; Energieverbrauch, 2017; Umweltbundesamt (UBA), 2020b.

² News release: China, US and EU are the largest economies in the world, 2020; Statista, 2021a.

³ The EU in the world – 2020 edition, 2020.

⁴ Ritchie & Roser, 2020.

⁵ Statista, 2021b.

Neben dieser physischen Integration wächst auch zunehmend die Relevanz des EU-Rechtsrahmens für die deutsche Energiewende. Mit dem EU Green Deal und dem daraus hervorgehenden

Die EU gibt beim Klimaschutz häufig sowohl die Ziele als auch die einzusetzenden Instrumente vor.

Legislativprogramm hat die EU-Kommission die Bedeutung des Europarechts bei der Energiewende und beim Klimaschutz in den Mitgliedsstaaten nochmals verstärkt:

Die auf EU-Ebene definierten

Vorgaben beschränken sich dabei nicht nur auf die zu erreichenden Ziele, sondern geben häufig auch die Instrumente vor, die

für deren Umsetzung einzusetzen sind. Im Zuge dieser Europäisierung der Energie- und Klimapolitik wurden in diesem Jahr umfangreiche Ergänzungen und Verschärfungen der Zielarchitektur (EU-Klimagesetz) und fast aller Bereiche des Energiesystems vorgenommen vorgelegt, darunter die Energiebesteuerung, der Emissionshandel, die Erneuerbare-Energien-Ziele, die Energieeffizienz sowie die Taxonomie für grüne Investitionen. Neue Regulierungsentwürfe wurden ebenfalls vorgelegt (Grenzausgleichsmechanismus) oder werden im Laufe des Jahres noch folgen (Gasmarkt, staatliche Beihilfen für Klima, Energie und Umweltmaßnahmen).

5.1 EU-Rechtsrahmen konsequent auf eine klimaneutrale soziale Marktwirtschaft ausrichten

Im grundlegenden Verständnis des heutigen Wirtschaftssystems spielt Klimaneutralität noch keine übergeordnete Rolle und auch im regulatorischen Rahmen steht das Element der Klimaneutralität derzeit noch im Hintergrund. Daher wurde in den letzten Jahren mit einer Vielzahl von Einzelmaßnahmen für den Klimaschutz nachgesteuert. Problematisch ist dies, da sich diese immer wieder neuen und punktuell eingesetzten Maßnahmen und Instrumente teilweise in ihrer Wirkungsweise entgegenstehen und zudem mitunter große Unterschiede bei ihrer Anwendung zwischen den verschiedenen EU-Mitgliedsstaaten bestehen. Es bedarf also eines ganzheitlichen Ansatzes, der diese Fragmentierung und Widersprüchlichkeit im regulatorischen Rahmen auflöst, damit alle Wirtschaftsakteure aus eigenem Antrieb und Interesse klimafreundlich agieren.

Auf eine systemische Verankerung der Klimaneutralität abzielend, hat der Green Deal auf EU-Ebene den Aspekt Klimaschutz

Das Ziel Klimaneutralität sollte als dritte Säule im EU-Vertrag verankert werden.

im Jahr 2019 in eine Reihe mit wirtschaftlichen und sozialen Zielen gerückt. In der dena-Leitstudie wurden nun gemeinsam mit dem Partnerkreis Leitlinien für eine Weiter-

entwicklung des europäischen Wirtschaftssystems formuliert, das weiterhin auf den Prinzipien der sozialen Marktwirtschaft und dem Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit basiert, aber als Neuerung die Klimaneutralität als dritte Säule miteinschließt. Die Leitlinien stellen somit eine Ergänzung der in Artikel 3 Absatz 3 des Vertrags zur Europäischen Union (EUV) genannten Prinzipien Wohlstand und soziale Stabilität um das Ziel Klimaneutralität dar.⁶

Abb. 5.1 Die drei Säulen der klimaneutralen sozialen Marktwirtschaft



⁶ Zwar gibt es im Vertrag auch der Punkt „Umweltschutz und Verbesserung der Umweltqualität“, jedoch nicht die Verankerung der Klimaneutralität.

Dieser Dreiklang ist essenzieller Bestandteil der Zielvision und sollte bei allen Entscheidungen mitgedacht und gleichberechtigt behandelt werden. Als solches sollen die drei Säulen der klimaneutralen sozialen Marktwirtschaft Orientierung bei der Entwicklung politischer Maßnahmen bieten.

Der Green Deal hat bereits den hier beschriebenen Zieldreiklang als Basis und identifiziert in seinem Aktionsplan eine Vielzahl an Maßnahmen, die entweder bestehende Regelungen reformieren, um sie in Einklang mit den Klimazielen zu bringen, oder neue Regelungen vorsehen, um Lücken zu schließen. Dabei hat die EU in den letzten Jahren insbesondere die ganzheitliche Betrachtung aller Sektoren und Bereiche des Energie- und Wirtschaftssystems ins Zentrum gestellt. Der Green Deal als neue Wachstumsstrategie geht daher über punktuelle Anpassungen hinaus und sieht einen tiefgreifenden Wandel der europäischen Wirtschaft und Gesellschaft vor. Dabei soll sichergestellt werden, dass alle Wirtschaftssektoren und Bereiche der Gesellschaft zur notwendigen Minderung der THG-Emissionen beitragen. Die Transformation der Wirtschaft, der Industrie und der Gesellschaft sowie der Schutz von Natur, Arten und Ressourcen werden als großes europäisches Projekt und Chance für „mehr Europa“ nach innen und außen gesehen. Als Abschluss dieser gesetzlichen Gestaltungen sollte das übergeordnete Ziel der Erreichung von Klimaneutralität der EU als Konkretisierung des EU-Ziels „Umweltschutz“ in den Vertrag über die Europäische Union⁷ aufgenommen werden.

Der Green Deal ist auch als ein Innovationsmotor und eine Chance auf nachhaltiges und integratives Wachstum innerhalb der EU konzipiert. Unter dem „Sustainable Europe Investment Plan“ sollen durch eine Kombination legislativer und nicht legislativer Maßnahmen bis 2030 1 Trillion Euro in die Umsetzung investiert werden, gespeist aus dem EU-Budget und privaten Investitionen. Der Aspekt Nachhaltigkeit und Klimawirkung wird dabei die Investitionsentscheidungen leiten.⁸

Für die Energiewende und die Wirtschaft in Deutschland ist es ein positives Signal, dass das gesetzlich formulierte Langfristziel, die Treibhausgasneutralität zu erreichen, mit dem EU Green Deal auch durch EU-weite Maßnahmen getragen wird. Kurz- bis mittelfristig bedeutet dies aber auch, dass zur Erfüllung der EU-seitigen Ziele noch umfangreiche Veränderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland umzusetzen sind.

Alle regulatorischen Rahmenseetzungen müssen konsistent auch die Erreichung der Klimaziele unterstützen

Die Ausarbeitung und die Weiterentwicklung des europäischen Rechtsrahmens mit Ausrichtung auf die neuen Klima- und Energieziele der EU sind ein komplexes und anspruchsvolles Unterfangen. Ein solcher Rahmen muss bestehende Hemmnisse aus dem Weg räumen und mit neuen Politiken die Transformation ausreichend unterstützen. Gleichzeitig muss der Rahmen mit den derzeit geltenden Regelungen vereinbar sein. Um der Vielfalt der Herausforderungen sowie dem Spektrum der betroffenen Regelungen und Verordnungen Rechnung zu tragen, sollte sich jede Neuerung und Überarbeitung für die Anpassung an die Klimaziele notwendigerweise auf Kernprinzipien stützen, die zur Ausrichtung auf die Zielerreichung beitragen. Diese Kernprinzipien müssen durch eine sorgfältige Prüfung der einzelnen Rechtsakte gewährleistet werden.

Dabei ist es eine besondere Herausforderung, alle drei Ziele gleichzeitig zu verfolgen. So wird mehr Klimaschutz mit strengeren Auflagen oft als Gefahr für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit und von Arbeitsplätzen in Deutschland und Europa gesehen. Traditionelle industriepolitische Ziele stehen somit oft im Konflikt mit energie- und klimapolitischen Zielen.

Im Rahmen der dena-Leitstudie wurde anhand der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen drei Säulen für ein klimaneutrales Wirtschaftssystem ein leicht handhabbarer Prüfkatalog entwickelt, mit dem neue und überarbeitete Gesetzesvorhaben und -initiativen darauf geprüft werden können, inwieweit sie die einzelnen Zielbereiche unterstützen. Einer Prüfung unterzogen wurde eine Auswahl der am 14. Juli 2021 durch die EU-Kommission vorgelegten Vorhaben aus dem „Fit for 55“-Paket, darunter die Überarbeitung der EU-Energiebesteuerungsrichtlinie, des EU-Emissionshandelssystems, der EU-Erneuerbare Energien-Richtlinie und des EU-Klimagesetzes sowie der Vorschlag für einen europäischen CO₂-Grenzausgleichsmechanismus. Die gesamte rechtliche Analyse und Bewertung findet sich im Gutachterbericht der Stiftung Umweltenergierecht (siehe SUER-Gutachterbericht).

⁷ EU-Vertrag (EUV), 1993.

⁸ European Commission, 2021b.

5.2 EU-Binnenmarkt und europäisches Energiesystem weiterentwickeln

Im Zug der fortschreitenden Integration des EU-Binnenmarktes besteht eine enge Verzahnung der Systeme: grenzübergreifender Infrastrukturausbau, europäische Projekte, offene Märkte (trotz aller bestehenden Divergenzen in den Mitgliedsstaaten). Die Energiewende und die Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland sind daher nur in Koordination mit dem europäischen Rahmen zu meistern.

Es müssen europäische Stromnetze gestärkt, europaweite Potenziale von erneuerbaren Energien effizient genutzt und die Versorgungssicherheit gewährleistet sein

Die deutsche und die europäische Klima- und Energiepolitik sind intensiver aufeinander abzustimmen, um Energieerzeugungspotenziale und -kapazitäten grenzüberschreitend besser zu nutzen. Dabei sollte die europäische Klima- und Energiepolitik grundsätzlich das Leitbild für die in Deutschland zu treffenden Entscheidungen sein.⁹

Die Nutzung der EU-weit vorhandenen EE-Ausbaupotenziale, wie zum Beispiel die Nutzung und Regulierung mehrstaatlicher oder internationaler Gewässer für Wind-Offshore, ist in verstärktem Maße auf EU-Ebene abzustimmen. Damit einhergehend ist auch eine sich für Deutschland abzeichnende Umkehr der Stromhandelsbilanz hin zu Nettoimporten im Hinblick auf die Versorgungssicherheit eng mit den europäischen Nachbarn zu koordinieren.

Der weitere Ausbau des europäischen Energiebinnenmarktes und die Stärkung marktbasierter Prozesse sollten konsequent vorangetrieben werden, um die europaweit vorhandenen Kapazitäten zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit zu nutzen.

Angesichts einer zunehmend europäischen Energiewende gilt es, übergreifende Koordinationsprozesse wie die Szenario-Bildung für die verschiedenen Infrastrukturen weiter zu verzahnen und die Instrumente zur Bewertung der Versorgungssicherheit kontinuierlich weiterzuentwickeln und zu ergänzen. Die bestehenden europäischen Monitoringprozesse (z. B. Ten-Year Network Development Plan (TYNDP), European Resource Adequacy Assessment (ERAA) etc.) setzen bisher auf den national formulierten politischen Zielvorgaben auf. Sie berücksichtigen zwar sowohl europäische als auch nationale Zielvorgaben, können aber mit Blick auf die detaillierten Berechnungen momentan keine Szenarien mit veränderten politischen Zielen, sondern nur ein Szenario („National Trends“) vollumfänglich beachten. Die Prozesse sollten um entsprechende Sensitivitäts- und Risikoanalysen ergänzt werden, um eine robuste Planung zu ermöglichen.

Die europäische Energienetz-Verordnung (Trans-European Networks for Energy, TEN-E) von 2013 als zentrales Planungs- und Förderinstrument wird dieses Jahr reformiert. Ziel der Reform ist es, die grenzüberschreitenden Energieinfrastrukturen der EU zu modernisieren und zu vernetzen, um das EU-Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Gleichzeitig sollen die Marktintegration, Wettbewerbsfähigkeit und Versorgungssicherheit weiterhin gewährleistet werden. Es werden elf vorrangige Korridore und drei vorrangige Themenbereiche für die Entwicklung und Vernetzung festgelegt. Dies wird hauptsächlich durch Projekte von gemeinsamem Interesse (Projects of Common Interest, PCI) erfolgen, die von der Fazilität „Connecting Europe“ für 2021 bis 2027 finanziert werden.¹⁰

Die Gewährleistung von Versorgungssicherheit gelingt in der Zusammenarbeit der Mitgliedsstaaten besser als auf einzelstaatlicher Ebene. Voraussetzung für die Umsetzung sind gemeinsame (technische) Definitionen, vor allem, aber nicht nur, im Strombinnenmarkt. Die Umsetzung einer einheitlichen Begrifflichkeit ließe sich am besten durch ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) und gegebenenfalls ENTSO-G (European Network of Transmission System Operators for Gas) verwirklichen.

⁹ Expertenkommission zum Monitoring-Prozess "Energie der Zukunft", 2020.

¹⁰ European Council, 2021.

Es bedarf eines eigenständigen Planungsprozesses zur Versorgungssicherheit, zunächst für den Stromsektor. Grundlage sollten (virtuelle) Stresstests sein, wie sie 2014 in Bezug auf die Gasversorgungssicherheit durchgeführt wurden.¹¹ In der Folge sollte verbindlich geklärt werden, wie viele Erzeugungskapazitäten eines Mitgliedsstaats gegebenenfalls für die Nachbarn zur Verfügung stehen (Prozess Energieunion).¹² Mittelfristig ist darüber hinaus zu prüfen, inwieweit eine strategische Reserve für Wasserstoff aufgebaut werden sollte. Ein bedeutender Faktor in der Planung der zukünftigen Versorgungssicherheit sind außereuropäische Importe von Energieträgern; hierzu ist die Entwicklung einer gemeinsamen Importstrategie der Europäischen Union notwendig.

Die Gasnetze müssen weiterentwickelt und eine europäische H₂-Infrastruktur aufgebaut werden

Heute wird Erdgas in der EU durch ein zusammenhängendes Netz von rund 198.500 Kilometern Gasfernleitungen transportiert, während Wasserstoff auf der Straße, mit der Bahn und in Pipelines bewegt wird. Der Transport von Wasserstoff in Pipelines ist dabei auf die Industriegebiete beschränkt. Angetrieben von den Emissionsreduktionszielen haben die EU und mehrere nationale Regierungen in den letzten Jahren Wasserstoffstrategien vorgelegt. Die aktuellen Diskussionen über die Rolle von Wasserstoffnetzen sind jedoch von erheblichen Unsicherheiten und einer fehlenden gesamteuropäischen Strategie zum Wasserstoffinfrastrukturausbau geprägt. Dies liegt auch daran, dass sich die Wasserstoffstrategien der EU und einiger Mitgliedsstaaten noch in der Anfangsphase der Umsetzung befinden.

Einen Überblick über die europäische Gasinfrastruktur und ihre künftige Entwicklung gibt der 10-Jahres-Netzentwicklungsplan (TYNDP) des Verbands der Europäischen Gasnetzbetreiber, der in Übereinstimmung mit der EU-Gasverordnung erstellt wird. Der aktuelle TYNDP 2020 öffnete dabei erstmals die Einreichung von „Energy Transition Projects“ (ETR).¹³ Die eingereichten Projekte fallen in mehrere Kategorien und umfassen u. a. gasförmige Powerfuels einschließlich wasserstoffbezogener Projekte sowie die Biomethanproduktion und -einspeisung.

Seitens der Gaswirtschaft wurde mit der „European Hydrogen Backbone Initiative“¹⁴ ein konzeptioneller Plan für die Entwicklung eines europäischen Wasserstoffnetzes erstellt. Dieses würde sich über 39.700 Kilometer erstrecken und zu 70 Prozent auf umgerüsteten, bestehenden Erdgas-Pipelines basieren. Die Entwicklung eines solchen europäischen Wasserstofftransportnetzes könnte den internationalen Erzeugungswettbewerb für erneuerbaren Wasserstoff forcieren und so zu positiven, preisdämpfenden Effekten führen. Ein entsprechender Plan seitens der Kommission fehlt bisher.

Um das Wasserstoffnetz in Europa zu verwirklichen, müssen mehrere Hindernisse beseitigt werden. In erster Linie verhindert das Fehlen eines EU-Rechtsrahmens für die Entwicklung und den Betrieb von Wasserstoffnetzen Investitionsentscheidungen in größerem Maßstab. Insbesondere die Finanzierung bzw. Quersubventionierung mit dem Gastransport ist Kern der Debatte. Daher ist die Klarheit in dieser Frage entscheidend für die nächste Stufe des Infrastrukturausbaus. Der entscheidende Meilenstein für die Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur auf EU-Ebene ist das bis Ende 2021 erwartete Paket der EU-Kommission zum Wasserstoffmarkt und zum defossilisierten Gasmarkt. Es betrifft die Überprüfung und Überarbeitung der EU-Gasrichtlinie und der EU-Gasverordnung, die derzeit vorbereitet werden. Mit Blick auf den EU-Rechtssetzungsprozess wird erwartet, dass die neuen Regeln frühestens 2023 in Kraft treten können.

Eine weitere Herausforderung für die Planung und Realisierung der Wasserstoffnetze wird durch das Kapazitätsrisiko beim Markthochlauf bedingt (das „Henne-Ei-Problem“ zwischen Angebot und Nachfrage von Wasserstoff). Die Sicherstellung des verbindlichen Kapazitätsbedarfs für Netze in der Hochlaufphase des Wasserstoffmarktes ist keine leichte Aufgabe. Der deutsche Übergangsrechtsrahmen für die Entwicklung von Wasserstoffnetzwerken sieht die verbindliche Absichtserklärung zwischen Netzbetreiber und zukünftigen Nutzern als Instrument, um diese Frage aufzulösen. Wie dies in der Praxis funktionieren wird, bleibt abzuwarten.

Zur Bewertung der Versorgungssicherheit könnte auf bestehende europäische Monitoringprozesse aus dem Stromsektor aufgebaut und beispielsweise der ERAA-Prozess (European Resource Adequacy Assessment) auf weitere Energieträger wie Wasserstoff ausgeweitet werden.

¹¹ Europäische Kommission, 2014.

¹² Europäische Kommission, 2014.

¹³ Projekte, die die Integration erneuerbarer Energien, die Erreichung von Dekarbonisierungs- und Effizienzzielen, die Reduzierung anderer Luftschadstoffe, Initiativen zur Sektorkopplung und die Transformation des Energiesystems zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele erleichtern.

¹⁴ Besteht aus 23 europäischen Gasnetzbetreibern, die 19 EU-Mitgliedsstaaten, Großbritannien und die Schweiz abdecken.

Auf EU-Ebene ermöglichen die „Important Projects of Common European Interest“ (IPCEI) die staatliche Förderung in der Markthochlaufphase. Es ist jedoch absehbar, dass weitere staatliche Förderung für Infrastrukturprojekte erforderlich sein wird. Dazu müssen die EU-Regeln für staatliche Beihilfen (Änderungen derzeit in Vorbereitung) so gestaltet werden, dass die Förderung von Infrastrukturprojekten, speziell für Wasserstoff, eine übergeord-

nete Rolle spielen. Was die im Jahr 2020 gegründete European Clean Hydrogen Alliance, deren primäre Aufgabe die Ermittlung wirtschaftlich tragfähiger Investitionsprojekte (darunter IPCEI) und der Aufbau einer Investitionspipeline für die Umsetzung der Ziele der EU-Wasserstoffstrategie, betrifft, so sollten Investitionen im bestehenden Bereich „hydrogen transmission and distribution“ ausreichend abgedeckt werden.

5.3 Kooperationen in internationalen Märkten

Eine gute Einbettung des europäischen Wirtschaftsraums in die Weltwirtschaft trägt zur Erreichung der globalen Klimaziele bei und sichert Wettbewerbsfähigkeit und Wohlstand in Europa

Die Europäische Union hat mit dem Green Deal einen umfassenden Gesetzesrahmen geschaffen, durch den in der EU explizit die Ziele des Pariser Klimaabkommens erreicht werden sollen. Obwohl der Green Deal primär auf das Ziel von Klimaneutralität innerhalb der Staatengemeinschaft ausgerichtet ist, tritt die EU auch in internationalen Verhandlungen zunehmend aktiv als Akteur für mehr Klimaschutz ein, zum Beispiel beim Übereinkommen von Paris, den COP-Klimakonferenzen oder bei den G7- bzw. G20-Gesprächen. Klimaschutz wird dabei Schritt für Schritt fester Bestandteil der europäischen Außenpolitik, auch bei Handelsabkommen oder der Einführung technischer oder marktlicher Standards. Die EU nutzt dabei ihre wirtschaftliche Stärke als einheitlicher Markt, um auf vergleichbare Ambitions- und Regelungs-niveaus bei ihren Handelspartnern hinzuwirken.

Ein Grenzausgleichsmechanismus kann globale Bemühungen zur Umstellung auf emissionsarme Industrieprozesse stimulieren, solange kein einheitlicher globaler CO₂-(Mindest-)Preis besteht.

Ein wichtiges Ziel für die globale Ausrichtung auf das Ziel der Klimaneutralität sollte ein global einheitlicher CO₂-(Mindest-)Preis sein. Solange dieser nicht erreicht ist, sind andere ergänzende und /oder ausgleichende Instrumente

notwendig. Ein mögliches Instrument zur Sicherstellung globaler Bemühungen zur Umstellung auf emissionsarme Industrieprozesse ist die derzeit intensiv diskutierte Option eines CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM). Als erster Akteur weltweit hat die EU-Kommission am 14. Juli 2021 einen Entwurf für die Ausgestaltung eines solchen Mechanismus vorgelegt. Dem Entwurf nach müssten sich Importeure in den europäischen Wirtschaftsraum Emissionszertifikate für die durch die importierten Produkte und Grundstoffe verursachten CO₂-Mengen erwerben¹⁵; der Preis hierfür würde sich am CO₂-Preis des EU-ETS orientieren.

Ein Ziel eines solchen Mechanismus ist, möglichst vielen anderen Staaten einen Anreiz zu geben, ebenfalls eine wirksame CO₂-Bepreisung vorzunehmen und ihre Wirtschaft auf THG-arme Produktionsverfahren umzustellen.¹⁶ Gleichzeitig wäre ein solcher Mechanismus geeignet, mögliche Wettbewerbsnachteile für in Europa produzierende Unternehmen gegenüber Unternehmen an Standorten mit geringeren Klimaschutzauflagen zu mildern. Insbesondere soll ein CBAM verhindern, dass die entsprechenden Produktionskapazitäten in Länder mit niedrigeren Klimaschutzniveaus verlagert werden, wo diese THG-Emissionen dann weiterhin anfallen (Carbon Leakage) und somit auch die globalen Bemühungen zur Verhinderung der Klimakatastrophe zunichtemachen würden. Ein CBAM kann daher als Instrument für kosteneffizienten globalen Klimaschutz gelten. Jedoch gilt dies nicht für alle Sektoren gleichermaßen. Es braucht daher eine ausdifferenzierte Ausgestaltung dieses Instruments, die die jeweiligen Umstände der verschiedenen Sektoren in ihrer Komplexität anerkennt.

¹⁵ European Commission, 2021a.

¹⁶ Importeure, die im Herkunftsland schon einer vergleichbaren CO₂-Bepreisung unterliegen, würden vom CBAM ausgenommen bzw. eine Rückerstattung der CO₂-Grenzabgabe erhalten. (European Commission, 2021a: Art. 9, Abs. 1; Art. 1 Abs. 3, Art. 31 i.V.m. Art. 10a ETS-RL).

Allerdings erfordert ein CO₂-Grenzausgleichsmechanismus ein großes Maß an Kooperation und Transparenz zwischen der EU und den globalen Handelspartnern. Zudem könnte ein solcher Mechanismus auch Konflikte erzeugen, auch dann, wenn – wie von der EU-Kommission in ihrem Vorschlag explizit angestrebt – eine grundsätzliche Konformität mit WTO-Recht gegeben wäre.¹⁷

Sollte die Integration auf globaler Ebene nicht gelingen, könnten internationale Handelskonflikte ebenso die Folge sein wie Versuche seitens der Handelspartner, den CBAM-Mechanismus zu unterlaufen. Insbesondere die vorgesehene Rückerstattungsregelung könnte betrugsanfällig sein. Weiterhin ist zu bedenken, dass der CBAM im aktuellen Entwurf der EU-Kommission nur importseitig wirkt. Das geplante Ausphasen der freien Allokationen wird zwar letztendlich auch exportseitige Wirkung entfalten, jedoch dabei die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen in Exportmärkten mit niedrigeren Klimaschutzambitionen erheblich gefährden. Daher wäre eine Ausgleichsregelung für europäische Exporte sinnvoll.

Eine detailliertere Analyse des im Sommer 2021 von der EU-Kommission vorgestellten Vorschlags für einen CBAM findet sich in dem im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität erstellten Fachgutachten der Stiftung Umweltenergierecht (siehe SUER-Gutachterbericht).

Ein zentrales Problem der internationalen Klimapolitik ist das Trittbrettfahrerproblem: Bei Gemeingütern können Akteure den Nutzen eines solchen Gutes (beispielsweise saubere Luft) auch dann erhalten, wenn sie selbst keinen aktiven Beitrag dazu geleistet haben. Einzelne Staaten können von den durch erfolgreichen globalen Klimaschutz generierten Vorteilen nicht ausgeschlossen werden und würden unabhängig vom eigenen Handeln davon profitieren. Für einen effektiven Klimaschutz hat deshalb der Ökonom und Nobelpreisträger William Nordhaus die Etablierung einer multilateralen Staatenallianz als sogenannter „Klimaclub“ vorgeschlagen, in welchem sich Länder mit ambitionierten Klimazielen zusammenschließen und sich innerhalb eines gemeinsamen Rahmens und unter ähnlichen Klimaschutzanforderungen bewegen (z. B. mit einem gemeinsamen CO₂-Mindestpreis). Um für andere Länder Anreize zu schaffen, dem Klimaclub beizutreten, sollten die Mitglieder von Vorteilen wie Handelsprivilegien profitieren, die Externe nicht erhalten. Ein Zusammenschluss wirtschaftlich mächtiger Staaten, welche durch gemeinsame Regeln und vereinfachten Handel profitieren, könnte eine Sogwirkung auf weitere Staaten entfalten.

Ein Klimaclub könnte in enger Anbindung an die WTO-Regeln als ein Forum des koordinierten Dialogs und multilateraler Abkommen etwa die Einbettung eines Grenzausgleichsmechanismus in die internationale Handelsgemeinschaft unterstützen (integrierende Klimaaußenpolitik). Eine Angliederung an die WTO würde dem Klimaclub einen gemeinsamen handelspolitischen Rahmen

Ein „internationaler Klimaclub“ kann Sogwirkung auf andere Länder entfalten und diese zu Klimaschutz motivieren.

bieten, welcher eine erprobte Verhandlungsgrundlage für die Konsensfindung zu kontroversen Instrumenten wie dem CBAM ermöglichen würde. Als aktiver Initiator eines solchen Clubs würde sich die EU anbieten, welche als größter Nach-

fragemarkt der Welt das nötige geopolitische Schwergewicht und mit dem Green Deal bereits weitreichende Erfahrung in der über nationale Grenzen hinweg reichenden Einigung zu Klimazielen und Klimaschutzinstrumenten mitbringt. Solch ein kooperativer Ansatz sollte daher Ziel der EU-Klimadiplomatie sein. Die Bundesregierung hat im August 2021 bekanntgegeben, dass sie die Gründung eines „kooperativen und offenen Klimaclubs“ zeitnah erreichen und dafür das Konzept für die Umsetzung auf europäischer Ebene abstimmen möchte.

Grundsätzlich zeigt die Diskussion, dass zur Erreichung der globalen Klimaziele bei gleichzeitigem Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft zur Sicherung der damit verbundenen Arbeitsplätze und der Wertschöpfung und somit des Wohlstands in Europa eine Lösung für unterschiedliche CO₂-Bepreisungssysteme (bzw. fehlende CO₂-Bepreisung) gefunden werden muss. Eine wichtige Strategie auf globaler Ebene sollte dabei sein, sich für einen starken globalen CO₂-(Mindest-)Preis einzusetzen. Dazu kann auch eine Unterstützung beim Aufbau von Emissionshandelssystemen in Anlehnung an den EU-ETS auch in Nicht-EU-Staaten gehören, wie beispielsweise im EU-China-ETS-Dialog (EU-China Platform for Policy Dialogue on Emission Trading, ECPPD). Des Weiteren ist eine Vernetzung der verschiedenen global existierenden Emissionshandelssysteme anzustreben, darunter mit Australien, Südkorea oder Kasachstan.

¹⁷ Um die WTO-Kompatibilität zu gewährleisten, müsste nach Einschätzung der EU-Kommission beispielsweise voraussichtlich die kostenlose Zuteilung von EU-ETS-Emissionszertifikaten an EU-Industrieunternehmen beendet werden. In dem von der EU Kommission am 14.07.2021 vorgelegten Entwurf für einen CBAM ist daher ein Auslaufen der freien Allokationen in der Zeit von 2026 bis 2034 um jährlich 10% für diejenigen Sektoren vorgesehen, die vom CBAM abgedeckt werden. European Commission: 2021a: 10a, Abs. 1a.

Globale Märkte für Powerfuels ermöglichen die günstige und zeitnahe Versorgung mit den benötigten gasförmigen und flüssigen Energieträgern und Grundstoffen

Die Bundesregierung sollte den Aufbau internationaler Kooperationen für den Import von klimaneutralem Wasserstoff und dessen Folgeprodukten nicht nur aus inner-, sondern auch aus außereuropäischen Potenzialregionen forcieren. Das Bewusstsein für die Notwendigkeit von außereuropäischen Partnerschaften muss zudem auch auf europäischer Ebene verstärkt verankert werden.

Wie in Kapitel 9 „Energie“ dargestellt, werden Importe von Wasserstoff und seinen Derivaten ab 2030 immer wichtiger. So wächst der Importbedarf von Powerfuels aus außereuropäischen Ländern von knapp 4 TWh in 2030 auf 383 TWh in 2045.

Abgesehen von der Notwendigkeit der Deckung des heimischen Bedarfs sind internationale Importoptionen auch entscheidend für die kosteneffiziente Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland und der Europäischen Union. Aufgrund von günstigeren Produktionsbedingungen und größeren Flächenpotenzialen außerhalb Europas können globale Importe insbesondere für die EU die Kosten für klimaneutrale gasförmige und flüssige Energieträger um 15 bis 30 Prozent im Vergleich zu einem Szenario mit inländischer Eigenversorgung senken, was laut einer Studie der LUT Universität im Jahr 2050 zu Kosteneinsparungen von bis 75 Milliarden Euro pro Jahr führen würde.¹⁸

Wie in der deutschen Wasserstoffstrategie sind Importe auch auf EU-Ebene bereits integraler Bestandteil der Wasserstoffagenda: Die EU-Wasserstoffstrategie skizziert dabei insbesondere die

Powerfuels-Importe sind integrales Element der deutschen und europäischen Wasserstoff-Agenda.

enge Zusammenarbeit mit östlich und südlich gelegenen Nicht-EU-Nachbarländern. Hier will die EU aktiv neue Möglichkeiten der Zusammenarbeit mit Nachbarländern und -regionen in Bezug auf

sauberen Wasserstoff fördern. Speziell sollen Energiepartnerschaften und -dialoge mit Nachbarländern und -regionen verstärkt werden. So wird beispielsweise auch eine Zusammenarbeit der 2020 gegründeten European Clean Hydrogen Alliance mit den westlichen Balkanstaaten und der Ukraine sowie mit der African Union in der Africa-Europe Green Energy Initiative anvisiert.

Diese Importe aus den Anrainerregionen der EU sind denkbar, da hier eine Zulieferung über Pipelines möglich ist und bereits Kooperationsmechanismen mit den entsprechenden Ländern bestehen, die jedoch noch ausgebaut und zielgerichteter gestaltet werden müssen. Die Anbindung befindet sich insgesamt noch in der Annäherungsphase. Längerfristig sind auch Importe, speziell von flüssigen Powerfuels, aus weiter entfernt liegenden Regionen (beispielsweise Australien und Chile) wahrscheinlich.

Bei internationaler Erzeugung von Powerfuels und deren Handel in globalen Märkten können insbesondere die Vorteile wirken, die dadurch entstehen, dass diese erneuerbar erzeugten Energieträger und Grundstoffe chemisch gleich zu den fossilen Kraft- und Brennstoffen sind. Es handelt sich um gut bevorratbare Energieträger, deren Speicherung in großen Dimensionen in den Bezugsländern sowie in heute vorhandenen und nutzbaren Speicherkapazitäten in Deutschland möglich ist („EBV-Reserve“). Auch die Transport- und Verteillogistik ist vorhanden und erprobt, da in diesen sowohl Powerfuels als auch fossile Kraft- und Brennstoffe transportiert werden können. Die internationale Erzeugung von Powerfuels macht aufgrund der guten Speicherbarkeit und der geringen Transportkosten große globale EE- und Flächenpotenziale überhaupt erst nutzbar. Dabei ist die Zahl der potenziellen Herkunftsländer im Vergleich zu den heutigen Importen fossiler Energieträger und Grundstoffe sehr viel höher.

¹⁸ LUT University & Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020.

Haupt Herausforderung ist, dass die hierfür notwendigen Produktionskapazitäten und teilweise auch Infrastrukturen in den potenziellen Herkunftsländern noch nicht vorhanden sind. Um das Entstehen eines globalen Marktes für Powerfuels anzureizen und in der frühen Hochlaufphase einen Teil der Investitionsrisiken abzufedern, sind politische Anschubinstrumente notwendig. Differenzkontrakte, Auktionsmodelle, Kreditgarantien und Kredite, Einspeisevergütungen sowie Investitions- und Betriebskostenförderungen werden derzeit verstärkt diskutiert. Für Deutschland entsteht hierdurch eine große Exportchance für „Energiewende-Technologie Made in Germany“. Im Rahmen von „H₂ Global“, einem vom Bundeswirtschaftsministerium unterstützten Instrument, werden bereits Schritte in diese Richtung unternommen. Über ein Modell mit zweiseitigen Auktionen zur Verbindung von Angebots- und Nachfrageseite sowie langfristige Abnahmeverträge mit Produzenten von klimaneutralen Kraft- und Brennstoffen in potenziellen Lieferländern sollen Planungs- und Investitionssicherheit für den zügigen und wettbewerbsfähigen Markthochlauf geschaffen werden. Zusätzlich sollten gezielt die Wettbewerbsvorteile grüner Produkte kommuniziert werden. Damit kann die langfristige wirtschaftliche Attraktivität des Powerfuels-Marktes auf nationaler wie europäischer Ebene erhöht werden, um weiteres privates Kapital für Investitionen zu mobilisieren.

Hierbei sollten frühzeitig Abkommen und (bilaterale) Lieferverträge geschlossen werden, um Importmengen abzusichern. Gleichwohl ist es unabdingbar, dass schon bei der Anbahnung diese Exportmengen mit der Energiewende vor Ort abgeglichen werden, um realistische Erwartungen hinsichtlich der zukünftig zur Verfügung stehenden Exportmengen zu erhalten. Die Energiepolitik muss zudem mit der außen- und entwicklungspolitischen Dimension verknüpft werden, um das Risiko politischer Instabilitäten möglicher Herkunftsländer oder -regionen (beispielsweise Ukraine, Russland, Naher Osten, Nordafrika) zu reduzieren und die entwicklungspolitischen Chancen für das Partnerland zu erhöhen.

Ein wichtiger Wegbereiter für den Aufbau eines nachhaltigen globalen Marktes wird vor allem die Definition von internationalen Standards für die Sicherstellung der positiven Klimawirksamkeit

Grundlage für globale Märkte von Powerfuels sind internationale Standards zur Sicherstellung der positiven Klimawirksamkeit.

bei der Produktion von Powerfuels sein (insbesondere die Nutzung von zusätzlichem erneuerbarem Strom sowie die korrekte Bilanzierung der Kohlenstoffquelle). Alleinstehende europäische oder gar nationale Standards würden

die europäische bzw. deutsche Anschlussfähigkeit gefährden. Derzeit ist noch keine der bestehenden internationalen Institutionen mit der Entwicklung von Standards und einer Zertifizie-

rung zur Harmonisierung des globalen Handels von Powerfuels beschäftigt. Standards und die damit verbundenen Nachweissysteme müssen auch die Berücksichtigung in der internationalen THG-Bilanzierung ermöglichen. Zudem müssen regulatorische Standards für die Produktion von Powerfuels die reale Klimawirksamkeit und Sicherheit in den Herkunftsländern sowie beim Transport abbilden. In die EU importierte Powerfuels müssen zudem die in der Ausarbeitung befindlichen EU-Nachhaltigkeitsstandards erfüllen, um eine Anrechenbarkeit auf die RED-III-Unterquoten für erneuerbare Energieträger nicht biologischen Ursprungs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBOs) oder auf die Erneuerbaren-Energien-Ziele der EU zu erlauben.

In diesem Kontext sollten EU-weite Nachhaltigkeitsstandards, wie sie im bevorstehenden delegierten Rechtsakt von Artikel 27 der EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED III) noch in diesem Jahr erwartet werden, noch mehr die zukünftigen Importe und die globale Anwendbarkeit der Kriterien mitdenken. Ziel sollte sein, ein multilaterales Zertifizierungssystem aufzubauen. Hierzu sollten die notwendigen Kriterien bereits im Zusammenschluss mit weltweiten Schlüsselpartnern entwickelt werden, beispielsweise Australien oder Chile.

Der Aufbau eines globalen Marktes für Powerfuels, die Schaffung der entsprechenden Produktionskapazitäten in Ländern mit hohen Potenzialen und die Festlegung von Nachhaltigkeitsstandards sollten noch mehr in den bilateralen Energiepartnerschaften, multilateralen Kooperationen sowie in der Außenpolitik und der internationalen Handelspolitik der Bundesregierung Berücksichtigung finden. Deutschland und die EU sollten sich zudem weltweit für solide gemeinsame Normen und Methoden einsetzen. Dahingehend ist eine aktivere Rolle in multilateralen Organisationen und Foren (International Maritime Organisation (IMO), International Energy Agency (IEA), International Renewable Energy Agency (IRENA), G20) wünschenswert.

Beim Aufbau von Erzeugungsstrukturen auch im nicht europäischen Ausland kann durch Kooperationen inländisches Know-how die Einhaltung von Standards sowie die notwendige Nachhaltigkeit sichern.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode



AUFGABE 25

Ziele des EU Green Deals proaktiv unterstützen und die Rechtsakte des „Fit for 55“-Pakets zeitnah umsetzen

Deutschland hat eine gewichtige Rolle in der EU und sollte diese für die ambitionierte Umsetzung des Green Deals in der EU aber auch darüber hinaus nutzen. Die Bundesregierung sollte daher den Green Deal proaktiv unterstützen und das „Fit for 55“-Paket sowie andere EU-Aktivitäten rund um Energiewende und Klimaschutz aktiv vorantreiben und zur Lektorientierung auch der nationalen Energie- und Klimapolitik machen. Auf europäischer Ebene sollte sich Deutschland dafür einsetzen, einen praktikablen marktwirtschaftlich orientierten Rahmen und eine dazu konsistente Regulierung zu schaffen. Um Marktverzerrungen im EU-Binnenmarkt zu vermeiden, sollte die Bundesregierung beispielsweise dafür werben, alle industriellen Emissionen in den EU-ETS zu integrieren. Bei allen Maßnahmen müssen alle drei Ziele (Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft) mitgedacht werden.

Wichtig ist auch, dass die Bundesregierung in allen Verhandlungen auf EU-Ebene die Prämisse der EU-Kommission stützt, dass einzelne Elemente des „Fit for 55“-Pakets nur dann von einzelnen Mitgliedsstaaten herausgehandelt werden dürfen, wenn dafür ein Ersatzvorschlag angeboten wird, der die THG-Emissionen im selben Maße senken würde.



AUFGABE 26

Einheitliche Mindeststandards erarbeiten, um globale Klimaziele zu erreichen und die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu bewahren

Die EU sollte ihre Vorreiterrolle in der globalen Klimadiplomatie intensivieren, engagiert voranschreiten und die Ziele des Green Deal gut in eine globale Verhandlungsstruktur einbinden.

Längerfristig sollte sich die EU für einen globalen CO₂- (Mindest-)Preis bzw. ein globales ETS einsetzen. Dies könnte zunächst auf Basis bilateraler oder multilateraler Abkommen zwischen Vorreiterstaaten entstehen. Der jüngst von der Bundesregierung vorgeschlagene Klimaclub kann dabei zu einer sehr hilfreichen Initiative werden und sollte zu einer europäischen Initiative erhoben und von der EU als Treiber weiterverfolgt werden (insbesondere sollte sich um die Mitgliedschaft wichtiger EU-Handelspartner wie China und den USA bemüht werden).

Die Bundesregierung sollte die Prüfung und Einführung eines geeigneten und WTO-kompatiblen CBAM auf EU-Ebene als zentrales Instrument zum Carbon Leakage-Schutz unterstützen. Da gerade die weitere Ausgestaltung und Umsetzung des CBAM ein hohes Maß an diplomatischem Geschick erfordern wird, sollte die Bundesregierung sich um eine Einbettung des CBAM in den Klimaclub bemühen. Ein Alleingang der EU würde ohne handelspolitische Verständigung unmittelbar zu Konflikten führen und auch Versuche seitens der Handelspartner, den CBAM zu umgehen, sind nicht ausgeschlossen.

Deutschlands Beitrag in einem solchen Klimaclub sollte außerdem darin bestehen, auf globaler Ebene auf einen Markt für klimaneutrale Produkte hinzuwirken, den Ausbau von erneuerbaren Energie zu forcieren und eine globale Wasserstoffwirtschaft zu etablieren. Deutschland sollte hier eine unterstützende Vorreiterrolle einnehmen.



AUFGABE 27

Abstimmung auf EU-Ebene zur Weiterentwicklung integrierter Energieinfrastrukturen und Erzeugungskapazitäten verstärken

Die Beschleunigung der Energiewende erfordert eine verstärkte Kooperation zwischen den Mitgliedsstaaten und auf der Ebene des Europäischen Rates. Dies gilt vor allem bei dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft einschließlich der notwendigen europäischen Produktionskapazitäten und Infrastrukturen, dem koordinierten Ausbau der Offshore-Windenergie in Nord- und Ostsee, dem Ausbau der Strom-

netze unter Berücksichtigung der neuen Klimaziele sowie der gemeinschaftlichen Gewährleistung der Versorgungssicherheit im Stromsektor sowie perspektivisch auch bei Powerfuels.

Die Bundesregierung sollte sich auf EU-Ebene dafür einsetzen, den regulatorischen Rahmen für eine integrierte Weiterentwicklung der europäischen Energieinfrastrukturen zu verbessern.

Hierzu sollte die Stakeholder-Konsultation zum Nationalen Energie- und Klimaplan (NECP) intensiviert werden und insbesondere mit den Nachbarländern strategische Partnerschaften eingegangen werden. Zudem sollten gemeinsame Aktivitäten mit anderen EU-Staaten zur Umsetzung der „Green Recovery“-Wiederaufbaupläne nach der Coronapandemie angestrebt werden. Die nationalen Energieagenturen können hierbei den Austausch von Lernerfahrungen in Bezug auf eine erfolgreiche Umsetzung sowie die Initiierung und Umsetzung gemeinsamer Vorhaben durchführen bzw. steuern.

Auch die stärkere Förderung grenzüberschreitender Projekte ist zu empfehlen, zum Beispiel für Interkonnektoren nicht nur auf Ebene der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB), sondern auch auf lokaler Ebene, um ein Zusammenwachsen der Grenzregionen, in denen Europa Teil des Alltags ist, zu befördern. Diese Verbindungen sollten sich nicht nur auf Strom, sondern auch auf Wärme beziehen.



AUFGABE 28

Internationale Kooperationen für den Import von Powerfuels aufbauen

Zum Aufbau von Importmöglichkeiten aus dem Nicht-EU-Ausland sollten die Bundesregierung und die EU die Zahl der Kooperationsabkommen mit geeigneten Partnerländern über die langfristige Abnahme von Wasserstoff und seinen Derivaten (Powerfuels) weiter aktiv ausbauen. Zudem müssen im Austausch mit globalen Partnern regulatorische Standards für die Produktion von Powerfuels definiert werden, die die reale Klimawirksamkeit in den Herkunftsländern abbilden, aber auch die globale Anwendbarkeit gewährleisten. Sie müssen zusammen mit einem Zertifizierungssystem die Grundlage für den Handel bilden.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- ▶ **EU-weite Vereinheitlichung der CO₂-Bepreisung vorantreiben und Abgleich mit den nationalen Regelungen vornehmen** (Kapitel 2 „Marktdesign“)
- ▶ **Vernetzung auf EU-Ebene** (Kapitel 3 „Innovation“)
- ▶ **Die Energieeffizienz weiter verbessern und alle Förderprogramme auf THG-Minderung ausrichten** (Kapitel 7 „Industrie“)
- ▶ **Europäische und nationale Instrumente verzahnen** (Kapitel 8 „Verkehr“)
- ▶ **Gesetzliche Grundlagen für das Startnetz und den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur schaffen** (Kapitel 9 „Energie“)
- ▶ **Ein Konzept für die Transformations- und Versorgungssicherheit der neuen Energiemärkte erstellen** (Kapitel 9 „Energie“)

Der detaillierte Blick in die Sektoren

Im Folgenden wird zunächst die Transformation in den Endverbrauchssektoren Gebäude (Kapitel 6), Industrie (Kapitel 7) und Verkehr (Kapitel 8) dargestellt. Die aus den Verbrauchssektoren resultierenden Energiebedarfe werden von der Energiewirtschaft bereitgestellt. Das Kapitel zur Energiewirtschaft (Kapitel 9) erläutert dabei die Herausforderung der Diversifikation klimaneutraler Energieträger zur Deckung dieser Bedarfe, des Ausbaus der Erneuerbare-Energien-Erzeugung und des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft sowie etwaige Implikationen für die Versorgungssicherheit.

Für Klimaneutralität werden neben den vier beschriebenen Sektoren auch die Bereiche Landwirtschaft, LULUCF und technische Senken betrachtet, die in der Gesamtheit die Restemissionen aus den vorangegangenen Sektoren ausgleichen und die THG-Neutralität erzielen (Kapitel 10).

Alle Daten und Zahlen in den nachfolgenden Kapiteln sind, soweit nicht anders ausgewiesen, den Gutachterberichten zu entnehmen. Dabei entstammen alle hier gezeigten Modellierungsergebnisse der Modellierung des Gesamtsystems durch das EWI (siehe auch EWI-Gutachterbericht); die Daten im Gebäudesektor (Kapitel 6) entstammen der Gebäudemodellierung der Institute ITG und FIW; die LULUCF-Modellierung aus Kapitel 10 findet sich ausführlich im Gutachterbericht des Öko-Instituts.

► Kapitel 6 Gebäude	102
► Kapitel 7 Industrie	134
► Kapitel 8 Verkehr	160
► Kapitel 9 Energie	178
► Kapitel 10 Natürliche Ökosysteme und technische Senken	210



6 Gebäude

Wie kann die Transformation zu einem klimaneutralen Gebäudebestand gelingen?



Der Gebäudesektor bleibt aktuell hinter der Zielmarke zurück

In Deutschland entfallen etwa 35 Prozent des Endenergieverbrauchs auf den Gebäudebereich und etwa 30 Prozent der THG-Emissionen werden durch die Nutzung und den Betrieb von Gebäuden verursacht, vor allem durch ältere Bestandsgebäude.¹ Im Jahr 2019 wurden 865 TWh Endenergie in Gebäuden für Raumwärme, Warmwasser, Beleuchtung und Klimakälte verbraucht. Davon entfallen ca. zwei Drittel auf Wohn- und ein Drittel auf Nichtwohngebäude. Mit 76 Prozent hat Raumwärme hierbei den größten Anteil am Energieverbrauch, gefolgt von Warmwasser und Beleuchtung.²

Mit Blick auf Energieverbräuche und den Anteil am CO₂-Ausstoß ist die Dekarbonisierung des Gebäudesektors von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele und rückte damit im Laufe der letzten Jahre als zentraler Bestandteil im Rahmen des Gesamtsystems immer stärker in den Fokus der Debatten.

Die absoluten THG-Emissionen im Gebäudebereich sind nach Angaben des Umweltbundesamtes (UBA) seit 1990 um knapp 43 Prozent gesunken, jedoch ist seit ca. einem Jahrzehnt eine Stagnation festzustellen. Eine genauere Analyse zu den Ursachen der beobachteten Stagnation steht indes noch aus, denn beim Einzelgebäude ist die Einsparung durch die energetischen Maßnahmen durchaus feststellbar (siehe dena-Modellvorhaben). Deshalb stellt sich die Frage, aus welchen Gründen sich die Investitionen in Effizienzmaßnahmen nicht in der erwarteten Form in der Energie- und CO₂-Bilanz von Deutschland widerspiegeln. Nach aktuellen Berechnungen des UBA hat der Gebäudesektor sein Einsparziel für 2020 nach Klimaschutzgesetz (KSG) verfehlt: 2020 emittierte der Gebäudesektor noch 120 statt der zulässigen 118 Millionen Tonnen Treibhausgase.³ Allerdings spielen bei der Zielerreichung anderer Sektoren auch durch die Pandemie bedingte Sondereffekte eine Rolle.

Auch wenn die Reduktion der THG-Emissionen durch die in den letzten Jahren begonnenen zusätzlichen Maßnahmen (Ausbau der Förderung etc.) positiv beeinflusst wird, so bleibt doch eine deutliche Lücke zu den mit der Novelle des Klimaschutzgesetzes weiter verschärften THG-Minderungszielen bis 2030. Gleichzeitig stagniert der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte seit 2012 bei rund 14 bis 15 Prozent.⁴ Gemäß aktuellen Zielvorgaben aus der EU muss dieser Anteil bis 2030 deutlich erhöht werden.

Die Gebäudehülle beeinflusst maßgeblich die Effizienzklasse

Die thermische Hülle beeinflusst maßgeblich den Endenergiebedarf von Gebäuden. Durch die Reduzierung der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste können daher der Ressourcenbedarf für die Energiebereitstellung und damit einhergehend die THG-Emissionen gesenkt werden.

In Deutschland liegt der Anteil der Wohngebäude mit den „schlechten“ Effizienzklassen G und H bezogen auf den berechneten Energiebedarf bei etwa 30 Prozent. Auffällig ist hierbei

Fast ein Drittel der Wohngebäude zählen zu den schlechten Effizienzklassen G und H.

vor allem der hohe Anteil der schlechtesten Effizienzklassen im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser. Insgesamt verursachen die beschriebenen „Worst Performing Buildings“ nach einem Bedarfs-

Verbrauchs-Abgleich etwa die Hälfte der gesamten THG-Emissionen im Wohngebäudebereich und stellen damit ein großes Potenzial für die THG-Minderung dar.⁵

¹ Bilanzierung nach Verursacherprinzip. Nach dem Quellprinzip werden beispielsweise sämtliche Emissionen der Fernwärme und des Stroms nicht im Gebäudesektor bilanziert, obwohl die Energiemengen dort verbraucht werden. Der THG-Anteil der Gebäude liegt dann nur bei 14 Prozent.

² Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021b.

³ Umweltbundesamt (UBA), 2021g.

⁴ Umweltbundesamt (UBA), 2021e.

⁵ Ifeu, 2021.

Zudem stagniert die Sanierungsrate seit Jahren und liegt verhältnismäßig konstant bei etwa 1 Prozent bezogen auf Vollsanierungsäquivalente, auch wenn sich durch die starke Aufstockung der Förderung in der letzten Legislaturperiode hier ein positiver Trend feststellen lässt.

Der Anlagenpark der Gebäude wird heute noch überwiegend mit fossilen Energieträgern versorgt

Die Anlagentechnik in Verbindung mit den zum Einsatz kommenden Energieträgern (fossil/erneuerbar) hat maßgeblichen Einfluss auf den Endenergiebedarf und auf die THG-Emissionen eines Gebäudes.

Der Anteil von Heizungen, die älter als 15 Jahre sind, lag 2020 in Deutschland bei über 50 Prozent. Das durchschnittliche Alter liegt bei 17 Jahren mit leicht höherem Alter in Mehrfamilienhäusern als in Ein- und Zweifamilienhäusern. Tendenziell ist das Alter der Heizungsanlagen im Süden der Bundesrepublik sowie in Großstädten wie Berlin und Hamburg höher als in den nördlicheren Bundesländern. Differenziert nach Erdgas- und Öl-Zentralheizungen sowie sonstigen Heizungssystemen dominiert bei den Anlagen, die 25 Jahre und älter sind, der Anteil von Öl-Zentralheizungen.⁶ Insgesamt sind viele Heizungsanlagen so alt, dass sich ein Austausch unter Energie- und Kosteneinsparungsgesichtspunkten lohnt.

Gemäß Abschätzungen aus dem Jahr 2019 werden etwa 46 Prozent der Wohngebäude mit Gasheizungen und 30 Prozent mit Ölheizungen versorgt. Diese Gas- und Ölkessel teilen sich wiederum in 42 Prozent Niedertemperaturkessel und 47 Prozent Brennwertkessel auf (11 Prozent Sonstige). Über einen Nah- oder Fernwärmeanschluss verfügen 6,6 Prozent der Wohngebäude und 3,4 Prozent werden durch elektrische Wärmepumpen versorgt. Der Rest entfällt auf Heizungen wie Holz- bzw. Pelletkessel, Einzelöfen oder Nachtspeicheröfen. Insgesamt wird der Großteil der Heizungen heute noch mit fossilen Energieträgern versorgt.⁷ Für das Jahr 2020 zeigt sich ein sichtbarer Zuwachs bei Elektro-Wärmepumpen sowie eine Verringerung der Anzahl ölbeheizter Wohnungen.⁸

Der Trend zu größeren Wohnflächen bedingt einen höheren Ressourcenverbrauch

Während die Haushaltsgrößen gesunken sind, ist die Pro-Kopf-Wohnfläche in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich angestiegen: Lag sie in den 1960er Jahren noch bei ca. 19 m², erreichte sie 1990 35 m² und 2018 schon 47 m² pro Kopf. Mehr Wohnfläche bedeutet sowohl einen höheren Flächen- und Ressourcenverbrauch als auch eine größere zu beheizende Fläche.

Der Gebäudesektor ist geprägt von einigen Besonderheiten

- Vielfältigkeit des Gebäudebestands: In Deutschland existieren ca. 19 Millionen Wohngebäude, davon etwa 3,2 Millionen Mehrfamilienhäuser (MFH) und 15,8 Millionen Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH). Weiterhin gibt es ca. 2 Millionen Nichtwohngebäude mit Heiz- bzw. Kühlungsbedarf.⁹
- Heterogenität der Eigentümerschaft und der Entscheidungsstrukturen (z. B. in Bezug auf finanzielle Leistungsfähigkeit, Lebensplanungen, Demografie etc.)
- Regionale und lokale Unterschiede (z. B. Anbindung Fernwärme, Verfügbarkeit bestimmter Energieträger)
- Volatiler Energieverbrauch, abhängig von der Witterung sowie der Tages- und Jahreszeit.
- Starke Verknüpfung des Gebäudesektors mit vorgelagertem Energiesystem sowie weiteren Sektoren
- Bestände unter Denkmalschutz: Diese unterliegen rechtlichen Restriktionen, die eine energetische Modernisierung einschränken oder sogar verhindern können.
- „Trägheit“ durch lange Austauschzyklen, Amortisationsräume und komplexe/heterogene Versorgungsstrukturen
- Energieverbraucher sind gleichzeitig immer stärker Energieerzeuger (dezentrale Energieerzeugung)
- Abhängigkeiten vom Nutzerverhalten/Rebound-Effekte (berechneter Bedarf und tatsächlicher Verbrauch können voneinander abweichen, Smart-Building-Systeme können hier Abweichungen abschwächen)

⁶ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), 2019.

⁷ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), 2019.

⁸ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), 2021.

⁹ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021b.

- Soziale Dimension des Wohnens: Wohnen ist der Mittelpunkt der menschlichen Existenz und damit unverzichtbar. Damit spielen soziale Fragen beim Wohnen eine Hauptrolle und müssen mitberücksichtigt werden.
- Wohnbedürfnisse und -wünsche sind sehr individuell und persönlich und emissionsreduzierende Maßnahmen sind oft in besonderem Maße mit Eingriffen in den privaten Raum verbunden. Die Akzeptanz ist daher besonders wichtig.

Gebäude stehen vor einem tiefgreifenden Transformationsprozess mit hoher Geschwindigkeit

Der bereits zuvor sehr ambitionierte Zielwert für die zulässigen Restemissionen des Gebäudesektors in 2030 wurde mit der Novelle des Klimaschutzgesetzes (KSG) von zuvor 70 auf 67 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent weiter verschärft. Hieraus ergibt sich ein jährliches Minderungsziel von durchschnittlich etwa 5 Millionen Tonnen CO₂ bis 2030 (ausgehend von der zulässigen Jahresemissionsmenge von 118 Millionen Tonnen im Jahr 2020). Um die angestrebten Minderungsziele zu erreichen, muss die Geschwindigkeit der jährlichen Emissionsminderungen im Vergleich zu den letzten zehn Jahren deutlich um durchschnittlich etwa 40 Prozent gesteigert werden.

Bei Zielverfehlung soll eine Nachsteuerung durch Sofortmaßnahmen erfolgen. Im Gebäudesektor gestaltet es sich allerdings

Sofortprogramme im Gebäudesektor müssen in eine langfristige Strategie eingebettet werden.

herausfordernd, Maßnahmen mit sofortiger Wirkung umzusetzen. Zentral ist die Einbettung kurzfristiger Programme zur Nachsteuerung in eine konsistente Strategie zur Zielerreichung bis 2030 und

2045. Grundsätzlich ist Planungssicherheit mit einem klaren Fahrplan zur Erreichung der Klimaziele anzustreben.

Auch die EU hat ambitionierte Ziele für den Wärmemarkt gesetzt, die mit den bevorstehenden Novellen der Energieeffizienz-Richtlinie (Energy Efficiency Directive, EED) und der EU-Gebäuderichtlinie (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) weiter erhöht werden sollen. Mit der „EU Renovation Wave“ kommt ein deutlicher Impuls aus Brüssel für eine stärkere energetische Sanierung in Europa: Die Zahl der Gebäudesanierungen muss angekurbelt werden, wobei laut EU-Kommission mindestens eine Verdoppelung der Sanierungsrate erforderlich ist, um die Energieeffizienz- und Klimaziele der EU bis 2050 zu erreichen. Das entsprechende EU-Paket enthält u. a. Elemente der Förderung und Finanzierung, ordnungsrechtliche Ansätze oder die Weiterentwicklung der Instrumente zur Planung und Beratung.

In Deutschland wurden die Förderprogramme für energieeffizientes Bauen und Sanieren bereits erheblich aufgestockt und die Förderkonditionen noch attraktiver gestaltet. Damit einhergehend sind Impulse für die Nachfrage zu verzeichnen, die Anzahl der Sanierungen wächst. So wurde das Programm „Heizen mit Erneuerbaren Energien“ vom BAFA in 2020 fast viermal so häufig abgerufen wie noch im Vorjahr. Dieser Trend lässt sich auch bei den Effizienzhäusern erkennen, insbesondere ist auch ein starker Anstieg der Anträge für effiziente Neubauten zu beobachten.¹⁰

Handlungsleitende Ziele für den Gebäudebereich

Handlungsleitende Ziele für den Gebäudebereich sollten sein:

- Minderungsziele erreichen durch Verringerung des Endenergiebedarfs (Gebäudehülle und Anlagentechnik, Wohn-/Nutzfläche)
- Ausbau erneuerbarer Energien
- Einsatz klimaneutraler Brennstoffe
- Sicherstellung der Effizienz durch verstärkten Einsatz von Gebäudeautomation und gebäudeübergreifende Optimierung
- Unterstützung der Gebäudenutzerinnen und -nutzer für ein optimiertes Verbrauchsverhalten

Als Orientierungsrahmen für die handlungsleitenden Ziele im Gebäudesektor ist eine konkrete Festlegung wichtig, wie der zukunftsfähige klimaneutrale Gebäudebestand zu definieren ist. Um den handelnden Akteuren eine Leitplanke sowie Planungssicherheit zu geben, ist die Definition klimaneutraler Gebäude unter enger Zusammenarbeit von Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Zivilgesellschaft ein Zielbild für den Gebäudesektor.

¹⁰ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021b.

Gebäude sind ein zentraler Bestandteil des Energiesystems: Gebäude mit ihren vielfältigen Schnittstellen zu anderen Sektoren stehen immer mehr im Mittelpunkt des integrierten Energiesystems. Die aktive Rolle von Gebäuden im Rahmen der Energiewende muss gestärkt werden, denn Gebäude sind nicht nur Energieverbraucher, sondern auch (potenzielle) Energieerzeuger und -speicher.

Schnittstelle zu Energie und Verkehr: Ein wesentlicher Teil der im Energiesektor bereitgestellten Energie bedient die Nachfrage aus dem Gebäudesektor. Der Einfluss des Gebäudesektors auf die deutsche THG-Bilanz ist damit real nach dem Verursacherprinzip deutlich größer, als es die KSG-Zahlen (Quellprinzip) vermuten lassen. Gebäude können Energie auf verschiedene Arten flexibel aufnehmen, speichern und wieder abgeben – thermisch und elektrisch – und so eine netzdienliche Rolle spielen. So kann zum Beispiel Photovoltaik-Strom von den Dächern über Wärmepumpen für die Heizung genutzt und in Batterien gespeichert werden oder Elektromobile können damit geladen werden. Gerade hier sind in den nächsten Jahren deutliche Zuwächse zu erwarten. Es ist absehbar, dass E-Mobile überwiegend (60 bis 85 Prozent) am selbst genutzten Gebäude geladen werden¹¹, was die Eigennutzung von erzeugtem PV-Strom begünstigen wird. Die damit einhergehenden THG-Minderungen sollten bei der THG-Bilanzierung ausgewiesen werden, um dezentrale vernetzte PV-Systeme als THG-mindernde Technologie weiter anzureizen. Neben PV-Anlagen können auch Brennstoffzellen und Mikro-KWK-Anlagen zur dezentralen Stromversorgung beitragen.

Schnittstelle zur Industrie: Auch zum Sektor Industrie bestehen direkte Verbindungen, vor allem im Bereich der Baustoffherstellung für den Einsatz in Gebäuden (Zement etc.). Schnittstellen und Potenziale gibt es ebenfalls in der verstärkten Nutzung industrieller Abwärme durch Einbringung in bestehende Wärmenetzstrukturen.

Akzeptanz: Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer sowie Investoren betrifft das Zielbild Klimaneutralität stark, weshalb die erforderliche Sensibilität und Akzeptanz für die künftige klimagerechte Gestaltung und Bewirtschaftung von Gebäuden sichergestellt werden muss. Sowohl Eigentümerinnen und Eigentümer als auch Mieterinnen und Mieter sollten hierfür über die notwendigen Schritte zur Verbesserung von Anlagentechnik, Gebäudehülle und Energieversorgung informiert werden, um Akzeptanzproblemen entgegenzuwirken. Im vermieteten Bestand sind hierbei auch immer die Auswirkungen auf die Mieterschaft zu berücksichtigen. Hinsichtlich künftig

ansteigender Kosten für Wohnen und Energie sind Transparenz und Unterstützung unabdingbar, wobei die soziale Absicherung einen wichtigen Faktor darstellt und insbesondere mittlere und untere Einkommensgruppen in geeigneter Weise entlastet werden sollten.

Machbarkeit: Bei der Ausgestaltung des Zielbilds muss immer auch die Betrachtung der Realisierbarkeit für betroffene Akteure einfließen. Machbarkeit setzt sich aus Wirtschaftlichkeit, technischer Realisierung und sozialer Verträglichkeit zusammen, außerdem sind Stabilität und Versorgungssicherheit zu berücksichtigen. Auch zur Verfügung stehende Kapazitäten (öffentliches und privates Geld, Planer, Handwerk, Baustoffe) spielen hier eine wichtige Rolle. Der Raum des Machbaren wird damit abgesteckt, Grenzen werden aufgezeigt.

THG-Minderungen auf nahezu null bis 2045

Gemäß den Vorgaben des Klimaschutzgesetzes liegen die zulässigen Restemissionen des Gebäudesektors für das Jahr 2030 bei 67 Millionen Tonnen CO₂ä, eine Verringerung um gesamt 53 Millionen Tonnen (44 Prozent) gegenüber dem Ausgangswert von knapp 120 Millionen Tonnen CO₂ä im Jahr 2020.

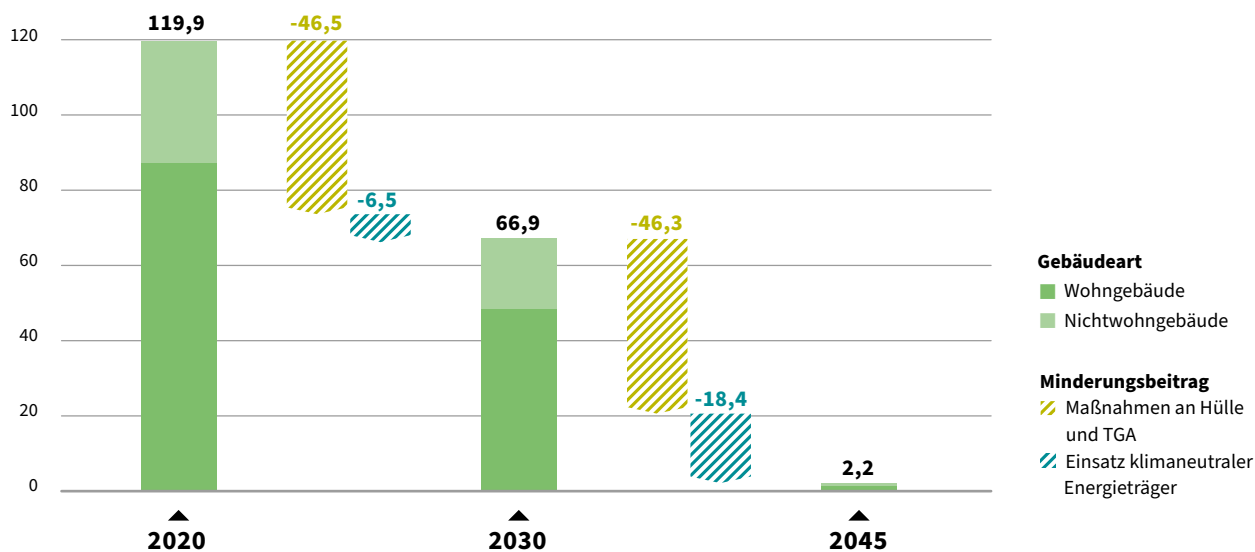
Für die Umsetzung dieser ambitionierten Emissionsminderung sind umfassende Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeschutzes, der verbauten Anlagentechnik und der zum Einsatz kommenden Brennstoffe erforderlich. Durch Maßnahmen an der Gebäudehülle (z. B. durch verstärkte energetische Sanierung) und Anlagentechnik (z. B. der Einbau effizienter Erzeuger mit Verwendung erneuerbarer Energien) kann bis 2030 eine Einsparung um 46,5 Millionen Tonnen CO₂ä erzielt werden.

Der verstärkte Einsatz klimaneutraler Energieträger trägt zusätzlich zur Minderung der Emissionen um 6,5 Millionen Tonnen CO₂ä bei. Durch die Umsetzung weiterer Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeschutzes und der Anlagentechnik kann zwischen den Jahren 2030 und 2045 eine weitere Reduzierung um 46,3 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent erreicht werden. Der Beitrag durch den Einsatz klimaneutraler Energieträger steigt ab 2030 stärker an, womit eine Verringerung um 18,4 Millionen Tonnen CO₂ä einhergeht. Im Jahr 2045 bleiben damit rund 2,2 Millionen Tonnen CO₂ä Restemissionen übrig, die durch entsprechende nationale Senkenleistungen ausgeglichen werden müssen (siehe Kapitel 10 „Natürliche Ökosysteme und Technische Senken“).

¹¹ Nationale Plattform für Mobilität (NPM), 2020.

Abb. 6.1 THG-Minderungspfad im Gebäudesektor

Angaben in Mt CO₂ä



THG-Emissionen nach Gebäudeart (Mt CO ₂ ä)	2020	2030	2045
Wohngebäude	87,3	48,1	1,4
Nichtwohngebäude (GHD)	32,7	18,8	0,8
Summe	119,9	66,9	2,2

Einsparung THG-Emissionen (Mt CO ₂ ä)	2020	Minderungsbeitrag	2030	Minderungsbeitrag	2045
Maßnahmen an Hülle und TGA	0,0	- 46,5	46,5	- 46,3	92,9
Einsatz klimaneutraler Energieträger	0,0	- 6,5	6,5	- 18,4	24,9
Restemissionen	119,9		66,9		2,2

Quelle: ITG/FIW-Gutachterbericht, 2021.

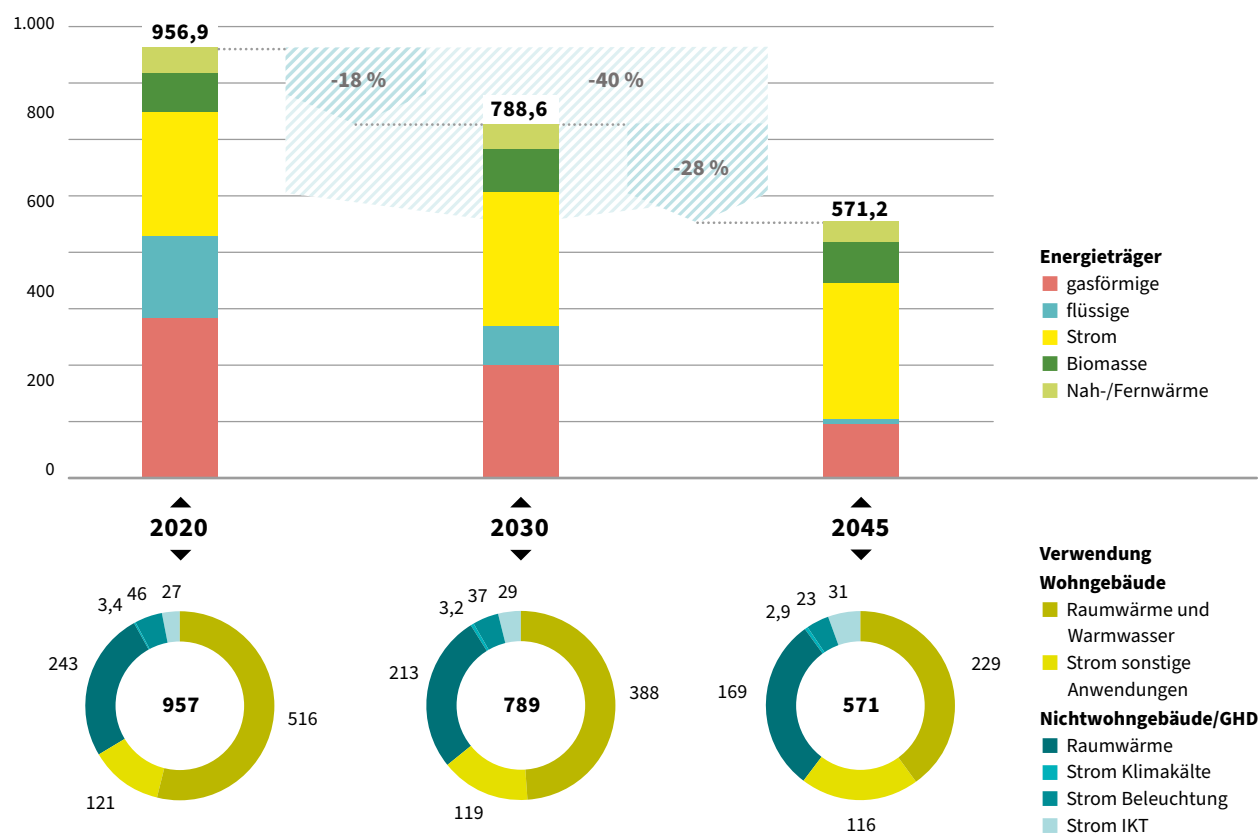
Der Endenergiebedarf des Gebäudesektors verringert sich

Durch die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes, die Effizienzsteigerung im Bereich der Anlagentechnik sowie den Energieträgerwechsel und den Einsatz erneuerbarer Energien, der mit dem Zubau neuer Wärmeerzeuger einhergeht, verringert sich der Endenergiebedarf im Gebäudesektor von etwa 957 TWh im Ausgangsjahr 2020 auf rund 789 TWh in 2030 und 571 TWh in 2045. Die größten Reduktionen sind im Bereich der flüssigen und gasförmigen Energieträger zu verzeichnen, was auf den verstärkten Austausch fossil betriebener Heizkessel mit effizienteren Technologien, wie beispielsweise der elektrischen Wärmepumpe, zurückzuführen ist. Im Jahr 2045 besteht weiterhin ein Bedarf von 120 TWh gasförmigen und gut 11 TWh flüssigen Energieträgern, die dann größtenteils durch klimaneutrale Brennstoffe gedeckt werden.

Der jährliche Strombedarf steigt bis 2045 auf 303 TWh (ein Zuwachs um 29 TWh gegenüber 2020). Die Zunahme des Strombedarfs um rund 10 Prozent von 2020 bis 2045 ist maßgeblich auf den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen zurückzuführen. Gleichzeitig reduzieren im betrachteten Zeitraum Effizienzverbesserungen bei sonstigen Stromanwendungen in Wohngebäuden sowie die Entwicklungen bei Klimakälte, Beleuchtung und IKT in Nichtwohngebäuden den Strombedarf (insgesamt minus 25 TWh), deren Anteil am Gesamtstrombedarf dabei von 72 auf 57 Prozent sinkt.

Abb. 6.2 Energiebedarf und -verwendung im Gebäudesektor

Angaben in TWh



Energieträger (TWh)	2020	2030	2045
gasförmige	354,9	250,3	119,7
flüssige	182,7	86,7	11,3
Strom	274,5	298,2	303,0
Biomasse	86,7	95,7	89,7
Nah-/Fernwärme	58,2	57,7	47,5
Summe	956,9	788,6	571,2

Verwendung (TWh)	2020	2030	2045
Wohngebäude			
Raumwärme und Warmwasser	515,8	387,5	228,9
Strom sonstige Anwendungen	121,5	119,4	116,4
Nichtwohngebäude/GHD			
Raumwärme	243,1	213,1	169,3
Strom Klimakälte	3,4	3,2	2,9
Strom Beleuchtung	45,9	36,8	23,2
Strom IKT	27,2	28,5	30,5
Summe	956,9	788,6	571,2

Quelle: ITG/FIW-Gutachterbericht, 2021.

Trotz steigender Anschlusszahlen sinken die Bedarfe von Nah-/Fernwärme sowie Biomasse bis 2045 insgesamt leicht ab, was hauptsächlich auf den verringerten Endenergiebedarf im Gebäudebestand zurückzuführen ist.

Hinsichtlich der Anwendungsbereiche der Endenergie für Wärmebereitstellung und Stromanwendungen wird zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden differenziert. Die größten Einsparungen sind sowohl in Wohn- als auch in Nichtwohngebäuden im Bereich der Wärmebereitstellung zu verzeichnen. So sinkt der Bedarf für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden zwischen 2020 und 2045 um knapp 56 Prozent von 516 auf 229 TWh/a, in Nichtwohngebäuden verringert sich der Bedarf für Raumwärme um etwa 28 Prozent von 234 auf 169 TWh/a. Dagegen sinkt der Strombedarf für sonstige Anwendungen in Wohngebäuden im gleichen Zeitraum lediglich um rund 4 Prozent von 122 auf 116 TWh/a. In Nichtwohngebäuden werden insbesondere im Bereich der Beleuchtung Stromeinsparungen erzielt. Insgesamt sinkt der Anteil des Endenergiebedarfs in Wohngebäuden am Gesamtenergiebedarf von ca. 67 Prozent im Jahr 2020 auf ca. 60 Prozent in 2045.

Handlungsfelder und strategischer Ansatz

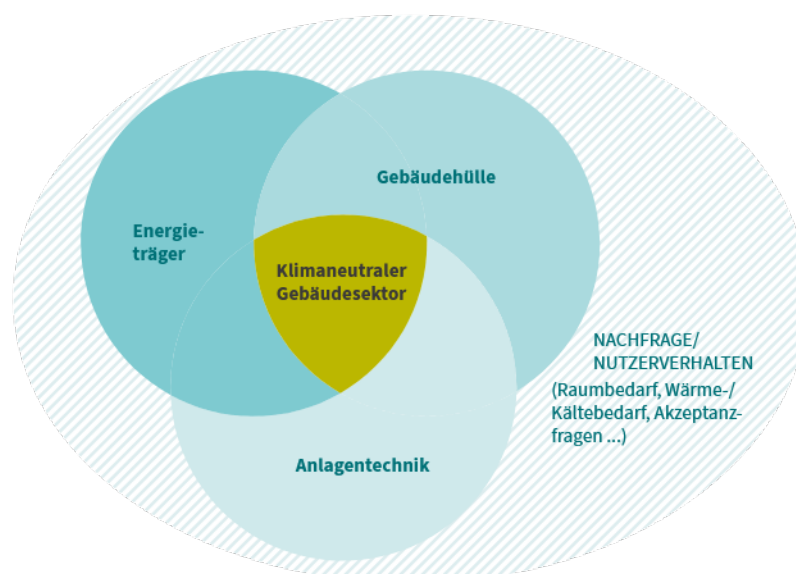
Die Transformation des Gebäudesektors hin zu einem zielerreichenden Pfad ist eine große Herausforderung, gerade im Hinblick auf die verschärften Ziele des neuen Klimaschutzgesetzes. In den kommenden Jahren ist deutlich mehr Transformation

notwendig, als in den vergangenen Jahren bzw. Jahrzehnten stattgefunden hat. Dies betrifft u. a. eine erhöhte Sanierungsrate, den Austausch von Anlagentechnik, den Wechsel von fossilen hin zu klimaneutralen Energieträgern sowie aus transformatorischer Sicht alternative Wohnkonzepte sowie neue Flächennutzungskonzepte. Im Zuge der Transformation des Gebäudesektors dürfen die Faktoren Wirtschaftlichkeit und Kosten sowie soziale Aspekte nicht unberücksichtigt bleiben. Entscheidend ist, die Geschwindigkeit des Umbaus des Gebäudesektors mit den dafür notwendigen Maßnahmen in der Praxis zu erhöhen. Die Veränderungen von heute legen den Grundstein für die Erreichung der Klimaziele bis 2030 und 2045.

Die folgenden Handlungsfelder sind zentral für einen klimaneutralen Gebäudebestand bis 2045:

- Energiesparende Gebäudehülle
- Effiziente Anlagentechnik und betrieboptimierte Gebäudesteuerung
- Einsatz erneuerbarer Energien und klimaneutraler Energieträger
- Nutzerverhalten und Akzeptanzfragen

Keines der Handlungsfelder kann allein die Zielerreichung im Gebäudesektor sicherstellen. Alle Handlungsfelder sind gleichermaßen notwendig, sodass keine Priorisierung erfolgen oder Reihenfolge festgelegt werden könnte.



6.1 Energiesparende Gebäudehülle

Eine energieeffiziente Gebäudehülle reduziert maßgeblich den Endenergiebedarf und schont den Ressourcenverbrauch für die Energiebereitstellung. Auf diese Weise können erneuerbare Energien auch effizient eingesetzt werden.

Steigerung der Sanierungsrate und Sanierungstiefe

Um die Gebäudehülle zu verbessern, sind eine ambitionierte und sofortige Steigerung der Sanierungsrate und damit einhergehend die Verbesserung der energetischen Qualität im Gebäudebestand notwendig. Die Sanierungsrate stagniert seit mehreren Jahren bei etwa 1 Prozent (bezogen auf Vollsanierungsäquivalente, siehe Gebäude-Gutachterbericht Kapitel 6). Besonders im Bereich der Bestandsgebäude mit schlechterem energetischen Niveau bleiben damit große Einsparpotenziale bislang noch ungenutzt.

In den betrachteten Lösungspfaden wurden ausgehend vom Hauptszenario KN100 sowohl die Sanierungsrate als auch die Sanierungstiefe variiert und damit zielkonforme Lösungsräume hinsichtlich der baulichen Sanierung und dem Wärmeschutz im Gebäudebestand aufgespannt. Für das Hauptszenario KN100 wurde im Rahmen der Modellierung ein erforderlicher Anstieg der Sanierungsrate aller Gebäudeklassen auf 1,9 Prozent bis zum Jahr 2030 ermittelt, womit sich ausgehend vom Jahr 2020 für die Dekade bis 2030 insgesamt ein Anteil von 14 Prozent vollsanierter Wohngebäude (in Bezug zum gesamten Wohngebäudebestand inkl. Neubau und Abriss) ergibt. Im weiteren Verlauf kumuliert sich dieser Anteil in KN100 auf 40 Prozent im Jahr 2045.

In den „More“-Pfadausprägungen ergibt sich aus der verringerten Sanierungstätigkeit ein Anteil von 11 Prozent vollsanierter Wohngebäude in der Dekade bis 2030 und 30 Prozent bis 2045. Auch aufgrund der geringeren Sanierungstiefe liegt der resultierende Heizwärmebedarf in 2045 entsprechend höher als in KN100. In den „Efficient“-Pfadausprägungen dagegen führen die höheren Sanierungsraten zu rund 17 Prozent vollsanierten Wohngebäude bis 2030 und 50 Prozent bis 2045. Aufgrund der verstärkten Sanierung liegt der Heizwärmebedarf hier im Jahr 2045 entsprechend niedriger als in KN100.

Die Sanierung der Gebäudehülle muss mit Blick auf die heterogene Eigentümer- und Nutzerstruktur im Gebäudesektor auf besondere Weise angereizt werden. Hierfür sollte bei den Eigentümerinnen und Eigentümern ein Bewusstsein für die Vorteile einer hochwertigen, energieeffizienten Gebäudehülle geschaffen werden: Neben der Energieeffizienz liegen diese insbesondere im Bereich Gesundheit und Komfort. Ein besonderes Augenmerk bei der Umsetzung einer effizienten Gebäudehülle sollte auf Wirtschaftlichkeit und Sozialverträglichkeit, auch im vermieteten Bestand, gelegt werden (siehe Branchenblick Immobilienwirtschaft).

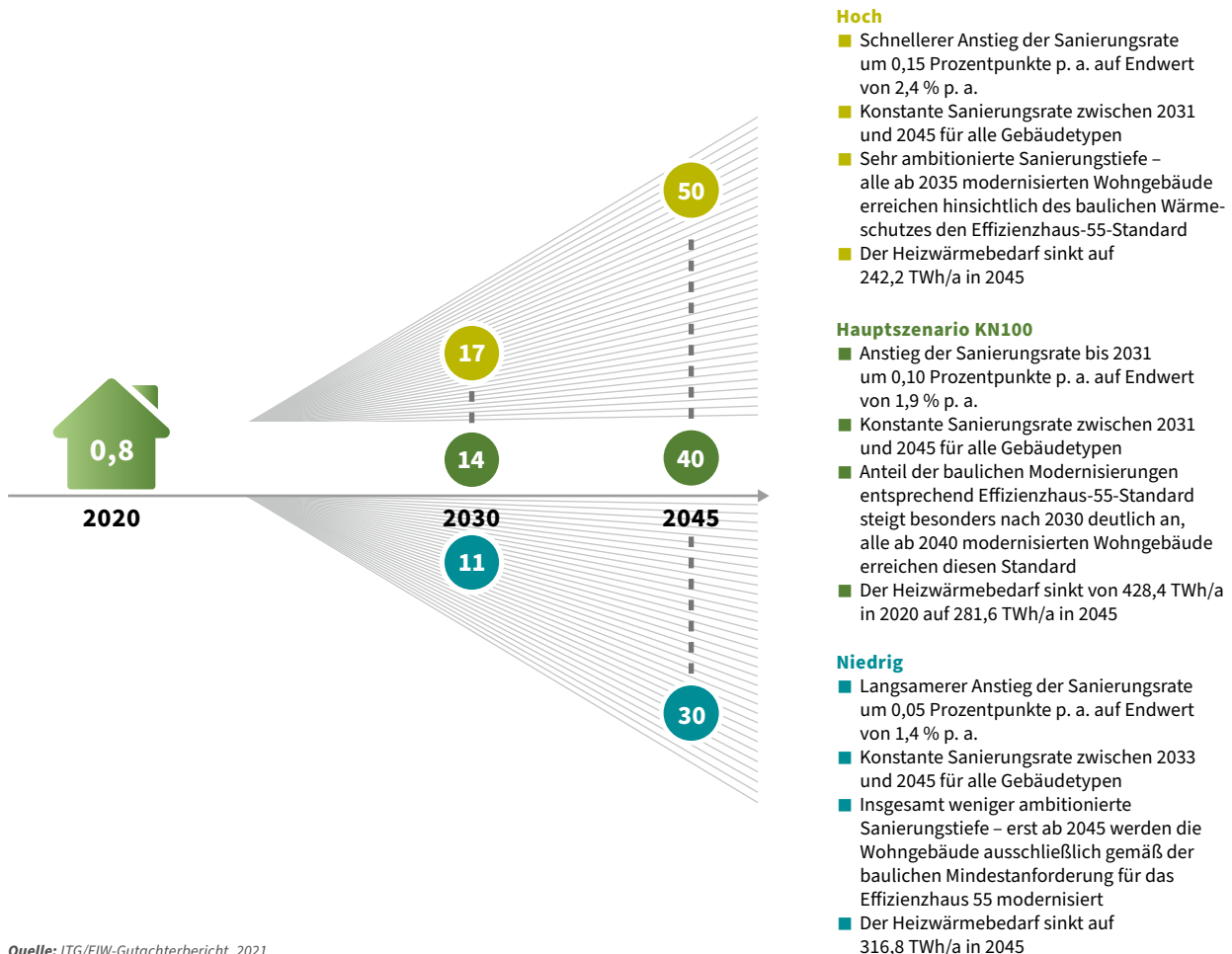
Effiziente Neubauten und Qualitätsstandards

Neben der Sanierung von Bestandsgebäuden spielt auch das energetische Niveau von Neubauten eine Rolle bei der Erreichung der Einsparziele. Im Vergleich zur Bestandssanierung ist dieser Hebel zwar schwächer, jedoch könnten auch höhere energetische Anforderungen im Neubaubereich zu einer stärkeren Reduktion des Endenergiebedarfs und damit der THG-Emissionen beitragen. In der Modellierung wurde ein bauliches Anforderungsniveau Effizienzhaus 55 ab dem Jahr 2022 und Effizienzhaus 40 ab 2030 angenommen. Für die Zielerreichung der Klimaneutralität muss dabei neben der Verringerung des Energiebedarfs auch der Einsatz erneuerbarer Energien und klimaneutraler Energieträger Berücksichtigung finden. Daraus möglicherweise entstehende größere finanzielle Belastungen sind zu berücksichtigen und auf geeignete Art auszugleichen.

Die Effektivität einer energetischen Sanierung bzw. die Umsetzung von Energieeffizienzstandards sollte durch die Einhaltung von Qualitätsstandards bei der Umsetzung gewährleistet werden. Eine systematische Schulung und Weiterbildung von Fachkräften ist hierfür unerlässlich.

**Abb. 6.3 Indikator „Anteil der seit 2020 vollsanierten Wohngebäude“
(in Bezug auf gesamten Wohngebäudebestand)**

Angaben in %



Quelle: ITG/FIW-Gutachterbericht, 2021.

6.2 Effiziente Anlagentechnik und betriebs-optimierte Gebäudesteuerung

Im Bereich der Anlagentechnik wird der erforderliche Hochlauf bestimmter Technologien eine zentrale Herausforderung darstellen. Vor allem die kurzfristige deutliche Erhöhung der Anzahl von Wärmepumpen ist hierbei ein wichtiger Hebel für die Zielerreichung bis 2030 und 2045. Aufgrund der hohen Effizienz bei der Energiebereitstellung und der Möglichkeit zur Versorgung mit erneuerbarem Strom stellen elektrische Wärmepumpen eine effektive Technologie für die Emissionsminderung im Gebäude-

bestand dar. Nicht nur im Neubaubereich, sondern auch im Bestand ist es wichtig, dass der Anteil von Wärmepumpen erhöht wird. Ein gutes Wärmeschutzniveau ist dabei für den effizienten Einsatz der Wärmepumpen von großer Bedeutung, da so geringere Vor- und Rücklauftemperaturen ermöglicht werden, die den Betrieb der Wärmepumpe günstiger werden lassen. Ebenso sind vorhandene Infrastrukturen und genutzte Wärmesysteme bei der Umsetzung zu berücksichtigen.

Für die Erreichung der Einsparziele ergibt sich im Anlagenpark des modellierten Hauptszenarios KN100 ein erforderlicher

Es bedarf eines ambitionierten Hochlaufs von Wärmepumpen in Neubau und Bestandsgebäuden.

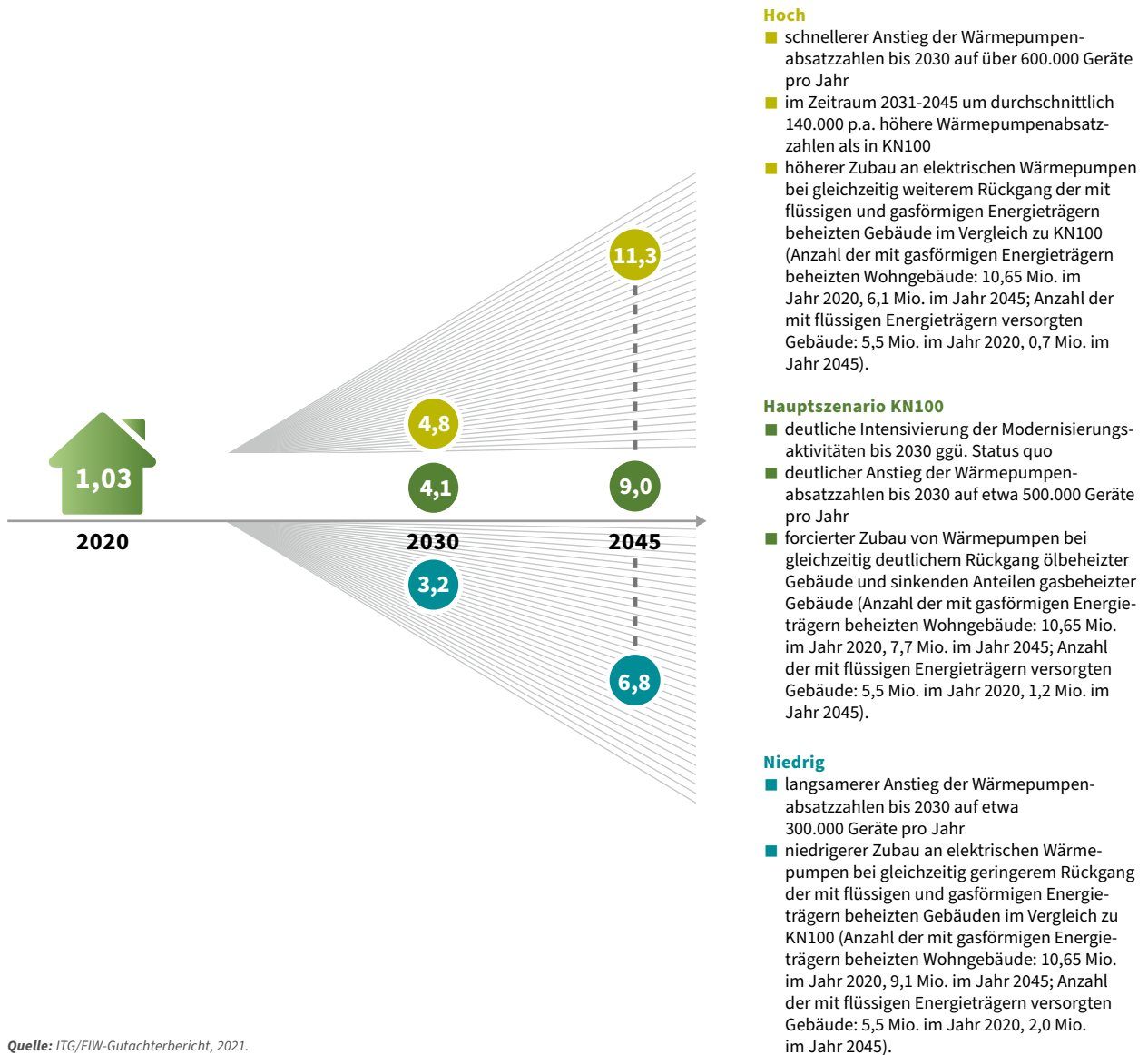
Anstieg der jährlich in Wohngebäuden installierten Wärmepumpen von 120.000 Geräten in 2020 auf 495.000 in 2030. Daraus resultiert in Wohngebäuden ein Bestand von gut 4 Millionen Wärmepumpen

in 2030 und 9 Millionen Wärmepumpen in 2045, wovon etwa 76 Prozent Luft-Wasser- und 18 Prozent Erdreich-Wasser-Wärmepumpen darstellen. Bei den restlichen Wärmepumpen handelt

es sich um Hybridgeräte, die im Gesamtsystem zur Verbesserung des Lastmanagements und zur Entlastung der zentralen Stromversorgung im Verteilnetz beitragen sowie die Spitzenlastdeckung an kalten Tagen gewährleisten können. Betrachtet man zusätzlich Nichtwohngebäude, wird 2030 für den gesamten Gebäudebestand eine Anzahl von rund 4,5 Millionen Wärmepumpen abgeschätzt, die dann bis 2045 auf rund 9,9 Millionen Wärmepumpen ansteigt. Wärmepumpen in Nichtwohngebäuden würden dann einen Anteil von rund 10 Prozent am Wärmepumpenbestand ausmachen. Nichtwohngebäude sind aufgrund der begrenzten Datenlage allerdings nicht Teil der detaillierten Modellierung des Anlagenparks.

Abb. 6.4 Indikator „Elektrische Wärmepumpen (in Wohngebäuden)“

Angaben in Millionen



In den „Molecules“-Pfadausprägungen wird ein größerer Anteil des Endenergiebedarfs durch flüssige und gasförmige Energieträger gedeckt, wodurch sich ein weniger starker Ausbau der elektrischen Wärmepumpen als in KN100 ergibt. Aus dem Anstieg der jährlichen Absatzzahlen auf etwa 300.000 Geräte in 2030 resultiert ein Bestand von gut 3 Millionen Wärmepumpen in 2030 und rund 7 Millionen in 2045 in Wohngebäuden. Der Anlagenpark der Nichtwohngebäude wird in den Pfadausprägungen nicht berücksichtigt. Auf Basis von qualifizierten Schätzungen kann für das Jahr 2045 ein Gesamtbestand von rund 7,5 Millionen Wärmepumpen (Wohn- und Nichtwohngebäude) in den „Molecules“-Pfadausprägungen angenommen werden (2030: 3,6 Millionen Wärmepumpen). Umgedreht verhält es sich mit den „Electrons“-Pfadausprägungen, in welchen eine stärkere Versorgung mit Strom und geringere Anteile flüssiger und gasförmiger Energieträger gegenüber KN100 betrachtet werden. Durch einen schnelleren Anstieg der jährlichen Absatzzahlen auf über 600.000 Geräte in 2030 ergibt sich ein Bestand von knapp 5 Millionen Wärmepumpen in 2030 und mehr als 11 Millionen in 2045. Bei einer zusätzlichen Abschätzung für Nichtwohngebäude ließen sich in den „Electrons“-Pfadausprägungen für 2030 rund 5,3 Millionen und für 2045 rund 12,4 Millionen Wärmepumpen prognostizieren.

Die Umrüstung des bestehenden Anlagenparks muss neben dem erheblich größeren Anteil an Wärmepumpen auch durch einen intensivierten Ersatz von Altanlagen durch effizientere Neugeräte erfolgen, denn mit dem beschleunigten Austausch von

besonders ineffizienten Altanlagen lassen sich kurzfristig erhebliche Endenergie- und THG-Einsparpotenziale auf wirtschaftliche Weise erschließen. Dabei muss sichergestellt werden, dass keine Lock-in-Effekte die langfristigen Klimaziele gefährden, etwa indem Geräte installiert würden, die den systemtechnischen Anforderungen des transformierten Energiesystems nicht entsprechen und somit wiederum vorzeitige vermeidbare Ersatzinvestitionen erfordern würden.

Nicht-strombasierte neue Heizsysteme (z. B. Brennwertgeräte, Brennstoffzellen, Mini-BHKWs) sollten daher ab dem Stichjahr 2025 „H₂-ready“ sein. Durch Weiterentwicklung bestehender

Neue Heizsysteme müssen „H₂-ready“ sein, um Lock-in-Effekte zu vermeiden.

Technologien und die damit einhergehende Steigerung der Anlageneffizienz können dabei zusätzliche Einsparpotenziale erschlossen werden. Damit diese Investitionen keinen

Lock-in darstellen, ist in jedem Fall die Verfügbarkeit von Powerfuels im angenommenen Zeitrahmen weitere wichtige Voraussetzung.

Für die Sicherstellung der Anlageneffizienz ist ein optimaler Betrieb der Anlage zu gewährleisten und sichtbar zu machen. Hierfür ist ein verstärkter Ausbau von Digitalisierung und Gebäudeautomation erforderlich, wobei für die Systemoptimierung auch die Interoperabilität und Datennutzung verbessert werden müssen.

6.3 Einsatz erneuerbarer Energien und klimaneutraler Energieträger

Flüssige und gasförmige Energieträger spielen im Gebäudebereich aktuell eine dominierende Rolle, basieren gegenwärtig jedoch zum Großteil auf fossilen Brennstoffen wie Erdgas und Heizöl. Der Ersatz dieser fossilen durch klimaneutrale Energieträger (biogener Herkunft oder erzeugt mit erneuerbarem Strom) kann mittel- und langfristig zu THG-Einsparungen führen.¹ Durch die Förderung des Ausbaus von Erzeugungskapazitäten ist unter Einbeziehung internationaler Märkte ein Markthochlauf für Powerfuels anzureizen.

Um die Verfügbarkeit von erneuerbaren Energieträgern für den Einsatz im Wärmesektor sicherzustellen, ist bei netzgebundenen Energieträgern ein entsprechender Netzausbau und -umbau erforderlich, bei flüssigen Energieträgern kann die vorhandene Infrastruktur weiter genutzt werden. Die Umstellung der Systeme muss dabei von einer möglichst breiten Kommunikation begleitet werden, um Akzeptanz zu schaffen. Wichtig ist gleichzeitig, in den nächsten Jahren begleitend zu monitoren, wie sich die Marktlage für diese Energieträger im Gebäudesektor hinsichtlich Verfügbarkeiten, Mengen und Kosten entwickelt, um rechtzeitig flankierende Maßnahmen einleiten zu können und letztendlich Lock-in-Effekte mit Blick auf die Zielerreichung zu vermeiden.

¹ Der Nationale Wasserstoffrat lässt eine Bottom-Up-Studie zu den Dekarbonisierungsoptionen im Wärmemarkt erstellen. Die Rolle grüner Gase im Wärmemarkt wird hierbei ebenfalls untersucht. Die Empfehlungen sollen der Bundesregierung voraussichtlich bis Anfang 2022 vorgelegt werden.

In den modellierten Szenarien werden die verbleibenden Öl- und Gasheizungen zunehmend durch klimaneutrale synthetische und biogene Energieträger versorgt, wobei gleichzeitig der Anteil von Wasserstoff im Versorgungsnetz ansteigt. Perspektivisch werden auch reine Wasserstoffnetze entstehen.

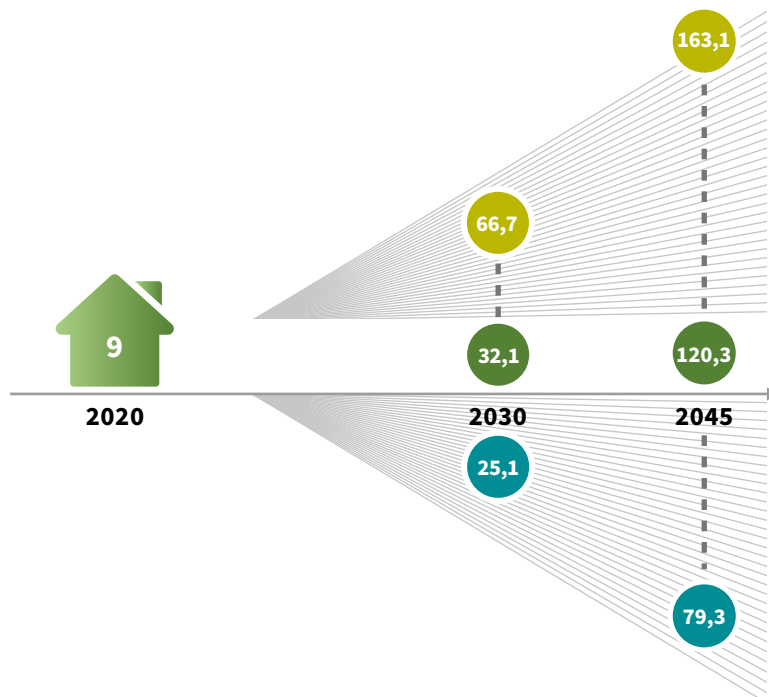
Für die Zielerreichung bis 2030 ergibt sich für das modellierte Hauptszenario KN100 im Gesamtsystem ein Bedarf von insgesamt 32,1 TWh klimaneutralen gasförmigen und flüssigen Energieträgern, was einem Anteil von etwa 10 Prozent am Endenergieverbrauch dieser Brennstoffe entspricht. Dieser Bedarf wird zu einem Anteil von über 80 Prozent biogen gedeckt, es kommt jedoch auch Wasserstoff in den zulässigen Beimischungsgrenzen zum Einsatz. Heizungen für gasförmige und flüssige Energieträger, die auch in 2045 Teil der Wärmeversorgung sein werden, müssen dann fast ausschließlich mit klimaneutralen Brennstoffen versorgt werden, woraus in KN100 ein Bedarf von insgesamt 120,3 TWh im Jahr 2045 resultiert.

Der restliche Bedarf von etwa 11 TWh gasförmiger und flüssiger Energieträger könnte aufgrund der Senkenleistung anderer Sektoren weiterhin mit fossilen Brennstoffen wie Erdgas gedeckt werden. Ab dem Jahr 2050 wird der Bedarf dann spätestens vollständig mit klimaneutralen Brennstoffen gedeckt.

Der geringste Bedarf an klimaneutralen flüssigen und gasförmigen Energieträgern ergibt sich in der Pfadausprägung „Efficient Electrons“. Da hier gegenüber KN100 verstärkt der Wärmeschutz im Gebäudebestand sowie ein forcierter Zubau von elektrischen Wärmepumpen betrachtet wird, sind im Jahr 2030 25,1 TWh und in 2045 79,3 TWh klimaneutrale Energieträger für die Zielerreichung im Gesamtsystem erforderlich. In der „More Molecules“-Ausprägung ergibt sich aufgrund der weniger starken Sanierungsaktivitäten ein erhöhter Heizwärmebedarf gegenüber KN100, der zu einem größeren Anteil durch klimaneutrale flüssige und gasförmige Energieträger gedeckt wird. Im Jahr 2030 liegt der Bedarf hier bei 66,7 TWh und in 2045 bei 163,1 TWh.

Abb. 6.5 Indikator „Klimaneutrale Energieträger“ (biogen + synthetisch)

Angaben in TWh



Hoch

- Höhere Anteile von Gas- und Ölheizungen sowie die geringere Sanierungsrate führen zu höheren Nachfragen nach gasförmigen und flüssigen Energieträgern.
- Zur Sektorzielerreichung 2030 wird über die Hälfte der Heizöl-Nachfrage synthetisch gedeckt. Zusätzlich wird Wasserstoff im Rahmen einer Beimischung ins Erdgasnetz bereitgestellt.
- In 2045 werden signifikante Mengen Wasserstoff sowie kleinere Mengen synthetisches Methan und Biomethan eingesetzt. Eine Restnachfrage nach Erdgas bleibt jedoch bestehen. Die Nachfrage nach Ölen wird vollständig synthetisch gedeckt.

Hauptszenario KN100

- In 2030 wird die Nachfrage nach klimaneutralen Gasen schwerpunktmäßig durch den Einsatz von Biomethan gedeckt. Im Rahmen der zulässigen Beimischungsgrenzen kommt zu geringeren Anteilen auch Wasserstoff zum Einsatz.
- In 2045 wird die gesamte Heizölnachfrage synthetisch und biogen gedeckt. Es werden signifikante Mengen an Wasserstoff sowie zusätzlich Biomethan eingesetzt, allerdings verbleiben ca. 11 TWh fossiles Erdgas im System.

Niedrig

- Durch die höhere Sanierungsrate und die stärkere Elektrifizierung sinken die Nachfragen nach Ölen und Gasen.
- In 2030 kann der Gebäudesektor sein Sektorziel übererfüllen, u. a. weil – wie in KN100 – auch Biomethan eingesetzt wird und gleichzeitig die niedrigeren Verbräuche von Gasen und Ölen zu weniger Emissionen führen. Es erfolgt eine Wasserstoffbeimischung in Höhe der zulässigen Grenzwerte.
- In 2045 werden Wasserstoff, Biomethan und geringe Mengen Erdgas eingesetzt. Die verbleibende Ölnachfrage wird vollständig biogen und synthetisch gedeckt.

Quelle: ITG/FIW-Gutachterbericht, 2021.

Besonders in urbanen Zentren kann Fernwärme zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung beitragen. Entsprechend den lokalen Gegebenheiten sind hierfür ein Mix verschiedener Erzeugungstechnologien sowie die Einbindung erneuerbarer Energien und klimaneutraler Energieträger notwendig und sinnvoll, u. a. aus Geothermie, thermischer Abfallbehandlung, Biomasse, Großwärmepumpen oder auch Wasserstoffkraftwerken. Der größte Beitrag zur Wärmewende kann hierbei über bestehende Netze geleistet werden, wobei auch die Dekarbonisierung dieser Netze mit Herausforderungen verbunden ist. In neuen Quartierslösungen sind Wärmenetze ebenfalls entsprechend auszubauen.

Insgesamt sollten die Erzeugung und der Einsatz erneuerbarer Energien und klimaneutraler Energieträger effizient erfolgen und durch das Schaffen von systemischen Lösungen sollte die Sektorkopplung verstärkt gefördert werden. Effizienzpotenziale wie die verstärkte Abwärmenutzung aus Gewerbe und Industrie Prozessen (perspektivisch zum Beispiel auch von H₂-Elektrolyseuren) können so erschlossen und die Netze bei Engpässen entlastet werden.

> EXKURS

Grüne Fernwärme/Wärmenetze

Wärmenetze können durch die Einbindung erneuerbarer Wärme- sowie Abwärmequellen (vor allem aus Industrie und Abwasser) und mit ihrer hohen Flexibilität, die sich aus dem Einsatz von Speichern und der großen Bandbreite möglicher Erzeugungstechnologien ergibt, ihre Rolle als integraler und netzdienlicher Bestandteil im Energiesystem der Zukunft ausbauen. Der Schwerpunkt der Versorgung liegt in Ballungsgebieten und bei älteren Bestandsgebäuden und damit in Bereichen, die teilweise nur zögerlich energetisch saniert werden. Die größere Unabhängigkeit von den heterogenen Eigentümer- und Entscheidungsstrukturen im Gebäudesektor ermöglicht dabei eine schnellere Entscheidungsfindung gegenüber dezentralen Lösungen.

Durch die Dekarbonisierung eines Fernwärmenetzes kann unmittelbar und ohne Verzögerung eine klimaneutrale Versorgung der angeschlossenen Gebäude erfolgen, ohne dass in den Gebäuden Investitionen erforderlich sind. Insbesondere auch dort, wo sich bestehende Nachfragestrukturen verändern und entsprechende Infrastruktur bereits vorhanden ist, ergeben sich Potenziale für den Anschluss neuer Kunden an grüner werdende Fernwärmenetze. Skalierungseffekte und ein professioneller Anlagenbetrieb können dabei für Effizienz- und damit auch wirtschaftliche Vorteile sorgen.

Zu beachten ist allerdings, dass steigende Effizienzniveaus der Gebäude eine Herausforderung für den wirtschaftlichen Betrieb darstellen können, insbesondere auch für den weiteren Aufbau neuer Wärmenetze. Auch lange Planungs- und Realisierungszeiten müssen in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden.

Die Förderung effizienter strombasierter Lösungen wie Großwärmepumpen und ein Level-Playing-Field für relevante Technologien würden die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung wesentlich unterstützen. Gleiches gilt für Anreize für eine kommunale Planung grüner Fernwärme sowie Fördermittel für den Umbau bestehender Wärmenetze. Die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) ist von ihrer Struktur her sehr gut dafür geeignet, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten und bestehende Hemmnisse abzubauen. Jedoch muss die Förderung in ausreichender Höhe und Zuverlässigkeit bereitgestellt werden, um den Netzbetreibern die notwendigen Investitionen zu ermöglichen.

6.4 Nutzerverhalten und Akzeptanzfragen

Der energieeffiziente Betrieb von Gebäuden ist stark vom Verhalten der Nutzerinnen und Nutzer abhängig. Durch angepasstes Nutzerverhalten kann die Nachfrage nach Wärme/Kälte und Strom reduziert und ein effizienter Anlagenbetrieb ermöglicht werden. Zur Vorbeugung von Rebound-Effekten, die sich in sehr effizienten Gebäuden (Bestand oder Neubau) deutlicher auswirken, stellt die verstärkte Nutzung von digitalen Technologien (Smart Energy) eine Chance dar.

Insgesamt muss die Akzeptanz für Sanierungsmaßnahmen gesteigert werden. Information und Kommunikation spielen hier eine wichtige Rolle: Eine aufsuchende persönliche Beratung und die Erstellung eines individuellen Sanierungsfahrplans können dabei helfen, für das Thema zu sensibilisieren, Vorteile einer Sanierung aufzuzeigen und die ersten organisatorischen Hürden zu überwinden. Eine Begleitung des Sanierungsprozesses über die Planungsphase hinaus aus einer Hand kann ebenfalls ein Erfolgsfaktor sein.

Auch im Mietsegment sind akzeptanzsteigernde Maßnahmen notwendig. Durch zielgruppenspezifische Kommunikation zu Komfortgewinnen und anderen positiven Aspekten einer energetischen Sanierung könnten auch hier Hemmnisse überwunden und hierdurch ein Beitrag zur Steigerung der Sanierungsrate geleistet werden. Dort, wo ältere Menschen in ihren bestehenden Wohnungen bleiben, ist in der Regel eine altersgerechte Modernisierung notwendig. Auch sie kann Anlass für eine energetische Sanierung sein. Wegen erheblicher Aufwände, hoher Kosten und langer Amortisationszeiten unterbleibt diese jedoch häufig. Auch diese Potenziale könnten durch verbesserte Beratungs-, Förder- und Unterstützungsinstrumente in Zukunft stärker gehoben werden.

Auch die Wohnfläche hat einen entscheidenden Einfluss auf den Endenergiebedarf und den Ressourcenverbrauch. Mittel- bis langfristig kann es ein Ansatz sein, die Neubauaktivitäten abzusenken und die Abrissraten energetisch schlechter Gebäude zu erhöhen. Durch den verstärkten Abriss alter Bestandsgebäude und eine nachhaltige Neubaustrategie kann der Endenergiebedarf reduziert werden. Ersatzneubau kann für besonders ineffiziente Bestandsbauten eine Option sein, die auch bei Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus sinnvoll ist. Mit einer mittel- und langfristigen Absenkung der Neubauaktivitäten auf Basis gesellschaftlicher und demografischer Entwicklungen ginge insgesamt ein weniger starker Anstieg der Wohnfläche pro Einwohner einher, was sich positiv auf die Entwicklung des Endenergiebedarfs auswirken würde. Hierfür muss Akzeptanz in der Bevölkerung geschaffen werden. Um Wohnfläche besser bedarfsgerecht zu nutzen, muss eine stärkere Flexibilität für den Wechsel von Wohnangeboten geschaffen und unterstützt werden.

Impulse aus dem Querschnittsmodul Transformation

Auf kommunaler Ebene sollten alternative Konzepte wie gemeinschaftliche Wohnprojekte und Mehrgenerationen-Wohnungen, ein ganzheitliches Umzugsmanagement (insbesondere in und zwischen kommunalen Wohnungsgesellschaften und Wohnungsgenossenschaften), die bauliche Teilung von Ein- und Zweifamilienhäusern (zur Abtrennung einer abgeschlossenen Wohnung oder Einliegerwohnung) und die soziale Wohnraumvermittlung (Mobilisierung von leerstehendem Wohnraum bei gleichzeitiger Begleitung der vermietungswilligen Eigentümerinnen und Eigentümer mit Mietgarantien und Renovierungszuschüssen) sowie die Nutzung und Sanierung von Leerstand angereizt werden.

Die Umnutzung von Gebäuden sollte erleichtert und Konzepte zur flexiblen Nutzung von Wohnräumen und Gewerbeflächen sollten unterstützt werden. Ebenso sollte der (generationenübergreifende) Wohnungstausch durch die Wohnungsgesellschaften unterstützt werden. Kommunen müssen finanziell befähigt werden und Klimaschutz sollte zentrale Aufmerksamkeit innerhalb der kommunalen Aufgabe erhalten.

Die Kommunen sollten die bestehenden Elemente der Bauleitplanung nutzen, um im Sinne der Klimaneutralität eine bedarfsgerechte und flächeneffiziente Baulandentwicklung umzusetzen. Diese muss die Bedürfnisse einer alternden und sich individualisierenden Gesellschaft mit schrumpfenden Haushaltsgrößen bedienen. Gleichzeitig sind Anpassungen und gegebenenfalls auch neue Instrumente notwendig, um die Siedlungsentwicklung in Richtung Klimaneutralität zu gewährleisten. Den Kommunen als handelndem Akteur muss es ermöglicht werden, die flexiblere Umnutzung von Flächen (wie zum Beispiel industriellen Brachflächen) voranzutreiben, um mit der Dynamik sich ständig entwickelnder Städte mitzuhalten. Entsprechende Daten liegen oft bereits vor, sie müssen aber auch durch die Kommunen genutzt werden. Leerstandskataster in Obliegenheit der Stadtentwicklung können dabei helfen, Verdichtungspotenziale gezielt zu erfassen und Leerstand abzubauen. Zweckentfremdungssatzungen können dazu beitragen, der Verknappung von Wohnraum und dem daraus resultierenden Druck auf die Erschließung neuer Flächen entgegenzuwirken. Flächenmortalitäten können gerade in schrumpfenden Städten den weiteren Zubau unterstützend verlangsamen.

➤ BRANCHENBLICK

Handwerk: Herausforderungen, Hemmnisse, Perspektiven

Aktuelle Situation

In den letzten zehn Jahren ist es den in den Bau-, Ausbau- und anlagentechnischen Gewerken tätigen Handwerksbetrieben gelungen, die Zahl ihrer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf insgesamt über zwei Millionen zu steigern.² Aufgrund der sehr guten Auftragslage infolge erhöhter Sanierungsaktivitäten, einer höheren Neubaurate sowie neuer Geschäftsfelder im Rahmen der Energiewende nimmt der Fachkräftebedarf jedoch weiter zu.

Vor dem coronabedingten Konjunktureinbruch meldeten bereits vier von zehn Handwerksbetrieben Probleme bei der Besetzung offener Stellen, unter den Bauhauptgewerken tat dies sogar jeder zweite Betrieb.³ Hinzu kommt, dass ein hoher Anteil von Fachkräften und Inhabern demografiebedingt in den nächsten fünf Jahren aus dem Arbeitsleben ausscheidet. So sind nach ZDH-Schätzungen in den kommenden fünf Jahren bis zu 125.000 Betriebsübergaben zu erwarten.⁴

Perspektiven

Die Herausforderung der Betriebsübergabe wird das Handwerk in den nächsten Jahren beschäftigen. Um die damit einhergehenden Herausforderungen anzugehen, fördert das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie die Initiative „Unternehmensnachfolge – aus der Praxis für die Praxis“. Im Rahmen der Initiative werden zahlreiche Vorhaben der Handwerksorganisationen erprobt, die neue Wege der Ansprache und Unterstützung der Zielgruppen, die für eine Übernahme in Betracht kommen können, adressieren. Zu den Aktivitäten der Initiative zählen zum Beispiel die Einrichtung von Nachfolgelotsen, Meisterclubs oder Unternehmer-Akademien.

Die kontinuierliche Gewinnung und Bindung der Fachkräfte ist mit Blick auf den demographischen Wandel eine weitere zentrale Aufgabe des Handwerks. Hierzu tragen Rahmenbedingungen wie marktgerechte Entlohnung sowie Entwicklungsperspektiven, u. a. im Rahmen von Qualifizierungsmaßnahmen, bei. Die Sicherstellung von hohen Standards bei der Qualifizierung und Ausbildung sind essenziell, um im Gebäudesektor die energetische Sanierung in einem begrenzten Zeitrahmen und mit hoher Priorität umsetzen zu können.

Mit Blick auf sich verändernde Arbeitsmärkte sollte zudem stärker berücksichtigt werden, inwiefern Arbeitskräfte aus anderen Sektoren, die angesichts ihrer vorangegangenen beruflichen Ausbildung gut im Gebäudebereich tätig sein könnten, mittel- und langfristig auch dort eine gute Perspektive finden können.

Im Zusammenhang mit der Ausbildung von Handwerkern ist vor dem Hintergrund des Akademisierungstrends der vergangenen Jahre die berufliche Bildung auf Augenhöhe mit der akademischen Bildung zu stärken.

² Bundesamt für Statistik, 2018.

³ Zentralverband des deutschen Handwerks (ZDH), 2019.

⁴ Zentralverband des deutschen Handwerks (ZDH), 2021.

> BRANCHENBLICK

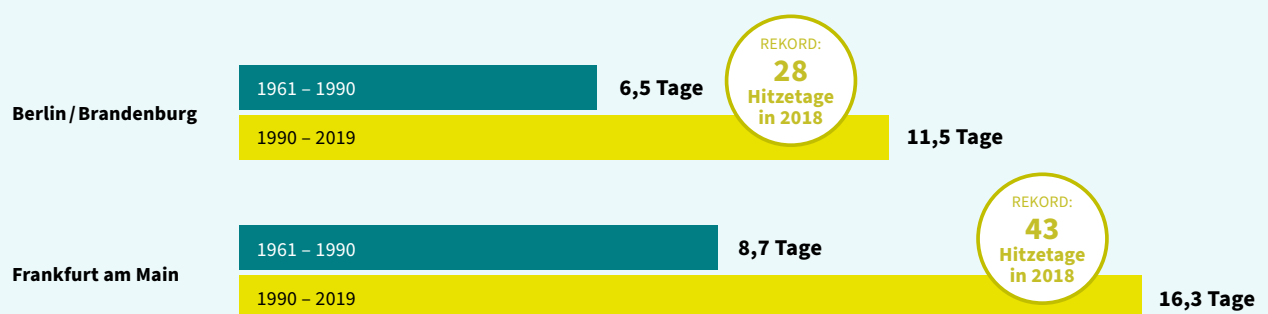
Gebäudehülle: Raumklimatisierung im Klimawandel – „Efficiency first“ beim Wärmeschutz

Der Klimawandel schreitet bereits jetzt voran: Nicht nur die Durchschnittstemperaturen steigen, auch Hitzeperioden werden häufiger und intensiver und halten länger an. Klimaauswertungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zeigen: Die durchschnittliche Anzahl der heißen Tage hat sich in den letzten 20 Jahren fast verdoppelt, 2018 wurde in mehreren Regionen eine Rekordanzahl an Hitzetagen registriert. Die belastbaren 10-Jahres-Prognosen des DWD lassen davon ausgehen, dass dieser Trend sich fortsetzen wird. Mit einiger Sicherheit wird daher – neben der Vermeidung von Wärmeverlusten und der Gewinnung von Wärme im Winter – das Thema Hitzeschutz künftig eine wichtige Rolle in der Planung und Nutzung von Gebäuden spielen.

Bereits seit einigen Jahren ist zu beobachten, dass Verbraucherinnen und Verbraucher auf die steigenden Temperaturen und die häufigeren und längeren Hitzeperioden mit dem Erwerb von strombetriebenen Kühlgeräten und Klimaanlage reagieren. Die internationale Energieagentur (IEA) hat 2018 zusammen mit der OECD berechnet, dass der weltweite Energiebedarf für Gebäudekühlung bis 2050 voraussichtlich 6.200 TWh betragen wird, wobei fast 70 Prozent des Anstiegs auf den Wohnsektor entfallen werden.⁵ Zur Vermeidung bzw. Begrenzung dieser Problematik gibt es verschiedene Lösungsstrategien, die bei Sanierungen und Neubauten Anwendung finden sollten.

Abb. 6.6 Entwicklung der heißen Tage

Durchschnittliche Anzahl der Tage mit mindestens 30 Grad Celsius pro Jahr



Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD), 2020.

⁵ International Energy Agency (IEA), 2018.

Efficiency first: baulicher sommerlicher Wärmeschutz und dynamische Gebäudehüllen

Nach dem Prinzip „Efficiency first“ sollte die Vermeidung des Verbrauchs von Kühlungsenergie durch bauliche Lösungen bei Neubau und Sanierung Priorität haben.

Für die ganzheitliche Planung des sommerlichen Wärmeschutzes sind folgende Punkte zu beachten:

- **Optimierung der Fensterflächen nach Größe und Orientierung:** Hierbei muss auf die Wechselwirkung von solaren Energieeinträgen, Tageslichtversorgung und sommerlicher Überhitzung besondere Aufmerksamkeit gelegt werden.
- **Optimierung des Sonnenschutzes (außenliegend vor innenliegend):** Eine zusätzliche Effizienzsteigerung kann durch die Integration von Sonnenschutz und Fenstern in ein Smart-Building-System erreicht werden. Es steuert wetter- und strahlungsabhängig das Öffnen und Schließen der Fenster und die Anwendung des Sonnenschutzes.⁶
- **Optimierung der Bauweise:** In vielen Fällen kann auf die aktive Kühlung sogar verzichtet werden. Eine schwere Innenbauweise hilft dabei, dass Gebäude mit viel Speichermasse sich im Zusammenspiel mit einer Nachtlüftung selbst regulieren können. Bei Bedarf kann eine passive Kühlung unterstützen.
- **Optimierung durch Nachtlüftung, ggf. mit mechanischer Unterstützung:** Dynamische Gebäudehüllen, die Fenster und Sonnenschutz automatisiert integrieren, bringen auch im zukünftigen Klima mit intensiveren Hitzeperioden positive Effekte und werden mit fortschreitendem Klimawandel bedeutungsvoller. Vor diesem Hintergrund ist es von zentraler Bedeutung, dass bei Planungsprozessen baldmöglichst anstelle von Klimadaten aus der Vergangenheit plausible Zukunftsdaten herangezogen werden.

Anlagentechnische Kühlungsalternativen

Ergänzend zu baulichen Lösungen kommen weiterhin anlagentechnische Lösungen in Betracht, um verbleibende Kühlungsbedarfe – insbesondere in Nichtwohngebäuden – zu decken. Reversible Wärmepumpen können nicht nur Wärme außerhalb des Gebäudes gewinnen und hineinleiten, sondern ebenso dem Innenraum Wärme entziehen. Werden klassische Klimaanlage eingesetzt, sollte die von ihnen benötigte Energie aus regenerativen Quellen stammen.

Fazit

Der bereits heute eingetretene und weiterhin zu erwartende Klimawandel macht es erforderlich, bei Sanierungen und Neubauten nicht nur winterliche Wärmeverluste zu vermeiden, sondern auch Überhitzungsschutz im Sommer zu realisieren. Dies sollte mit Blick auf das „Efficiency first“-Prinzip vorrangig durch die Optimierung einer speicherfähigen Bauweise in Kombination mit automatisierten Fenstern und Sonnenschutz geschehen, um den Energieaufwand für Klimatisierung zu vermeiden bzw. zu minimieren.⁷

⁶ Eine Studie des Ingenieurbüro Hauser zeigt, dass außenliegender Sonnenschutz an Hochsommertagen die Innenraumtemperatur um zehn Grad im Vergleich zu Räumen ohne Sonnenschutz senken kann. In vielen Fällen kann auf die mechanische Kühlung sogar verzichtet werden, vor allem wenn eine Kombination von innen- und außenliegendem Sonnenschutz eingesetzt wird. Auch die durch Automation voll nutzbare Nachtauskühlung kann das Aufheizen.

⁷ Industrievereinigung Rollladen-Sonnenschutz-Automation (IVRSA), 2018; Industrievereinigung Rollladen-Sonnenschutz-Automation (IVRSA), 2019; Pesch, R. et al., 2019.

> EXKURS

Das Quartier als Klimaschutz-Vorranggebiet

Das Quartier bietet enorme Chancen in der Transformation zu Klimaneutralität. So können lokale Potenziale ausgeschöpft werden und das Wissen vor Ort optimal genutzt werden. Energiesysteme können so entgegen der typischen Top-down-Betrachtung auch Bottom-up geplant und gedacht werden. Deshalb ist die Etablierung der Quartiersebene als lokales Klimaschutz-Vorranggebiet unabdinglich.

Synergien und Skaleneffekte im Quartier

Das Quartier ermöglicht Synergieeffekte, die durch Verknüpfung zwischen beispielsweise Bautypologien, Nutzungssektoren oder Akteuren entstehen. Die gemeinschaftliche Nutzung von Energieinfrastrukturen von Wohnen, GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) und Industrie kann so die unterschiedlichen Lastprofile zusammenbringen und Versorgungssysteme effizienter auslegen. Wärmenetze spielen hier eine zentrale Rolle, um zeitlich variable Quellen und Senken effizient miteinander zu verknüpfen. Skaleneffekte ergeben sich durch geringere Planungskosten bei ähnlichen baulichen Voraussetzungen sowie gemeinschaftlichem Einkauf von Planungs- und Baudienstleistungen. Auch multimodale Energiesysteme mit Speichern, Sektorenkopplung und DSM-Technologien (Demand Side Management) sind bei ausreichender Größe erst wirtschaftlich bzw. realisierbar, was weitere Emissionsminderungen ermöglicht.

Netzdienlichkeit für das optimierte Gesamtsystem

Sektorenkopplung und leitungsgebundene Wärme sind zentral für eine klimaneutrale Wärmeversorgung. Durch das Zusammentreffen verschiedener Bedarfe aus Heiz-, Kühl-, Strom- und Mobilitätsanwendungen sowie aus unterschiedlichen Wirtschaftszweigen mit entsprechenden Energieanwendungen lassen sich im Quartier Sektoren kosteneffizient und effektiv koppeln. Dadurch können Systemdienstleistungen angeboten werden, wobei die verbrauchsnahe Energiewandlung, -speicherung und -verteilung zudem den Ausbaubedarf in vorgelagerten Netzen reduzieren und volkswirtschaftlich optimieren kann.

Quartier als Plattform für Aggregatoren und neue Geschäftsmodelle

Langfristig kann das Quartier als eine Plattform für neue Produkte und Dienstleistungen etabliert werden. Aggregatoren können die Synergien der unterschiedlichen Sektoren durch neue Geschäftsmodelle zusammenführen und einen wirtschaftlichen Mehrwert für alle Beteiligten anbieten. Diese neuen Märkte entfalten die wirtschaftliche Dynamik für Innovation, die maximierte Nutzung von klimaneutralen Energiepotenzialen sowie Systemdienlichkeit.

Sanierungen und klimaneutrale Energieversorgungslösungen im Quartier sind ein Schlüssel auf dem Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand. Durch die räumliche Nähe zu den Verbrauchssektoren ist das Quartier ein idealer Standort für erneuerbare Erzeugungskapazitäten. Unterschiedliche Potenziale vor Ort ermöglichen die Nutzung von Solarenergie, Biomasse, Geothermie, Abwasserwärme oder industrieller Abwärme. Mit regelbaren multimodalen Versorgungskonzepten sind so auch Impulse in andere Energiesektoren bzw. vorgelagerte Infrastrukturen möglich. Bisher stehen dieser Anwendung noch deutliche regulatorische Hürden im Weg.

Hemmnisse und Lösungsvorschläge für die Quartiersebene

Uneinheitliche Zielstellung der Gesetzeswerke

Die wichtigsten Gesetze für das Quartier sind das Gebäudeenergiegesetz (GEG), das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) bzw. Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG), die unterschiedliche Regulierungsziele zugrunde legen. Während das GEG auf die „Senkung des Energiebedarfs mit Fokus auf Energieeffizienz“ abzielt, stehen im EnWG der „wettbewerbliche Zweck“ und im EEG bzw. KWKG vor allem „umweltbezogene Zwecke“ durch die Förderung klimafreundlicher Technologien im Vordergrund. Im Quartier sind erfolgreiche Energiekonzepte von allen diesen Gesetzen gleichermaßen abhängig und es zeigt sich die mangelnde Harmonisierung zwischen ihnen. Somit muss das Quartier allen unterschiedlichen Zielen gleichermaßen gerecht werden, wodurch seine Stärken nicht zur Geltung kommen, da sie nicht unbedingt Teil des Zielkanons sind. Verglichen mit den oben beschriebenen Potenzialen des Quartiers zeigt sich, dass keines der Gesetze, weder einzeln noch zusammen, auf eine maximierte Nutzung lokaler klimaneutraler Potenziale, geschweige denn das systemdienliche Zusammenspiel mit den vorgelagerten Infrastrukturen abzielt.

Gesetze im Hinblick auf das Regulierungsziel Klimaneutralität prüfen

Die Anforderungen aus dem KSG sowie das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 stellen neue Anforderungen an den historisch gewachsenen Gesetzeskanon. Ein genereller Neustart anstelle kleinteiliger Reformen ist daher unabdingbar für die Einhaltung der Klimaziele: Das GEG bedarf einer Anpassung hin zu einer klaren Stärkung der Zielvorgabe Klimawirksamkeit. Ziel muss die Weiterentwicklung des Primärenergiefaktors mit Einbeziehung von CO₂-Faktoren sein. Im EnWG ist der diskriminierungsfreie Zugang ein Planungsrisiko für die Entwicklung von Quartiersversorgungssystemen. Insbesondere die Kundenanlage nach EnWG §3 24 a – d ist nicht für die Errichtung von Quartierskonzepten konzipiert worden. Abhilfe würde die Etablierung einer lokalen Ebene zwischen Letztverbraucher und Gesamtsystem schaffen, die wiederum für Rechtssicherheit bei den Umsetzern sorgt. Das EEG bzw. das KWKG muss dahingehend vereinfacht werden, dass keine Komplexität durch eine kleinteilige Abgaben- und Umlagenpflicht für das Quartier entsteht, sondern Prozesse standardisiert und beschleunigt werden.

Unzureichende Definition des Quartiersbegriffs

Der räumliche Zusammenhang, auf dem der Quartiersbegriff in den meisten Regelwerken fußt, ist unterschiedlich und teilweise überhaupt nicht definiert. Aus Anwendersicht bestehen große Unterschiede zwischen dem Stromsteuergesetz (StromStG), dem GEG, dem EnWG sowie dem EEG bzw. KWKG im Hinblick auf diese Definition. Die Folge ist ein komplexes, intransparentes und aus Anwendersicht vor allem unattraktives Regelwerk, das nur wenig Anreize für eine Umsetzung von sektorübergreifenden Quartierskonzepten auf lokaler Ebene setzt. Auch das Potenzial für klimaneutrale Energieversorgung und Effizienzsteigerung wird im regulatorischen Quartiersbegriff komplett außer Acht gelassen, da das Quartier bisher auf Gesetzesebene eine Randerscheinung ist, dem enge Grenzen durch Zusatzanforderungen und Genehmigungsverfahren gesetzt sind.

Quartiersebene gesetzlich verankern, schärfen und harmonisieren

Es braucht dringend eine nachhaltige Verankerung des Quartiers als lokale Verbrauchs-, Erzeugungs- und Energiewandlungsebene und dies über die Sektoren hinweg. Neben einer Einheitlichkeit zwischen den Gesetzen selbst muss es vor allem aus Sicht der lokal agierenden Akteure zu Vereinfachungen in der Umsetzung kommen. In den zu definierenden Kriterien muss sich konkret der Nutzen der Quartiersebene wieder spiegeln. Um Quartierskonzepte in die Breite zu bringen, ist der Gesetzgeber gefordert, das Quartier bzw. den räumlichen Zusammenhang als Ebene zwischen Letztverbraucher und Gesamtsystem im GEG, EnWG und EEG bzw. KWKG zu etablieren, wie es in der wenig praxisnahen Regelung zur Kundenanlage bereits angedeutet ist.

Mangelnde Wirtschaftlichkeit und bürokratische Hürden

Während immer mehr Bundesländer Klimaschutzgesetze verabschieden und darin teilweise Gebote zur Installation von PV-Aufdachanlagen verankern, bestehen gleichzeitig kaum wirtschaftlich tragfähige Betreibermodelle für die Nutzung des daraus erzeugten PV-Stroms. Gerade im Quartier ist die Umsetzung der wirtschaftlich attraktiven Eigenversorgung in Form der Kundenanlage beispielsweise nur selten möglich. Komplexe, sektorübergreifende Akteursstrukturen sind meist ausgeschlossen. Ein Ansatz zur Etablierung wirtschaftlich tragfähiger Konzepte könnte beispielsweise sein, lokal erzeugten PV-Strom bei der Nutzung zur Wärmeerzeugung (u. a. Wärmepumpen) rechtlich als Wärmeenergie zu behandeln; die Gesteuungskosten wären damit als Betriebskosten umlegbar.

Zudem fehlt ein Gesamtkonzept für die klimaneutrale Energieversorgung im Quartier, wodurch die Zielerreichung beim Aufbau an erneuerbaren Erzeugungskapazitäten, der gesellschaftlichen Akzeptanz und der hocheffizienten Strom- bzw. Wärmeerzeugung gefährdet wird. Darüber hinaus erschweren komplexe und sich teilweise jährlich verändernde Meldeverfahren die Umsetzung dezentraler Stromversorgungskonzepte. Auch der Betrieb integrierter Quartiersenergiekonzepte bringt neue bürokratische Hürden mit sich, beispielsweise bei der Abrechnung und den dazugehörigen Messungen.

Wirtschaftlichkeit gewährleisten und bürokratische Hürden abbauen

Bei der Entwicklung und Umsetzung von Quartierskonzepten werden häufig Akteure aus verschiedenen Sektoren benötigt. Die geforderten Anpassungen von GEG, EnWG und EEG bzw. KWKG müssen in Quartieren den wirtschaftlichen Betrieb klimaneutraler Konzepte mit diversen, sektorübergreifenden Akteurskonstellationen ermöglichen und somit dem Zurückgreifen auf fossile Versorgungslösungen entgegenwirken. Hierzu sollte die Quartiersebene von Abgaben und Umlagen befreit und darüber hinaus ein Förderzuschlag bei Erfüllung der definierten Kriterien gewährt werden. Anfänglichen Mehrkosten und Vorleistungen einer Planung im Quartier sollten durch eine Anschubfinanzierung angereizt werden, sodass die Quartiersbetrachtung zum Standardfall wird. Klimaschutzmaßnahmen erhalten so einen ‚Booster‘, Projekte kommen

von der Einzelanwendung in die Breite. Für eine großflächige Entwicklung ist der Bund angehalten, die Expertise und Gestaltungskraft in Kommunen durch sowohl öffentliche als auch private Akteure zu nutzen und die Quartiersplanung bzw. Energieleit- und Wärmeplanung finanziell zu unterstützen. Auch Melde- und Abrechnungsverfahren sind zu vereinfachen und zu harmonisieren, sodass sie keine unnötige zeitliche und personelle Belastung darstellen.

Fehlende lokale Energieleitplanung

In Quartieren sind die Verantwortlichkeiten von den lokalen Gegebenheiten abhängig. Zusätzlich können sie sich im Laufe des Entwicklungsprozesses ändern. Die Folge sind unnötige Intransparenz und ungenutzte Potenziale durch ineffiziente Schnittstellen. Die kommunale Ebene mit ihrer bereits bestehenden Raum- und Energieplanung ist hier wichtig, da sie langfristige Konstanz und anhaltendes Interesse gewährleistet. Die Entwicklung von Hilfsmitteln und Ratgebern zur klimaneutralen Quartiersentwicklung wurde in den letzten Jahren durch private Akteure sowie durch Forschungsprogramme vorangetrieben. Ihre Anwendung in der Breite steht allerdings noch aus, um die bisher zentrale Energieplanung auf der lokalen Ebene zu ergänzen.

Kommunale Energieleitplanung etablieren

Frühzeitige Festlegungen der energetischen Zielsetzung sowie eine abgestimmte Planung der unterschiedlichen Infrastrukturen und der Stadtentwicklung sind unabdinglich, um Klimaziele zu erreichen. Auf kommunaler Ebene muss hier Energieleitplanung etabliert werden, um Planungssicherheit zu schaffen und Konstanz in die wechselnden Verantwortlichkeiten und Interessen im Quartier zu bringen. Für die Akteure im Quartier werden so wertvolle Ressourcen für die Szenarienplanung frei, die ansonsten kleinteilig in jedem Projekt neu erarbeitet werden müssten. Die zahlreichen bereits entwickelten (digitalen) Planungstools können hier Anwendung finden und optimale Versorgungslösungen unterstützen.

Immobilienwirtschaft: Klimaschutz sozialverträglich gestalten

Wohnungsunternehmen stehen bei der energetischen Modernisierung ihres Wohngebäudebestands vor besonderen Herausforderungen. Es geht darum, die ambitionierten Ziele des Klimaschutzes zu erreichen, bezahlbaren Wohnraum zu erhalten und zugleich die wirtschaftliche Umsetzung sicherzustellen. Die Wohnungswirtschaft steht daneben vor tiefgreifenden Veränderungen, die die Megatrends demografische Entwicklung, Migration und Integration sowie Digitalisierung betreffen. All dies gilt es zu bewältigen, ohne die Mieterinnen und Mieter oder die Wohnungsunternehmen zu überfordern.

Wohnungsunternehmen können Investitionen nur durchführen, wenn sie wirtschaftlich tragfähig sind. Andernfalls würden sie sich ihre finanzielle und damit wirtschaftliche Basis für eine langfristige Existenz entziehen. Dies steht im Spannungsfeld zur sozialverträglichen Umsetzung der notwendigen Investitionen, die aus der Miete und den verfügbaren Fördermitteln refinanziert werden müssen.

Aus wohnungswirtschaftlicher Sicht könnte für eine sozialverträgliche energetische Sanierung von Gebäuden neben der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) ein ergänzendes Förderkonzept zum Tragen kommen, welches diese Anliegen in besonderer Weise berücksichtigt. Ein solches Förderkonzept ließe sich zielgenau so justieren, dass Anreize für zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen insbesondere auf möglichst hohe CO₂-Einsparziele gesetzt werden können. Zugleich würden die Mieten für Haushalte mit mittleren und niedrigen Einkommen nach der Durchführung von energetischen Modernisierungsmaßnahmen an Wohngebäuden nur geringfügig steigen. Damit könnte eine annähernd warmmietenneutrale Sanierung ermöglicht werden, im Gegenzug für die Förderung dürfte für einen langen Zeitraum die Bestandsmiete dann nur in eingeschränktem Maße angehoben werden. Auf diese Weise könnten in kurzer Zeit in ganz Deutschland zukunftsfähige Wohnungsbestände geschaffen werden, die zu einem breiter werdenden Angebot und dauerhaft preisgünstiger Wohnungen beitragen.

Eine entscheidende Rolle spielt bei alledem das Zusammenwirken der Förderbedingungen durch die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) mit den gesetzlichen Anforderungen (Gebäudeenergiegesetz, GEG) und den Finanzierungsbedingungen (Taxonomie). Diese Regelungen entscheiden darüber, wie Gebäude zukünftig geplant oder saniert werden. Die Dringlichkeit eines klimaneutral zu versorgenden Gebäudebestands erfordert Energieeffizienz in der Breite, die den nachhaltigen Einsatz erneuerbarer Energien ermöglicht. Die vorhandenen Mittel (Eigenkapital, Fremdfinanzierung und Förderung) und Kapazitäten (Zeit, Personen und Material) müssen für eine schnelle und zielerreichende CO₂-Minderung optimal eingesetzt werden. Der optimale Einsatz der vorhandenen Mittel für Klimaneutralität erfordert einen angepassten Ansatz.

- **Erneuerbare Energien** sorgen für Klimaneutralität: konsequente Erschließung aller Quellen, PV auf Dächern vereinfachen, Quartierslösungen, konsequente Sektorenkopplung, Nutzung von Fernwärme und Strom.
- **Energieeffizienz** ermöglicht den nachhaltigen Einsatz erneuerbarer Energien: der „Zero Carbon-ready“-Standard könnte abhängig von der Art der Energieversorgung und deren Temperaturniveau ausgestaltet sein.
- **Gebäudeautomation und Smart Home** stellen Energieeffizienz sicher: konsequente Unterstützung über Betriebskostenverordnung, Datennutzung und Interoperabilität.

Kreislaufwirtschaft im Bausektor

Zahlen und Fakten

Der Bausektor hat erheblichen Einfluss auf den Rohstoffverbrauch in Deutschland und weltweit. Insbesondere für die Herstellung von mineralischen Baustoffen wie Zement und Beton werden große Mengen nicht-erneuerbarer Ressourcen eingesetzt und erhebliche Treibhausgasemissionen verursacht. In der EU sind schätzungsweise 5 bis 10 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs auf die Herstellung von Bauprodukten zurückzuführen und weltweit ist allein die Zementindustrie für 6 bis 7 Prozent der anthropogen verursachten CO₂-Emissionen verantwortlich. Auch das Abfallaufkommen ist maßgeblich durch mineralische Bauabfälle geprägt. Nach Angaben des „Verbund Kreislaufwirtschaft Bau“ fielen im Jahr 2018 ca. 89 Millionen Tonnen Bauschutt, Straßenabbruch und Baustellenabfälle an. Die durchschnittliche Verwertungsquote lag hier zwar bei 96,6 Prozent, die Verwendung der recycelten Bauabfälle fand jedoch hauptsächlich im Tief- und Straßenbau (Downcycling) statt. Eine hochwertige Wiederverwertung z. B. in der Asphalt- oder Betonherstellung erfolgt aktuell noch in unzureichendem Maße. Im langfristigen Durchschnitt zwischen 2006 und 2018 waren in Deutschland etwa 53 Prozent des gesamten Abfallaufkommens auf den Bausektor zurückzuführen, was die großen Einsparpotenziale durch die Erhöhung der Ressourceneffizienz in diesem Bereich deutlich macht.⁸

Graue Energie und Emissionen

Der Energiebedarf und damit einhergehende Emissionen für Herstellung, Transport, Lagerung, Rückbau und Entsorgung von Baumaterialien werden nach der gegenwärtigen Bilanzierungsmethodik nicht im Gebäudesektor ausgewiesen. Nach dem Quellprinzip werden beispielsweise Emissionen der Baustoffherstellung nach ihrem „Entstehungsort“ (also dem Ort, an dem die Treibhausgase physisch in die Atmosphäre entweichen) dem Industriesektor zugeordnet. Ausschlaggebend für die Energie- und Emissionsbilanz im Lebenszyklus von Gebäuden sind aber auch solche „grauen“ Energie- und Rohstoffbedarfe sowie Emissionen, die für die Errichtung und Instandhaltung der Gebäude bzw. die Entsorgung und/oder mögliche Wiederverwertung der Baustoffe erforderlich sind, aber in der THG-Bilanzierung in anderen Sektoren als dem Gebäudesektor

ausgewiesen werden. Grundsätzlich gilt: Je langlebiger und häufiger wiederverwendbar ein Baustoff ist, umso mehr Energie und Emissionen können eingespart werden. Die stoffliche Verwertung und Wiederverwendung in Form von Sekundärrohstoffen am Lebensende von Baustoffen ist hierbei in vielen Fällen ökologisch vorteilhaft und sollte demnach verstärkt durch Forschung und Förderung in der Praxis vorangetrieben werden.

Ressourcenschonendes und kreislauffähiges Bauen (Neubau und Sanierung)

Bei der Planung von Gebäuden sollte zur Erhöhung seiner langlebigen Nutzbarkeit auch eine spätere Umnutzung mitgedacht werden. Zur Vermeidung von grauer Energie und grauen Emissionen sollte auch eine Überdimensionierung von Konstruktionen grundsätzlich vermieden werden. Zudem sollten die Rückbaubarkeit der Gebäude sowie eine Kaskadennutzung und Zirkularität der Materialien schon bei der Planung mitgedacht werden. Hierfür sind konstruktive Prinzipien vorzuziehen, die einen unkomplizierten und sortenreinen Rückbau der Bauteile und Baustoffe ermöglichen und der Einsatz stoffschlüssiger Baustoffverbindungen vermieden werden. Bei nachwachsenden Bau- und Rohstoffen kann hierbei sogar zu einer CO₂-Senke erreicht werden.

Recycling und nachwachsende Rohstoffe

Re-use und Recycling von Baustoffen sowie der verstärkte Einsatz nachwachsender Rohstoffe sollten gestärkt werden, um den Energie- und Ressourcenverbrauch zu reduzieren und Kohlenstoffsinken zu schaffen. Dies sollte unterstützt werden durch standardisierte Bewertungsmethoden und digitale Kataster für „urbane Minen“ und Gebäude sowie durch eine entsprechende Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen, um die Nachfrage nach qualitätsgesicherten Sekundärrohstoffen zu stärken. Eine verbindliche Ausweisung des THG-Fußabdrucks von Baustoffen und Bauprodukten könnte als zusätzliches Entscheidungskriterium für Bauherren dienen.

⁸ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020a; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021a.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode



AUFGABE 29

Fördersystematik weiterentwickeln und richtungsweisende Impulse setzen

Förderprogramme auf das Ziel Klimaneutralität ausrichten

Die Fördersystematik orientiert sich derzeit noch nicht ausreichend an dem Ziel der Klimaneutralität und sollte zukünftig stärker an der Wirksamkeit bezüglich der THG-Reduzierung ausgerichtet werden. Die Zielkonformität sollte eine zentrale Maßgabe sein, um bestehende Förderprogramme zu evaluieren und gegebenenfalls nachzubessern sowie neue Förderprogramme aufzusetzen („Klimaneutralitäts-ready“). Dies bedeutet auch, die Wohnraum- und Städtebauförderung an zielverträgliche Energiestandards anzupassen.

Förderimpulse sollten Technologien und Maßnahmen berücksichtigen, die zur Zielerreichung beitragen und eine breitere Marktdurchdringung unterstützen. Hierzu zählen etwa die Sanierung der Gebäudehülle und der Einsatz effizienter Heizsysteme mit erneuerbaren Energien bzw. klimaneutralen Energieträgern (dezentral oder über leitungsgebundene Wärmeversorgung). Für die Versorgung mit erneuerbaren Energien ist Energieeffizienz zentral, diese Zusammenhänge sollten daher auch in der Förderpolitik berücksichtigt werden. Denkbar wäre hierbei ein Förderbonus für bestimmte Maßnahmenpakete, die gemeinsam bzw. aufbauend aufeinander umgesetzt werden. Beispielsweise könnte auch die kombinierte Installation von PV-Anlagen und die gleichzeitige Sanierung des Daches gefördert werden, um so doppelte Effekte zu erzielen. Hierfür wären zusätzliche Rahmenbedingungen für die Förderung und Qualitätssicherung erforderlich.

Insgesamt müssen aber auch einzelne geförderte Maßnahmen so ineinandergreifen, dass sie insgesamt zielkonform sind. Dies könnte durch begleitende individuelle Sanierungsfahrpläne (iSFP) sichergestellt werden. Im Rahmen der Machbarkeit für Eigentümerinnen und Eigentümer sollten die Maßnahmen auch sukzessive in Schritt-für-Schritt-Sanierungen umsetzbar sein.

Voraussetzung für eine auf Klimaneutralität ausgerichtete Fördersystematik ist eine konsistente Definition, wann Gebäude als klimaneutral eingestuft werden können. Diese Aufgabe sollte die Politik in Abstimmung mit Stakeholdern aus Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Wirtschaft so schnell wie möglich angehen.

Prinzip „Fördern & Fordern“ ermöglichen

Aktuell gilt, dass gesetzliche Standards im Gebäudebereich nicht zusätzlich gefördert werden können. Diese Entkopplung von Förderung und Ordnungsrecht sollte reflektiert werden. Denn für die weitgehende Transformation zur Erreichung der Klimaziele sind seitens der Eigentümerinnen und Eigentümer häufig große Investitionen notwendig, vor allem auch im Falle einer Verschärfung der ordnungsrechtlichen Anforderungen in Neubau und Sanierung. Aufgrund der diversen Eigentümergruppen im Gebäudesektor und der unterschiedlichen Ausstattung mit finanziellen Ressourcen sollten ausgewählte ordnungsrechtlich geforderte Maßnahmen auch angemessen finanziell unterstützt werden können, insofern diese ohne Förderung nicht wirtschaftlich umsetzbar sind. Dies kann der Akzeptanz für den Transformationsprozess im Gebäudesektor dienen.

Bestehende effektive Förderung sichern und verstetigen

Bestehende Förderprogramme, die effektiv auf die Erreichung der Klimaziele einzahlen, sollten im Bundeshaushalt nachhaltig gesichert und verstetigt werden. Seit der Aufstockung der Förderprogramme von KfW und BAFA in 2020 ist eine steigende Anzahl von Förderanträgen zu verzeichnen. Die Effektivität der neu strukturierten und in der BEG zusammengefassten KfW- und BAFA-Förderprogramme sollte somit weiterhin genutzt und die Mittel für die Förderung sollten langfristig verstetigt werden.

Wichtig ist eine enge Verzahnung und Abstimmung von Förderprogrammen, sodass es nicht zu einer vermeidbaren Überbelastung der staatlichen Haushalte kommt. Entscheidendes Kriterium hierbei ist neben der Effektivität die Effizienz der Förderung, die fortan regelmäßig überprüft werden sollte. Gleichzeitig sollte die Finanzierung langfristig gesichert werden, um für investierende Privatpersonen sowie Unternehmen Planungs- und Investitionssicherheit zu gewährleisten.

Weiterentwicklung der Förderung für alle Gebäudesektoren (Wohn-/Nichtwohngebäude): Heterogenität des Gebäudesektors berücksichtigen

Die Förderung sollte neben den Wohngebäuden auch in weiteren Gebäudesegmenten wie den Nichtwohngebäuden oder Gewerbeimmobilien stärker zum Tragen kommen. Hier besteht Optimierungsbedarf mit Blick auf die Sanierungszahl und -tiefe. Auch die Definition des Referenzgebäudes gemäß GEG sollte überprüft und an den aktuellen Stand der Baupraxis und Technik angepasst werden. Dabei sollte das energetische Niveau des Referenzgebäudes hinsichtlich der Klimaziele ambitioniert ausgerichtet werden und besonders auch im Hinblick auf die Planenden umsetzbar und verständlich formuliert sein.

Mit Blick auf die Einführung der BEG für Nichtwohngebäude wird es erforderlich sein, die Wirksamkeit der Förderprogramme eng zu monitoren und gegebenenfalls anzupassen.

Die Weiterentwicklung der steuerlichen Förderung, zum Beispiel durch Verbesserung der Abschreibung für Abnutzung (AfA), und die Ausweitung der steuerlichen Förderung über selbstgenutzten Wohnraum hinaus auf alle Gebäudeklassen sind zentrale Hebel, um die Investitionen für die energetische Gebäudemodernisierung anzureizen. Wirkungsvoll wäre eine Erhöhung der AfA bei gleichzeitiger Verkürzung des Abzugszeitraums.

Als weitere Orientierung der Förderung könnte auf die eingesparte Energie bzw. die CO₂-Emissionen abgestellt werden, als Anreiz für mehr Sanierungstiefe: Je mehr eingespart wird, desto mehr wird gefördert.



AUFGABE 30

Gebäude als Akteure (und nicht nur Objekte) der Energiewende verstehen

Das Gebäude wird immer stärker zum Energieerzeuger, zum Beispiel über den Einsatz von KWK-Anlagen und Brennstoffzellen oder PV-Anlagen auf dem Dach oder an der Fassade. Die Erzeugung am und im Gebäude sollte stärker systemisch betrachtet werden. Auf diese Weise können die Eigenstromversorgung sowie die Netzdienlichkeit der Gebäude am effizien-

testen organisiert werden. Hierfür braucht es einen Abbau regulatorischer Hürden sowie geeignete förderpolitische Anreize.

Bauwerkintegrierte Photovoltaik ist integraler Bestandteil der Gebäudehülle und sollte damit im Zusammenspiel mit einer hohen Gebäudeeffizienz wirken, um Synergieeffekte zu nutzen. Gefördert werden sollte insbesondere die Kombination aus Dach-/Gebäudehüllensanierung und PV-Installation. Die Umsetzung der gebäudeintegrierten PV sollte erleichtert werden. Hierfür ist eine Vereinfachung der Mieterstrom-Regulierung sowie die Stärkung der Wirtschaftlichkeit der Mieterstrom-Konzepte durch eine grundlegende, bürokratiearme Neuordnung der Abgaben und Umlagen erforderlich.

Der durch PV-Anlagen am Gebäude erzeugte und in das Stromnetz eingespeiste EE-Strom steht zur Deckung des allgemeinen Strombedarfs zur Verfügung. Nach dem Quellprinzip wird die dadurch erzielte Minderung der THG-Emissionen der Strombereitstellung dem Energiesektor zugeordnet, obwohl Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer die PV-Anlagen planen und umsetzen sowie entsprechende Investitionen tätigen. Um dem Aufwuchs von PV-Anlagen im Gebäudekontext politisches Gewicht zu verleihen, ist es wichtig, gebäudenah erzeugten PV-Strom transparent zu machen und informatorisch zusätzlich auch im Gebäudesektor auszuweisen.



AUFGABE 31

Seriell Sanieren in den Markthochlauf bringen

Das serielle Sanieren, zum Beispiel nach dem „Energiesprung“-Prinzip, muss schnell aus der Pilotphase herauswachsen, um Sanierungsprozesse deutlich zu beschleunigen.

Der Schritt aus der Pilotphase in die Markthochlaufphase kann gelingen, wenn die Produktion der Bauteile stärker automatisiert wird. Zudem besteht ein hoher Bedarf an Produktinnovationen, die eine einfachere, schnellere und hochqualitative Installation von Dämmelementen einschließlich Fenstern und Anlagentechnikmodulen auf der Baustelle ermöglichen. Organisatorisch unterstützt werden kann der Markthochlauf durch eine Geschäftsstelle „Serielle Sanierung“ als übergreifende europäische Plattform, die in enger

Abstimmung mit Ländergeschäftsstellen agiert. Dies muss einhergehen mit einer verstärkten Investitionsförderung zum Aufbau von Produktionskapazitäten und Innovationen, der Verstetigung und dem Ausbau bestehender Förderung und einer strategischen Entwicklungs- und Wirtschaftsförderung durch die EU.

Im Rahmen der seriellen Sanierung spielt auch die Integration von PV in die Gebäudehülle eine Rolle. Dementsprechend sollten die Regelwerke kohärent, rechtssicher und transparent ausgestaltet sowie bürokratische Hemmnisse abgebaut werden, zum Beispiel im Bereich Mieterstrom und Baurecht. Weiterhin braucht es eine Verschlankung und Vereinfachung in den Planungs- und Genehmigungsprozessen, unterstützt durch Digitalisierung (digitaler Bauantrag, personelle und technische Ausstattung der Bauämter). Weitere Impulse könnte eine staatlich abgesicherte Nachfrage (z. B. über staatlich geförderte, große Ausschreibungen oder das Zurverfügungstellen öffentlicher Gebäude) geben.

Insgesamt müssen im Zuge des Transformationsprozesses effiziente Innovationen und Marktmodelle unterstützt werden (siehe Kapitel 3 „Innovation“). Die Rahmenbedingungen für einen Markthochlauf für Innovationen und Marktmodelle, die nachweislich zu einer Reduktion von THG-Emissionen führen, sollten innovationsfreundlich gestaltet werden.



AUFGABE 32

Wirksame Ausgestaltung der CO₂-Bepreisung/Aufteilung zwischen Mieterschaft und Vermietenden/Reform der Steuern, Abgaben und Entgelte zugunsten von Klimaschutzlösungen

Das aktuelle Niveau und der nach dem Brennstoffemissions-handelsgesetz (BEHG) für die Jahre bis 2025 bereits festgelegte zukünftige Pfad für den CO₂-Preis im Gebäudesektor kann allein nicht ausreichend Wirkung für die Wärmewende entfalten. Damit der CO₂-Preis eine stärkere Lenkungswirkung erreicht und sinnvoll Investitionsentscheidungen getroffen werden können, ist die sukzessive Erhöhung des CO₂-Preises auf Basis eines klaren Fahrplans erforderlich. Auf diese Weise können Selbstnutzerinnen und -nutzer zum

Umstieg auf eine Heizung auf Basis erneuerbarer Energien sowie Verbraucherinnen und Verbraucher zur Reduktion des Wärmebedarfs angereizt werden.

Im Mietwohnbereich ist eine sozialverträgliche Umsetzung bei gleichzeitiger Erhaltung der Investitionsfähigkeit von Vermietern zentral. Belastungen durch anwachsende CO₂-Preise sollten dabei derart gestaltet werden, dass sie zu Investitionen führen. Abhängig von dem energetischen Zustand der Gebäude sollen die BEHG-Kosten zwischen Vermietern als denjenigen, die die Investitionsentscheidung treffen, und der Mieterschaft aufgeteilt werden. Der zu tragende Anteil orientiert sich an der im Energieausweis ausgewiesenen Effizienzklasse des Gebäudes: Bei den sehr schlechten Gebäuden der Effizienzklassen G und H (bei Mehrfamilienhäusern ca. 16 Prozent der Gebäude) übernimmt der Vermieter den kompletten Anteil der BEHG-Kosten, da er als Investitionsentscheider maßgeblich Maßnahmen zur energetischen Verbesserung initiieren kann. Bei guten Gebäuden der Klassen A+, A und B übernehmen die Mieterinnen und Mieter den vollständigen Anteil, da seitens der Gebäudeeigentümer hier bereits energetische Maßnahmen umgesetzt wurden und die Nutzungsgewohnheiten den Verbrauch stärker beeinflussen. Für Gebäude der mittleren Effizienzklassen wäre ein Mieteranteil von 70 Prozent für die Klassen C und D sowie 40 Prozent für E und F denkbar. Auf diese Weise sollen verstärkt Sanierungsaktivitäten ausgelöst werden. Spezifische Bedingungen, wie beispielsweise durch Denkmal- oder Milieuschutz auferlegte Restriktionen für die energetische Sanierung, sollten angemessen Berücksichtigung finden. Für Nichtwohngebäude müsste ein entsprechender Ansatz abhängig vom energetischen Zustand der Gebäude entwickelt werden.

Weiterhin muss die Belastung des Stroms aus erneuerbaren Quellen mit Steuern, Abgaben und Entgelten schrittweise reduziert werden, um den Hochlauf an Wärmepumpen im Gebäudesektor zu ermöglichen. Dies gilt insbesondere für die EEG-Umlage (siehe Kapitel 2 „Marktdesign“ und Kapitel 4 „Transformation“). Im Wärmesektor sollte hinsichtlich der staatlich induzierten Preisbestandteile ein „Level Playing Field“ geschaffen werden. Auch Gebäudebereiche, in denen CO₂-Emissionen hauptsächlich durch Strombedarf entstehen (z. B. Lüftung, Kühlung, Beleuchtung in Nichtwohngebäuden), können so entlastet werden. In gleicher Weise sollte diese Entlastung auch für andere CO₂-freie Energieträger diskutiert werden. Grundsätzlich muss eine verursachergerichte Kostenzuteilung sichergestellt werden, um Fehlsteuerungen zu vermeiden.

Verbraucherinnen und Verbraucher benötigen Transparenz und Planungssicherheit sowohl bei den Strom- als auch bei den CO₂-Kosten, um Entscheidungen mit Blick auf die notwendige Klimaneutralität treffen zu können.



AUFGABE 33

Unterstützung der Wärmenetze in der schrittweisen Dekarbonisierung

Wärmenetze bieten eine hohe Flexibilität durch die potenzielle Einbindung von vielfältigen erneuerbaren Wärmequellen und Wärmespeichern, womit auf die fluktuierende Erzeugung erneuerbarer Energien reagiert werden kann. Gleichzeitig basiert ein großer Anteil der Wärmeerzeugung in Wärmenetzen heute noch auf fossilen Energieträgern.

Die Dekarbonisierung von Nah- und Fernwärmenetzen im Bestand und über neue Quartierslösungen in Ballungsräumen, aber auch in ländlicheren Regionen, muss vorangetrieben werden: Die Erhöhung der Menge an erneuerbarer und klimaneutraler Wärme in Neubau- und Bestandsnetzen durch Verbreiterung und bessere Ausstattung z. B. der Programme „Wärmenetze 4.0“ und „Energieeffiziente Wärmenetze“ ist ein Schlüssel dafür. Großwärmepumpen werden dabei eine zentrale Erzeugungstechnologie darstellen, daher ist die Schaffung eines „Level Playing Field“ mit Blick auf die Preisgestaltung erforderlich. Insbesondere bei der Tiefengeothermie müssen auch mögliche Risiken von Bohrungen berücksichtigt und abgefedert werden. Außerdem muss verstärkt die Nutzung weiterer erneuerbarer Quellen Berücksichtigung finden, beispielsweise durch Abwärmennutzung aus der Industrie, Solarthermiefelder oder nachhaltige Biomasse.

Die Planung von Wärmenetzen schafft mittel- bis langfristig Investitionssicherheit für die Verbraucherinnen und Verbraucher und die Investierenden. Dabei ist eine systemische Betrachtung von Wärmenetzen und angeschlossenen Gebäuden wichtig (z. B. hinsichtlich der erforderlichen Vorlauftemperaturen und des Wärmeschutzniveaus). Eine emissionsfreie Wärmeversorgung ist stark von den regionalen und lokalen Gegebenheiten (bestehende Infrastrukturen, energetische Potenziale, Energieträger) abhängig. Die strategische Einbettung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in eine verlässliche kommunale Wärmeplanung macht eine strategische gesamthafte Planung sowie eine effiziente Koordination erst möglich. Zudem kann sie die effektive Abstimmung von Strom-, Gas- und Wärmenetzinfrastrukturen ermöglichen (siehe Kapitel 2 „Marktdesign“). Dabei ist eine Verbesserung der personellen und finanziellen Ausstattung der Kommunen notwendig, damit diese eine hochwertige und umsetzungsorientierte Wärmeplanung einführen und umsetzen können. Diese muss ergänzt werden um eine gezielte Förderung der Wärmeplanung selbst. Neben der kommunalen Ebene braucht es auch auf übergeordneten Ebenen ein Koordinierungsorgan, sodass eine enge Abstimmung zwischen Bund, Ländern und Kommunen erfolgen kann. Für die Akzeptanz von Nah- und Fernwärme ist eine transparente Kommunikation der Rahmenbedingungen notwendig.



AUFGABE 34

Unterstützung von Markteinführung und Markthochlauf klimaneutraler synthetischer Energieträger (Powerfuels)

Für den klimaneutralen Gebäudebetrieb sind klimaneutrale Brennstoffe notwendig. Zusätzlich zu den bereits genutzten biogenen Energieträgern und erneuerbarem Strom werden zukünftig insbesondere auch klimaneutrale synthetische Energieträger (Powerfuels) von zentraler Bedeutung sein. Um den hierfür notwendigen markt- und angebotsgetriebenen Hochlauf anzureizen, braucht es neben der Wirtschaft auch vonseiten der Politik ein Bekenntnis sowie Anreize und Vorgaben zur Erzeugung, Bereitstellung und Verteilung von Powerfuels inklusive Klärung der technischen Umsetzung. Nur so kann mit Blick auf 2030 die Transformation der Energieversorgung, Herstellung und Netzwirtschaft vollzogen werden. Dies schafft Planungs- und Investitionssicherheit

für Unternehmen sowie Verbraucherinnen und Verbraucher. In diesem Kontext könnten diese Powerfuels im Sinne von Technologieoffenheit auch Teil der Regel-Erfüllungsoption im Gebäudeenergiegesetz werden. Ab 2025, sobald die entsprechenden (Nachrüst-)Technologien zur Verfügung stehen, ist ein Einbauebot für H₂-ready-Kessel denkbar, um verlorene Investitionen in diesem Bereich zu vermeiden. Von hohem Nutzen ist beim Markthochlauf die bereits bestehende Infrastruktur, die weiter- bzw. umgenutzt werden könnte.

Außerdem ist denkbar, flankierend zur CO₂-Bepreisung eine steigende THG-Minderungsquote für klimaneutrale Energieträger zum Beispiel auf Basis von Zertifikaten einzuführen. Denn ein CO₂-Preis allein führt nicht zur Dekarbonisierung innerhalb einer Heizungstechnologie, da Endkundinnen und Endkunden meist dort, wo ihnen die Entscheidung möglich ist, die preiswerteste Energie beziehen. Eine hochlaufende Unterquote kann für eine wirksame CO₂-Minderung sorgen, den Aufbau von Erzeugungskapazitäten fördern und so die notwendige Transition hin zu klimaneutralen synthetischen Energieträgern unterstützen (siehe Kapitel 2 „Marktdesign“).

Grundsätzlich sollte die Nutzung klimaneutraler gasförmiger und flüssiger Energieträger auch durch die Möglichkeit zur Anrechnung mit entsprechenden Primärenergiefaktoren bzw. CO₂-Faktoren im Ordnungsrecht berücksichtigt werden. Im Bestand sollte die Nutzung dieser Energieträger dabei bevorzugt in den effizientesten Technologien zum Einsatz kommen.

! AUFGABE 35

Stärkung von Digitalisierung und Gebäudeautomatisation

Durch die Nutzung von digitalen Technologien und Gebäudeautomatisation lässt sich der Energieverbrauch reduzieren. Überdies kann das Nutzerverhalten mit Blick auf den Energieverbrauch transparent gemacht und korrigiert werden. Für die Transparenz müssen aber noch die Grundlagen für die Datennutzung (berechtigtes Interesse) geschaffen werden. Neben vermieteten Wohngebäuden können auch Nichtwohngebäude von einer intelligenten Steuerung profitieren, da hier u. a. Lüftung und Klimatisierung sowie Abwärmenutzung eine größere Rolle spielen.

Gleichzeitig sind die Datenverwendung und die Interoperabilität zu verbessern: Wohnungsbezogene Energiedaten sollten für die Systemoptimierung verwendet werden dürfen, möglichst auch in der Umsetzung vom begleitenden Fachhandwerk. Dies bedarf einer eindeutigen datenschutzrechtlichen Erlaubnis. Interoperabilität als Anforderung an Schnittstellen zwischen Heizungsanlagen und Smart-Building-Technologien ist notwendig, um beispielsweise eine Heizungssteuerung, ein Monitoring des Heizungszustands sowie ein THG-Monitoring zu gewährleisten, sodass ein Datenaustausch stattfinden kann.

! AUFGABE 36

„Worst first“: Schlechteste Gebäude zuerst sanieren

Aufgrund des großen THG-Minderungspotenzials sollten die schlechtesten Gebäude mit höchster Priorität modernisiert werden. Dies betrifft zunächst vor allem unsanierte Ein- und Zweifamilienhäuser, die häufig noch über ineffiziente Anlagentechnik und energetisch schlechte Gebäudehüllen verfügen. Hierfür müssen in einem vorgegebenen Zeitrahmen Vorgaben zur Energieeffizienz der Gebäude erfüllt werden. Eigentümerinnen und Eigentümer haben im definierten Zeitraum die Möglichkeit, die Planung und Umsetzung sukzessive, aber zielkonform durchzuführen. Nach der Modernisierung der schlechtesten Gebäude wird im Rahmen eines umfassenden mehrjährigen Stufenplans die Sanierung der nächst-schlechtesten Gebäude angegangen. Instrumente wie der individuelle Sanierungsfahrplan sowie Sanierungsfahrpläne für Quartiere bzw. Klimastrategiepläne für größere Portfolios sollten in diesem Kontext gestärkt und ihre Aufstellung sollte unterstützt werden.

Bei einer ordnungsrechtlichen Regelung der Sanierung der schlechtesten Gebäude ist die enge Verzahnung mit Förder-, Planungs- und Beratungsinstrumenten unabdingbar. Dementsprechend greift das Prinzip „Fördern & Fordern“. Denkbar ist hier auch die Kopplung mit einem vollständig geförderten individuellen Sanierungsfahrplan. Mit eng verzahnten Beratungsangeboten kann u. a. eine ineffiziente Mehrfachsanierung von Bauteilen vermieden werden. Ein Fokus muss dabei auch auf der Sozialverträglichkeit liegen, um soziale Härtefälle abzufedern und bezahlbare Mieten in vermieteten Beständen erhalten zu können. In diesem Zusammenhang sollte auch der soziale Wohnungsbau berücksichtigt werden.

Dem Prinzip „Worst first“ folgend, sollte auch im Bereich der Anlagentechnik eine Dynamik zum Austausch von ineffizienten Heizungsanlagen, bei Bedarf auch vor Erreichung eines Lebenszyklus von 30 Jahren, entfaltet werden. Neben einem auf Anreizen basierenden Mechanismus sollte es bei besonders ineffizienten Anlagen im Bestand Vorgaben geben, diese zugunsten einer verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien sowie einer höheren Effizienz auszutauschen. Insbesondere die mit fossiler Energie betriebenen Standard- und Niederdruckkessel sollten prioritär ausgetauscht werden⁹, insofern sie nicht effizient mit klimaneutralen Energieträgern betrieben werden können. Auslösetatbestände wie beispielsweise der Verkauf von Gebäuden, können genutzt werden, um zum geeigneten Zeitpunkt Impulse zum Austausch alter, ineffizienter Anlagen zu setzen. Sie sollten verknüpft werden mit einem technologie- und energieträgerneutralen Einbindungsgebot erneuerbarer Energien.



AUFGABE 37

Verbesserung der Umsetzung des Ordnungsrechts im Bestand

Aktuell bestehen bereits ordnungsrechtliche Verpflichtungen, zum Beispiel bezüglich der Dämmung der obersten Geschossdecke, des Austauschs von über 30 Jahre alten, ineffizienten Heizkesseln oder der nachträglichen Dämmung von Heizungsleitungen im Keller. Die Vorgaben werden heute allerdings nicht ausreichend umgesetzt und es existieren insbesondere in Ein- und Zweifamilienhäusern zu viele komplexe Ausnahmeregelungen. Daher sollte hier mit Blick auf die bestehenden Regelungen in erster Linie der Vollzug gestärkt werden.

Die Inspektionspflichten für strom-, wärme- und energieführende Anlagen sollten erweitert werden, insbesondere bei Inbetriebnahme der Anlagen sollten Vor-Ort-Kontrollen und Beratungsgespräche intensiviert werden, wobei die Qualifikation der Fachexpertinnen und -experten sichergestellt werden muss.



AUFGABE 38

Anpassung ordnungsrechtlicher Vorgaben für den Neubau in Verbindung mit Förderung

Die heute gesetzlich festgelegten Anforderungen an das energetische Effizienzniveau von Neubauten garantieren noch nicht die Erreichung der Klimaziele im Gebäudesektor. Der gesetzlich geregelte Effizienzstandard von Neubauten sollte kurzfristig überprüft und zielgerecht erhöht werden, unter Berücksichtigung bauphysikalischer und bautechnischer Restriktionen im Rahmen der Statik sowie des Brand- und Schallschutzes. Bei einer deutlichen Erhöhung des Effizienzstandards ist zu berücksichtigen, wann Technologiesprünge entstehen, die zu deutlich höheren Kosten führen können. Dies könnte durch eine Förderung von gesetzlichen Anforderungen zur Steigerung der Energieeffizienz abgedeckt werden, womit gleichzeitig auch die Markteinführung von Innovationen begünstigt wird. Eine derartige Förderung könnte über einen Zeitraum von mehreren Jahren jährlich reduziert werden. Vor allem im Nichtwohngebäudebereich ist das Zusammenspiel aus Gebäudehülle, Heizbedarf im Winter und dem etwaigen Bedarf an aktiver Sommerkühlung zu bedenken.

Für Neubauten sollte zukünftig zudem bundesweit eine Pflicht für die Integration von PV-Modulen oder auch Solarthermie gelten, sofern dies beim spezifischen Vorhaben unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und bauphysikalischer Gegebenheiten (z. B. Verschattung, Dachausrichtung etc.) Sinn ergibt. Damit sind Synergieeffekte für die Erhöhung der Gebäudeenergieeffizienz verbunden. In diesem Zusammenhang muss zudem eine einfache lokale Verwendung des Stroms sichergestellt und geregelt werden. Ein zentraler Schritt in diese Richtung ist die ausstehende Umsetzung der neuen Vorgaben aus der europäischen Erneuerbaren-Energien-Richtlinie zur gemeinschaftlichen Eigenversorgung (siehe auch Kapitel 4 „Transformation“). Eine begleitende Förderung hoher Effizienzstandards sowie der Installation von PV- bzw. Solarthermie-Anlagen kann die Wirtschaftlichkeit für Investoren unterstützen.

⁹ Dies kann jedoch mit Herausforderungen verbunden sein: Beispielsweise lässt sich der Ersatz alter, ineffizienter Gas-Etagenheizungen gegen effizientere Wärmeerzeuger häufig nicht oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand realisieren, da bestehende Schornsteine umgerüstet und sämtliche Bestandsetagenheizungen ausgetauscht werden müssten. Eine Verpflichtung zum Austausch dieser Kessel müsste daher mit einer entsprechenden Förderung einhergehen.



AUFGABE 39

Quartiere als Klimaschutz-Vorranggebiete etablieren

Durch einen kleinteiligen, komplexen und zum Teil auch intransparenten rechtlichen Rahmen wird das Ziel der dezentralen und nachhaltigen Energieversorgung von Quartieren nicht erreicht. Der wirtschaftliche Betrieb von Quartieren muss in der Breite ermöglicht werden, damit die Potenziale einer effizienten Verzahnung von Strom-, Wärme-/Kälteversorgung und Mobilität zum Tragen kommen können.

Das Quartier als lokale Verbrauchs-, Erzeugungs- und Energiewandlungsebene sollte daher im Rechtsrahmen nachhaltig verankert werden. Dafür braucht es u. a. eine konsistente Definition von Quartieren, die insbesondere die Potenziale von klimaneutraler Energieversorgung und Effizienzsteigerung berücksichtigt. Zudem sollte die Regulierung von Strom und Wärme für die Stärkung von Quartieren aufeinander abgestimmt werden, um lokale Sektorkopplung zu ermöglichen.

Priorität sollte haben, über eine Anpassung und Vereinheitlichung des regulatorischen Rahmens die Umsetzungen im Quartier zu vereinfachen und damit die Praxistauglichkeit zu erhöhen.

Um das Quartier zum Klimaschutz-Vorranggebiet zu erklären, braucht es neben dem Abbau von Hemmnissen klare Impulse, so dass Quartiere auch wirtschaftlichen Mehrwert für die Beteiligten bieten: Dazu gehört die Befreiung der Quartiersebene von Abgaben und Umlagen sowie ein Förderzuschlag für Quartiere, die bestimmte Rahmenkriterien (einer neuen Quartiers-Definition folgend) erfüllen. Auf diese Weise können sich Quartierskonzepte in der Breite etablieren sowie ihr Potenziale zur Erreichung der Klimaneutralität entfalten. Der Bund sollte die Gestaltungsräume und das lokale Know-how der Kommunen nutzen und sie bei ihrer Quartiers-, Energieleit- und Wärmeplanung finanziell unterstützen.



AUFGABE 40

Ausweitung der Energieberatung, Datenbasis verbessern, Energiebedarfsausweise stärken

Die Energieberatung sollte systematisch ausgeweitet werden. Mit Blick auf die heterogene Eigentümer-, Investoren-, Nutzer- und Gebäudestruktur ist eine individuelle Beratung unerlässlich, um die Zahl der energetischen Sanierungen sowie deren Effektivität zu steigern. Sowohl für Wohngebäude als auch für Nichtwohngebäude sollte die Beratung deutlich ausgeweitet werden. Energieberatung sollte dabei möglichst unkompliziert ausgestaltet sein, unter Wahrung der notwendigen Qualitätssicherung, um entsprechende Investitionen nicht auszubremsen. Maßnahmen zur Qualitätssicherung sollten dabei neben der Listung von qualifizierten Experten auch die stichprobenhafte Kontrolle von Unterlagen und der Umsetzung vor Ort sowie die umfassende Information der Eigentümer umfassen. Um insbesondere die großen Einsparpotenziale der „Worst Performing Buildings“ zu heben, sollte eine Beratung auch aufsuchend stattfinden: Energieberaterinnen und -berater sollten befähigt und befugt werden, proaktiv auf Eigentümerinnen und Eigentümer zuzugehen, um diese für energetische Sanierungsmaßnahmen zu sensibilisieren.

Parallel zur Ausweitung der Energieberatung ist es notwendig, die an verschiedenen Stellen bereits vorhandenen Gebäudeenergiedaten im Altbestand zusammenzuführen und den Marktteilnehmern zugänglich zu machen. In diesem Zusammenhang sollte außerdem analysiert werden, ob bei Bedarf weitere Daten erfasst werden sollten.

Energieausweise mit Verbrauchsdaten sind aktuell nur bei Verkauf und Vermietung von Gebäuden verfügbar. Eine stärkere Durchdringung und Vereinheitlichung des Energieausweises möglichst hin zu belastbaren Bedarfsausweisen ist wichtig, um die Gebäude mit den schlechtesten Energieeffizienzwerten verlässlich zu identifizieren und ein genaueres Bild des Bestands zu bekommen. Aufgrund der begrenzten Ressourcen der Energieberaterinnen und -berater braucht es innovative und digitale Methoden zur flächendeckenden Erfassung des energetischen Zustands von Gebäuden.

Die Energieberatung sollte eng verzahnt mit der Inanspruchnahme von Förderung und ordnungsrechtlichen Instrumenten sein. Das heißt, Förderprogramme sollten eng gekoppelt mit einer entsprechenden Beratung durch qualifizierte Energieberaterinnen und -berater oder für bestimmte Einzelmaßnahmen durch die ausführenden Handwerksbetriebe (mit entsprechender Weiterbildung zum Energieberater) stattfinden. Gleiches gilt beispielsweise bei einer durch Vermietung oder Verkauf ausgelösten Sanierung.

„One Stop Shops“ auch auf regionaler Ebene können eine solche Verzahnung unterstützen. Der Aufbau solcher Anlaufstellen, in denen sowohl Informationen als auch praktische Unterstützung bei Beratung, Planung, Finanzierung, Vorbereitung und Begleitung der Sanierungsmaßnahmen angeboten wird und die auf diese Weise niedrigschwellig und unkompliziert Sanierungsvorhaben ermöglichen, sollte gefördert werden.



AUFGABE 41

Stärkung des individuellen Sanierungsfahrplans (iSFP) und Weiterentwicklung für Gebäudeportfolios

Zentrales Instrument für die Energieberatung ist ein individueller Sanierungsfahrplan (iSFP). Der iSFP geht individuell auf den Zustand der Gebäude sowie die Bedürfnisse der Eigentümerinnen und Eigentümer ein und ermöglicht eine Schritt-für-Schritt-Planung und sukzessive Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen. Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) bezuschusst die Erstellung von iSFPs im Rahmen seines Förderprogramms für Wohngebäude-Energieberatungen.

In bestimmten Fällen, wie Vermietung, Verkauf oder Vererbung von sanierungsbedürftigen Gebäuden, sollte für Ein- und Zweifamilienhäuser die Erstellung eines iSFP als verpflichtendes Beratungsangebot festgelegt werden. In diesen Übergängen werden häufig Überlegungen zur Modernisierung und Sanierung von Gebäuden angestellt. Dementsprechend sollten diese entscheidenden Phasen von fachlich qualifizierten Energieberaterinnen und -beratern begleitet und mithilfe eines iSFP professionell geplant und umgesetzt werden.

Eine enge Verknüpfung des iSFP mit dem Energieausweis ist sinnvoll. Zum Beispiel sollte die Erstellung eines iSFP Anlass geben, die erhobenen Daten zur Erstellung eines Energieausweises zu nutzen. Zudem sollten diese Instrumente in eine strategische kommunale Wärmeplanung eingebettet werden, um neben den individuellen Gebäuden auch die Gesamtsituation vor Ort im Blick zu haben.

Zukünftig sollte der individuelle Sanierungsfahrplan auch auf Nichtwohngebäude ausgeweitet und bezuschusst werden, um auch hier als Treiber für energetische Sanierungen zu wirken.

Insbesondere bei Wohnungsunternehmen, die über größere Bestände verfügen, kann die strategische Erstellung von Sanierungsfahrplänen auf Ebene des Gesamtportfolios sinnvoll sein, um hier zu einem konkreten Umsetzungsplan zu gelangen. Diese Portfolio-Fahrpläne sollten ebenfalls entwickelt und gefördert werden.



AUFGABE 42

Vorbereitung und Durchführung einer breiten Beratungs-, Informations- und Kommunikationsoffensive

Die Transformation zu einem klimaneutralen Gebäudebestand muss unter Einbeziehung der Öffentlichkeit und relevanter Stakeholder-Gruppen geschehen, da der Erfolg maßgeblich von ihrer Akzeptanz und ihren Entscheidungen und Verhaltensmustern abhängt. In diesem Kontext ist es zentral, die Energiewende und den Klimaschutz in Gebäuden motivierend zu gestalten und CO₂-Minderungen positiv zu würdigen.

Kommunikationsoffensiven sollten in Form von Kampagnen, Plattformen zur Vernetzung und individueller persönlicher Beratung ausgestaltet werden. Hier sollten auch die zusätzlichen Vorteile einer energetischen Gebäudesanierung herausgestellt werden. Sie liegen zum Beispiel darin, den Wert des Gebäudes zu erhalten oder sogar zu steigern sowie die Bausubstanz zu sichern. Auch Dach- und Fassadenbegrünungen liefern z. B. einen zusätzlichen positiven Effekt im Sinne der Anpassung an den Klimawandel sowie der Verbesserung der Aufenthaltsqualität in Gebäuden und Städten.

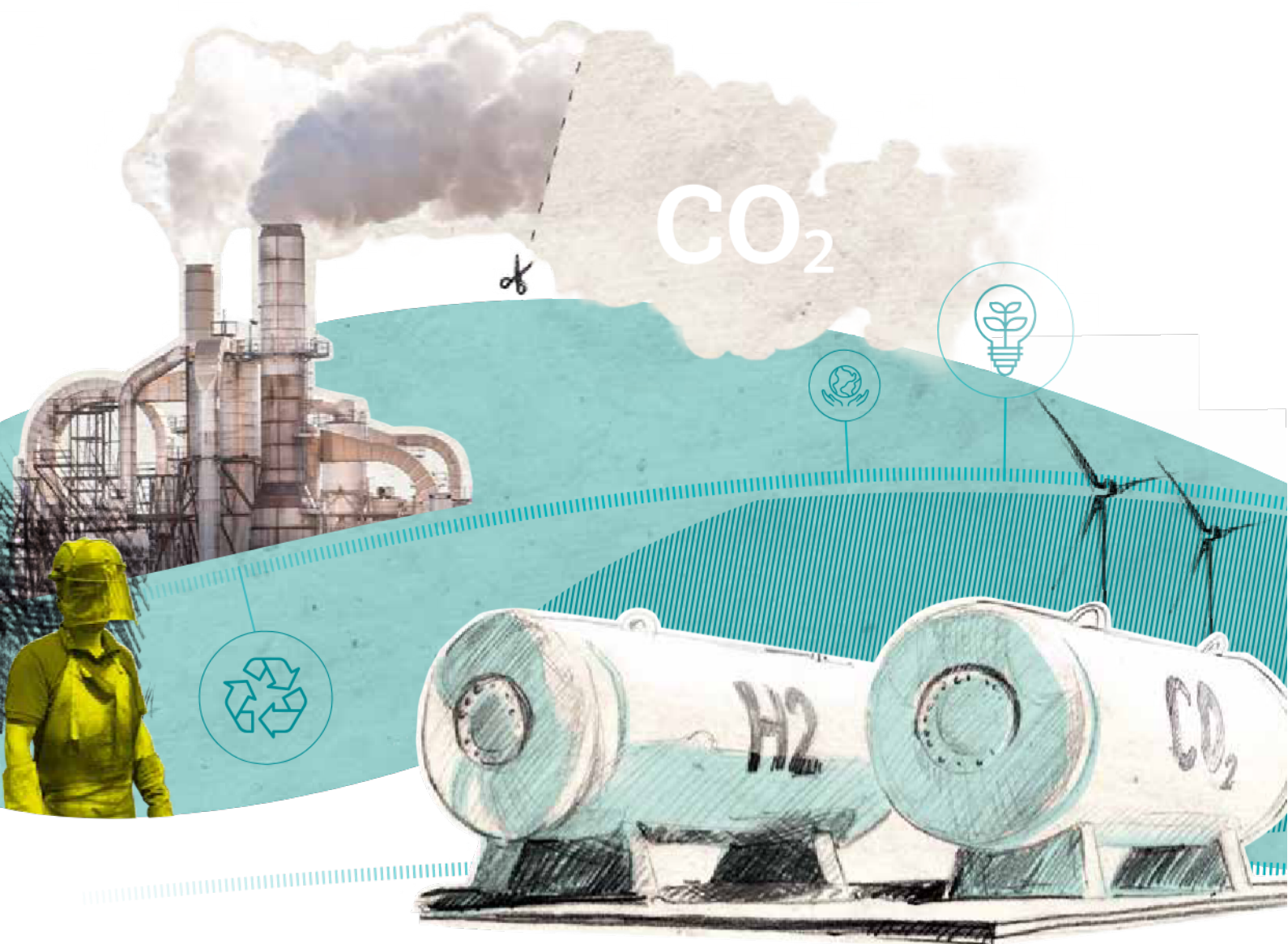
Neben einer breiten Öffentlichkeitswirksamkeit ist eine zielgruppenspezifische Ansprache von Akteuren erforderlich, beispielsweise zur Gewinnung und Qualifizierung von Fachkräften im Handwerk.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- ▶ **Ausbildungs- und Qualifizierungsinitiative für Fachkräfte der Energiewende**
(Kapitel 4 „Transformation“)
- ▶ **Ehrlich machen, Kommunikation verbessern und Informationsangebote gestalten**
(Kapitel 4 „Transformation“)
- ▶ **Forschung und Entwicklung für Wasserstoff und Powerfuels**
(Kapitel 9 „Energie“)
- ▶ **Steuerung der Nachfrage nach Wasserstoff und klimaneutralen Energieträgern**
(Kapitel 9 „Energie“)
- ▶ **Forschung und Entwicklung für Wasserstoff und Powerfuels, Steuerung der Nachfrage nach Wasserstoff und klimaneutralen Energieträgern, Internationale Kooperationen für den Import von Wasserstoff und seinen Derivaten aufbauen** (Kapitel 5 „Internationale Einbettung“)
- ▶ **Abgaben auf Energie auf CO₂-Bepreisung und Infrastrukturabgaben fokussieren**
(Kapitel 2 „Marktdesign“)

7 Industrie

Wie kann die Industrie die Umstellung auf klimaneutrale Prozesse und eine effiziente Kreislaufwirtschaft schaffen?



Die Industrie steht noch am Beginn der Transformation zur Erreichung der Klimaziele: Energiebedarfs- und THG-Emissionsminderung stagnieren seit 2000

Die deutsche Industrie trägt mit insgesamt über 6 Millionen direkt Beschäftigten in mehr als 47.000 Unternehmen¹ zu Wertschöpfung und Wohlstand Deutschlands bei. Mehr als ein Fünftel der deutschen Bruttowertschöpfung wurde im Jahr 2020 direkt durch die Industrie erbracht. Mehr als in anderen großen Industrienationen. Zum Vergleich: In Japan betrug der Anteil der Industrie rund 19, in den USA 11, in Frankreich 10 Prozent. Rechnet man die von der Industrie abhängigen unternehmensnahen Dienstleistungen hinzu, erhöht sich der Anteil in Deutschland sogar auf über 40 Prozent.² Schlüsselbranchen im verarbeitenden Gewerbe sind in Deutschland der Automobil- und der Maschinenbau, die Metallindustrie sowie die Chemisch-pharmazeutische Industrie, Ernährung und Elektrotechnik.³

Dabei ist die deutsche Industrie eng mit den globalen Wertschöpfungsketten verflochten – sowohl die Exporte als auch die Importe von Industriewaren sind in den vergangenen Jahren dynamisch gewachsen. Im Jahr 2019 standen Exporte im Wert von rund 1.250 Milliarden Euro Importen im Wert von rund 920 Milliarden Euro gegenüber und erzeugten somit eine positive Außenhandelsbilanz von über 320 Milliarden Euro.⁴

Status Quo: Hoher Energiebedarf und schwer vermeidbare Prozess-emissionen

Nachdem die THG-Emissionen der Industrie in den 1990er Jahren um ca. 30 Prozent sanken⁵, stagnieren sie seit dem Jahr 2000 und sind in den letzten Jahren sogar wieder leicht gestiegen, da die erzielten Effizienzverbesserungen die kontinuierlich steigenden Produktionsmengen nicht ausgleichen konnten.⁶ Auch der Endenergieverbrauch konnte in dieser Zeit kaum gesenkt werden.⁷ Zur Erreichung der Klimaziele nach dem Klimaschutzgesetz 2021 müssen die THG-Emissionen in den verbleibenden Jahren bis 2030 um mehr als ein Drittel gesenkt werden, wofür eine stärkere Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch notwendig ist.

¹ Von diesen 47.000 Unternehmen sind die Hälfte (23.800) kleine Unternehmen bis 25 Mitarbeitenden, 21.000 mittelständische Unternehmen bis 500 Mitarbeitende, ca. 2.000 Großunternehmen.

² Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), 2021.

³ Statista, 2020.

⁴ Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), 2021.

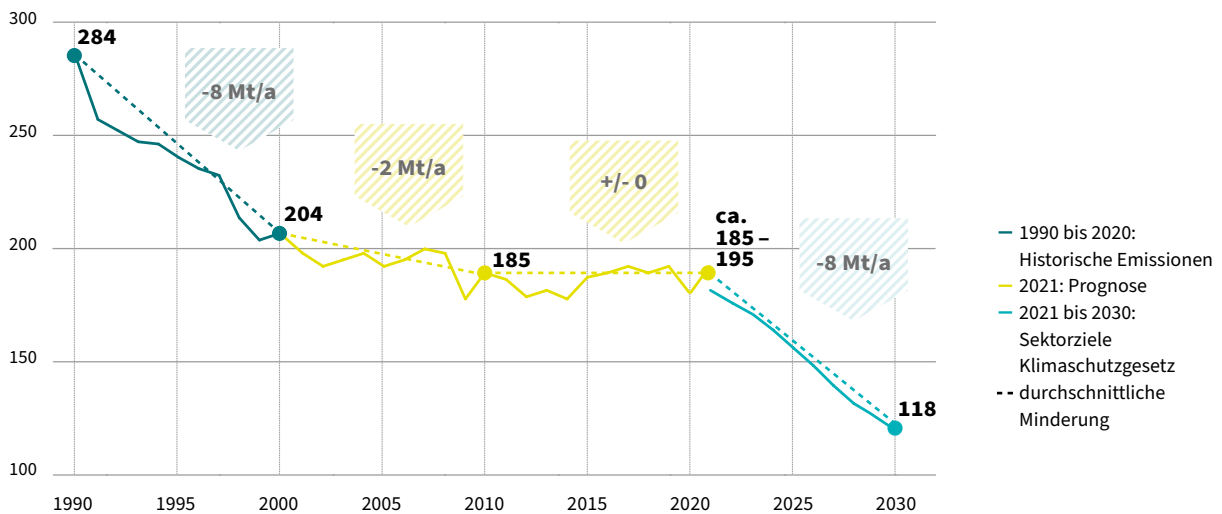
⁵ Gründe waren neben dem Strukturwandel durch die Wiedervereinigung auch die Reduktion leicht vermeidbarer THG durch teilweisen Braunkohleausstieg und Abbau von Lachgas- sowie Methanemissionen, so hat die Industrie zwischen 1990 und 2000 alleine 17 Mt CO₂-ä an N₂O-Emissionen eingespart.

⁶ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), 2019.

⁷ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2018a.

Abb. 7.1 Historische THG-Emissionen des Industriesektors und Sektorziele bis 2030⁸

Angaben in Mt CO₂ä



Quelle: Umweltbundesamt (UBA), 2021f; Agora-Energiewende, 2021.

Der Endenergiebedarf der deutschen Industrie lag im Jahr 2018 bei 722 TWh, wovon etwas mehr als die Hälfte direkt eingesetzte

Die Industrie steht in Deutschland für ein Drittel des Endenergiebedarfs und fast ein Viertel der THG-Emissionen.

fossile Brennstoffe waren. Mit einem Stromverbrauch von 226 TWh (etwa 40 Prozent der deutschen Erzeugung) ist die Industrie der größte Stromverbrauchssektor. Zusätzlich zum rein energetischen Einsatz

wurden 2018 rund 224 TWh Energieträger für die stoffliche Nutzung in der Industrie eingesetzt. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um petrochemische Flüssigkeiten und Gase für die Chemieindustrie.

Insgesamt verursachte der Industriesektor im Jahr 2018 rund 190 Millionen Tonnen direkte CO₂-Emissionen, fast ein Viertel des deutschen THG-Ausstoßes; davon rund 63 Millionen Tonnen prozessbedingte Emissionen, hauptsächlich aus der Stahl-, der Chemie- und der Zementindustrie.

Im Zielbild steht die klimaneutrale Industrie Deutschlands im Zentrum neuer globaler Wertschöpfungsnetzwerke einer Rohstoff- und CO₂-Kreislaufwirtschaft

Damit die Industrie im Zielbild für 2045 weitgehend klimaneutral produziert, müssen die bestehenden, auf fossilen Ressourcen basierenden Produktionsprozesse weiterentwickelt oder komplett durch neue Produktions- und Prozesstechnologien ersetzt

Energieeffizienz und Flexibilität erlauben eine enge Integration der Industrie in das Energiesystem.

werden. Der Energiebedarf wird zukünftig zum Großteil aus Wasserstoff und Strom gedeckt, in geringeren Mengen auch durch (teils abfallstäm-mige) Biomasse. Um weiterhin in den Welthandel integriert

zu sein, muss die deutsche Industrie ihre Stellung auf den Weltmärkten durch faire Wettbewerbsbedingungen behaupten können. Durch die Emissions- und Ressourcentransparenz über die gesamte Wertschöpfungskette werden auch Zulieferer im Ausland im Wesentlichen klimaneutral produzieren..

⁸ Umweltbundesamt (UBA), 2021f sowie Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2021; für Zeitraum 2021 bis 2030: Bundesklimaschutzgesetz (KSG), Bundesklimaschutzgesetz (KSG), 2019.

Industrieunternehmen müssen auf die neuesten verfügbaren Technologien umgestellt haben und nicht vermeidbare Abwärme effizient nutzen. Durch die Ausnutzung von Flexibilitätsoptionen sowie dem netzdienlichen Einsatz von Hybridanlagen lassen sich erhebliche Gesamtkosten im Energiesystem einsparen. Der Endenergiebedarf der Industrie im KN100-Szenario wird dadurch bis 2045 bei in etwa vergleichbaren Produktionsmengen deutlich gesunken sein.

Die Wirtschaft muss sich dabei von einer linearen zu einer Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) weiterentwickelt haben. Produkte werden so gestaltet, dass sie in regionalen und überregionalen Nutzungsketten und -kreisläufen wiederverwendet oder verwertet werden können. Sämtliche Rohstoffe werden weitgehend im Kreislauf geführt, wodurch der Einsatz von Primärrohstoffen deutlich verringert wird und die Recyclingfähigkeit

Regionale und überregionale Nutzungsketten und Kreisläufe senken Primärrohstoffbedarf.

von Materialien an Bedeutung gewinnt. Dies gilt auch, wenn durch den hohen Exportanteil Deutschlands nicht überall auf die Zuführung von Ressourcen verzichtet werden kann. Dadurch werden nicht

nur Energieeinsparungen erzielt und Umweltschäden durch den Abbau von Primärrohstoffen verringert, sondern es wird auch die Abhängigkeit Deutschlands von Rohstoffimporten reduziert. Durch neue Standards und Anreize für eine Kreislaufwirtschaft und langlebige Produkte ergeben sich neue Geschäftsmodelle, durch die die Bedürfnisse und Konsumwünsche der Verbraucherinnen und Verbraucher mit einer geringeren Produktionsmenge gedeckt werden können.

Auch für CO₂ gibt es eine Kreislaufwirtschaft: Nicht vermeidbare CO₂-Emissionen werden durch Abscheidung weitestgehend aufgefangen und das abgeschiedene Kohlenstoffdioxid als erneuerbarer Rohstoff der Chemieindustrie für die Produktion neuer langlebiger Produkte eingesetzt oder geologisch gespeichert. Zusätzlich wird atmosphärisches CO₂ technisch oder biogen gebunden (siehe Kapitel 10 „Natürliche Ökosysteme und technische Senken“).

Die industriellen Wertschöpfungsketten werden sich dabei durch disruptive Veränderungen im Energiesystem, in der Industrie, im Verkehr und in der Gesellschaft zu neuen Wertschöpfungsnetzwerken gewandelt haben. Manche Vor- und Zwischenprodukte, insbesondere für die Chemieindustrie, werden aus dem Ausland importiert. Durch Innovationen und Anpassung des Produktportfolios an veränderte Marktbedingungen ist die deutsche Industrie weiterhin international konkurrenzfähig. Die Entwicklung, Anwendung und Hochskalierung von Klimaschutztechnologien im eigenen Land wird der deutschen Industrie die Technologieführerschaft auf dem Weltmarkt ermöglichen und somit die Erhaltung von Arbeitsplätzen und von Wertschöpfung im Inland. Gleichzeitig kann sie durch den Export dieser Technologien einen wichtigen Beitrag zur globalen Energiewende leisten.

Dringender Handlungsbedarf für die kommenden 10 Jahre: schnelle Umstellung auf zukunftsfähige Verfahren bei Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit

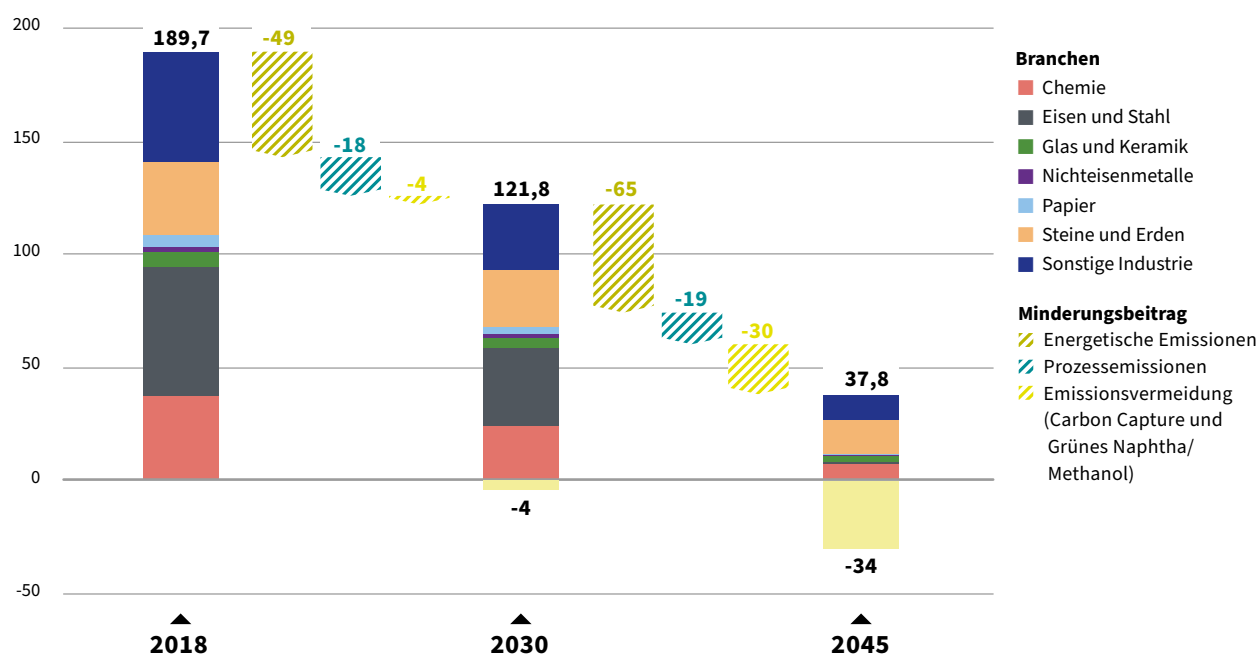
Die Unternehmen der deutschen Industrie stehen im Spannungsfeld zwischen Klimazielen (und anderen regulatorischen Vorgaben) und internationaler Wettbewerbsfähigkeit. Die Zielvorgaben durch das Klimaschutzgesetz 2021 machen ein sofortiges Handeln zur Einsparung von Treibhausgasemissionen notwendig. Darunter fallen stärkere Anstrengungen zur Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz, das forcierte Auslaufen der Nutzung klimarelevanter F-Gase (Fluorkohlenwasserstoffe), die weitgehende Elektrifizierung des Prozesswärmebedarfs, der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft sowie insbesondere der schnelle Hochlauf neuer THG-neutraler oder -armer Verfahren (Low Carbon Breakthrough Technologies, LCBT).

Die Zielverschärfung für 2030, aber auch der kürzere Zeithorizont bis zum Erreichen der Klimaneutralität, macht gewisse Pfadentscheidungen und Technologiefestlegungen erforderlich, insbesondere seitens der Unternehmen, teilweise aber auch durch den Gesetzgeber, insbesondere wo es um den Ausbau von Infrastrukturen und passender Förderrichtlinien geht. Auch wenn Technologieoffenheit grundsätzlich zu befürworten ist, ist das Ziel nur erreichbar, wenn heute schon verfügbare klimaneutrale/-kompatible Technologien schnellstmöglich eingesetzt werden. Investitionen in neue Großanlagen, deren Weiterbetrieb mit dem Ziel der Klimaneutralität nicht vereinbar ist, sollten nicht mehr getätigt werden.

In der Modellierung werden die THG-Emissionen im Einklang mit den Klimazielen reduziert. Energetische Emissionen werden durch Einsatz klimaneutraler Energieträger fast komplett eliminiert; Prozessemissionen bis 2045 etwa halbiert. Durch CCU/S können verbleibende Prozessemissionen reduziert bzw. durch Negativemissionen (BECCS) ausgeglichen werden.

Abb. 7.2 THG-Minderungspfad im Industriesektor

Angaben in Mt CO₂ä



Branchen (Mt CO ₂ ä) (Brutto)	2018		2030		2045	
	prozess	energetisch	prozess	energetisch	prozess	energetisch
Chemie	6,5	30,3	4,5	19,4*	2,2	4,6
Eisen und Stahl	20,2	37,2	12,9	21,2*	0,0	1,0
Glas und Keramik	1,9	4,3	2,0	2,6*	2,0	0,5
Nicht Eisenmetalle	0,8	1,7	0,6	1,16*	0,2	0,4
Papier	0,0	5,6	0,0	3,4*	0,0	0,5
Steine und Erden	17,8	14,1	15,1	9,8*	11,3	3,5
Sonstige Industrie	16,0	33,1	9,9	19,3*	10,0	1,7
	63,3	126,4	45,0	76,8*	25,6	12,2
Summe (brutto)	189,7		121,8		37,8	
Senken	0		-4		-34	
Summe (netto)	189,7		117,8		3,8	

* Eigene Schätzungen der branchenspezifischen energetischen THG-Emissionen für das Jahr 2030.

Gesamtemissionen und Senken (Mt CO ₂ ä)	2018	Minderungs- beitrag	2030	Minderungs- beitrag	2045
Energetische Emissionen	126	-49	77	-65	12
Prozessemissionen	63	-18	45	-19	26
Emissionsvermeidung (Carbon Capture und Grünes Naphtha/Methanol)	0	-4	-4	-30	-34
Summe	189	-71	118	-114	4

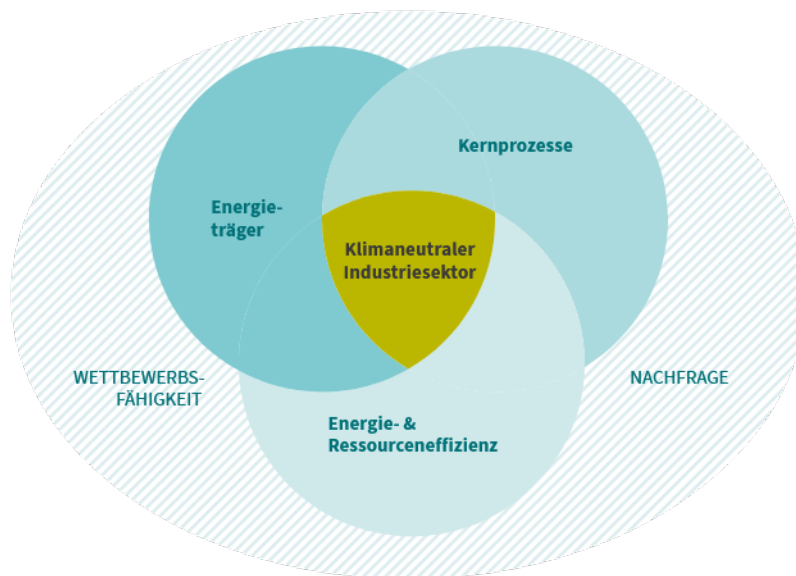
Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Ein stabiler marktlicher Rahmen sowie gezielte direkte staatliche Unterstützung (wo erforderlich) in Verbindung mit der zeitnahen Bereitstellung der nötigen Infrastrukturen sind Voraussetzungen, damit die Industrie die Klimaziele primär marktgetrieben aus Eigenmitteln erreichen kann. Die Transformation sollte in einen internationalen Rahmen eingebettet werden: Fast alle Maßnahmen in diesem Kapitel sind auch auf EU-Ebene sinnvoll (oder sogar darüber hinaus im Rahmen z. B. von Handels- oder Klimaabkommen), sollten aber, wo möglich, bereits auf nationaler Ebene eingeführt werden.

Die wichtigsten Maßnahmenfelder der kommenden Jahre für den Umbau zur Klimaneutralität und der Zielerreichung bis 2030 sind:

- Gesamtheitliche Erhöhung der **Effizienz**, die sowohl auf **Energieeinsparungen** in Prozessen als auch auf die Reduzierung des Materialeinsatzes und des Ressourcenaufwands abzielt

- Ermöglichung einer **Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten** durch Transparenz über den THG-Fußabdruck und nachfragebasierte Instrumente wie „grüne Leitmärkte“
- Umstellung aller **Produktionsverfahren** auf klimaneutrale Technologien (Low Carbon Breakthrough Technologies, LCBT), insbesondere für heute emissionsintensive Kernprozesse
- Sicherung der internationalen **Wettbewerbsfähigkeit** zur Vermeidung von Carbon Leakage, ohne Anreize zur THG-Einsparung aufzuweichen
- Bereitstellung und effizienter Einsatz **klimaneutraler Energieträger**: Weitestmögliche Elektrifizierung und der Einsatz von Wasserstoff und Biomasse in emissionsarmen oder -freien Prozessen



7.1 Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz

Im Jahr 2018 verbrauchte die Industrie mit 722 TWh etwa 38 Prozent des deutschen Endenergiebedarfes. Durch eine Steigerung der Energie- und Materialeffizienz sowie neue Verfahren wird der Energiebedarf der Industrie im Szenario KN100 bis 2030 auf rund 638 und bis 2045 auf unter 580 TWh sinken.

Durch die Umstellung eines Drittels der Stahlproduktion auf Direktreduktion und den weitgehenden Kohleausstieg in den übrigen Branchen wird der Kohleverbrauch bis 2030 etwa halbiert. Der Erdgasverbrauch sinkt schon in dieser Dekade um ein Drittel. Wasserstoff macht 2030 erst 2 Prozent des Endenergieverbrauchs aus, da dieser erst in den 2030er Jahren in größeren Mengen zur Verfügung steht. Der Strombedarf nimmt dabei kontinuierlich zu, insbesondere durch die Elektrifizierung des Prozesswärmebedarfs.⁹

Zusätzlich zum energetischen Bedarf der Industrie gibt es einen stofflichen Einsatz von Energieträgern von 224 TWh für 2018, hauptsächlich von Produkten der Petrochemie. Im Jahr 2045 beträgt die Menge dieser Energieträger 213 TWh, größtenteils synthetische Moleküle wie Wasserstoff und grünes Naphtha, sowie einen fossilen Restanteil von etwa 40 TWh. Zusätzlich werden 8,5 Millionen Tonnen grünes Methanol (ca. 50 TWh) zur Verwendung in der Chemieindustrie importiert.

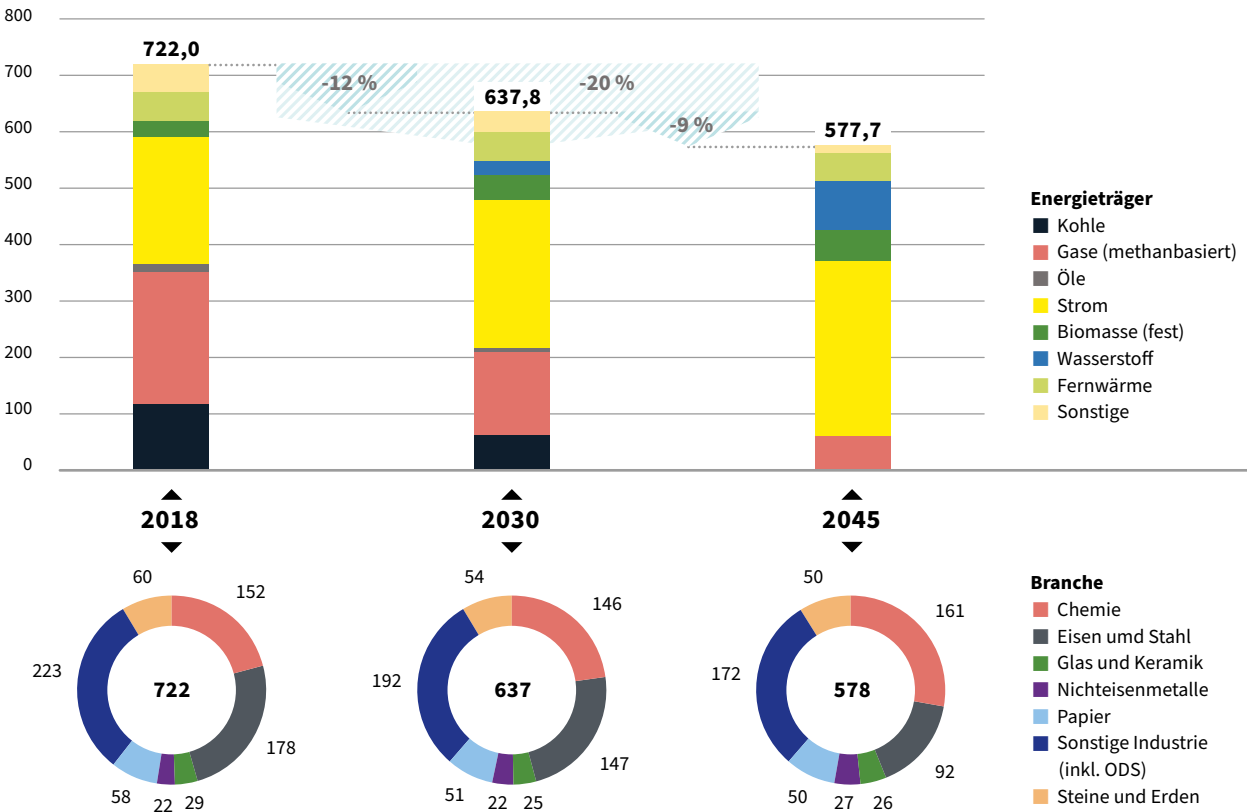
Auch bei der Verwendung von klimaneutralen Energieträgern Energieträgern und Rohstoffen ist die kontinuierliche Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz notwendige Bedingung zur Erreichung der Klimaziele. In der Modellierung der dena-Leitstudie sind hierzu nach intensiven Diskussionen mit zahlreichen Branchenexperten ambitionierte Annahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz getroffen. Die angenommenen Effizienzverbesserungen verteilen sich über alle Branchen, dabei wird insbesondere bei Querschnittstechnologien ein hohes Einsparpotenzial gesehen. Sollten diese Effizienzverbesserungen nicht erreicht werden, hätte die Industrie im Jahr 2045 einen um mindesten 100 TWh höheren Endenergiebedarf.

Der Energiebedarf in manchen Branchen kann durch die Umstellung auf neue Technologien zur emissionsarmen Produktion zunächst sogar steigen, da diese teils energieintensiver sind und zudem im Gegensatz zu konventionellen Verfahren noch nicht über Jahrzehnte prozesstechnisch und energetisch optimiert werden konnten. Daher besteht voraussichtlich Potenzial für stärkere Effizienzsteigerungen, welche aber aufgrund der aus heutiger Sicht hohen Ungewissheit in der Modellierung nicht berücksichtigt wurde.

Aus diesen Gründen spielt Energieeffizienz eine zentrale Rolle in der Transformation der Industrie. Größtes Hindernis sind dabei lange Amortisationszeiten, aber auch eine geringe Priorisierung innerhalb mancher Unternehmen, der Mangel an Know-how oder die Verfügbarkeit der entsprechenden Technologien. Daher ist eine stärkere staatliche Unterstützung erforderlich, um Amortisationszeiten durch Förderung und andere Finanzierungsinstrumente zu verkürzen und den Einsatz modernster Technologien sicherzustellen, verbunden mit einzelnen ordnungsrechtlichen Auflagen.

⁹ Der Strombedarf im Industriesektor zur Wasserstoffherstellung durch H₂-Elektrolyse macht sowohl in 2030 als auch in 2045 nur etwa 6 TWh aus.

Abb. 7.3 Endenergieverbrauch nach Energieträger und Verwendung nach Branchen
Angaben in TWh



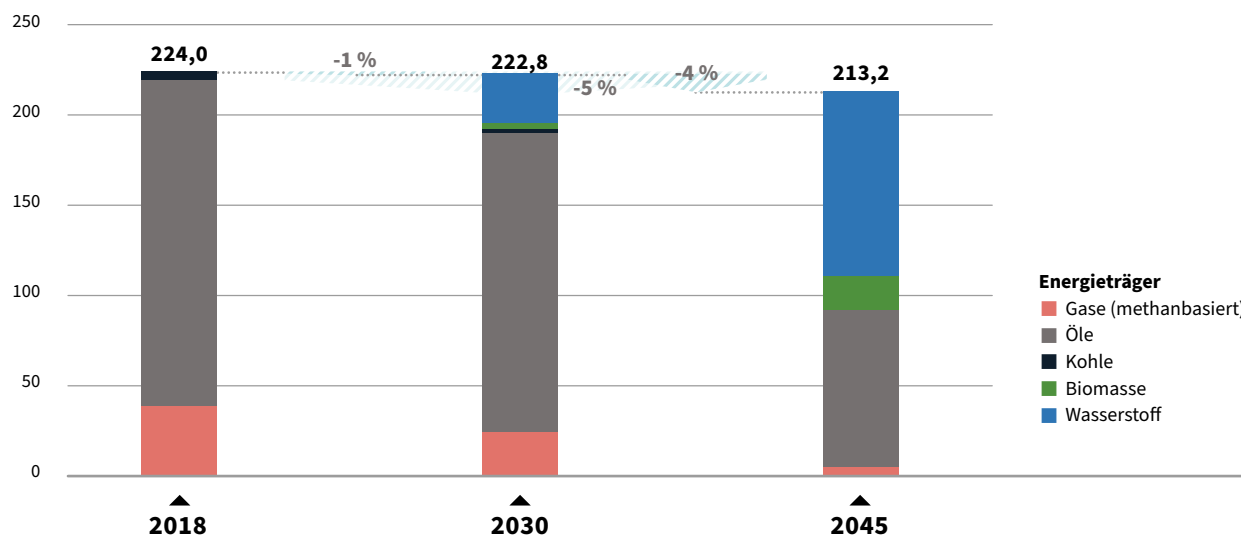
Energieträger (TWh)	2018	2030	2045
Kohle	117,9	62,9	0,1
Gase (methanbasiert)	234,1	146,4	60,2
Öle	14,1	7,0	0,4
Strom	226,1	263,1	310,7
Biomasse (fest)	26,9	45,6	55,0
Wasserstoff	0,0	24,1	87,9
Fernwärme	53,2	50,7	48,3
Sonstige	49,7	38,0	15,1
Summe	722,0	637,8	577,7

Branche (TWh)	2018	2030	2045
Chemie	151,6	146,4	161,1
Eisen & Stahl	177,7	146,9	92,5
Glas & Keramik	28,6	24,7	25,7
Nichteisenmetalle	22,1	22,2	26,5
Papier	58,3	51,2	49,7
Sonstige Industrie (inkl. ODS)	223,4	191,8	171,9
Steine und Erden	60,3	54,3	50,2
Summe	722,0	637,5	577,6

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Abb. 7.4 Stofflicher Einsatz von Energieträgern

Angaben in TWh



Energieträger (TWh)	2018	2030	2045
Gase (methanbasiert)	38,6	24,4	4,9
Öle	180,8	165,5	86,9
Kohle	4,6	2,3	0,0
Biomasse	0,0	3,2	18,8
Wasserstoff	0,0	27,4	102,6
Summe	224,0	222,8	213,2

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

THG-Minderung durch Energieeffizienz

Zur kontinuierlichen Steigerung der Energieeffizienz bei Kern- und Querschnittstechnologien sollten bestehende Instrumente, insbesondere **Förderprogramme** wie „Energieeffizienz in der Wirtschaft“, weitergeführt und verbessert werden, vor allem indem die Themen Minderung absoluter THG-Emissionen und Transformation zur Klimaneutralität in den Mittelpunkt gestellt werden.

Neue Effizienztechnologien sollten in der Hochlaufphase gezielt unterstützt werden, indem etwa Sonderförderprogramme aufgelegt werden, bis eine kritische Schwelle der Marktdurchdringung erreicht ist.

Energiemanagementsysteme bzw. **Energieaudits** sollten weiterentwickelt werden zu verpflichtenden, integrierten Energie-, Klima- und Ressourcenmanagementsystemen („Umweltmanagement“ bzw. „Umweltaudits“), um Unternehmen bei kontinuierlichen Verbesserungen in der Klimabilanz und der Entwicklung eines Transformationspfads hin zur Klimaneutralität zu unterstützen und zu fordern. Die Einführung muss einhergehen mit einer verbesserten externen Beratung, der Installation von Mess- und Sensorik-Technologien sowie entsprechender Schulung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu Umweltbeauftragten. Der Mittelstand sollte bei der Planung der Transformation und die Einführung dieser Systeme im Besonderen unterstützt werden.

Für besonders wirtschaftliche Maßnahmen aus **Umweltaudits** sollte eine Umsetzungspflicht eingeführt werden, bzw. eine Begründungspflicht, falls die Maßnahmen nicht umgesetzt werden. Dies ist für Querschnittstechnologien, die oft nicht im Fokus der Geschäftsführung stehen, besonders relevant. Um die Akzeptanz von Energieaudits nicht zu schwächen, sollte diese Verpflichtung stärker mit pragmatischen Förder- und Finanzierungsmöglichkeiten verzahnt werden.

Die bestehenden **Unternehmensnetzwerke** für Energieeffizienz sollten um eine stärkere Betrachtung ganzheitlicher Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsmaßnahmen ergänzt werden. Hierzu sollten die in Netzwerken organisierten Unternehmen auch gemeinsam Klimaschutzmaßnahmen und Transformationsstrategien hin zur Klimaneutralität diskutieren und definierte Ziele anstreben.

Stärkung der Material- und Ressourcensparsamkeit

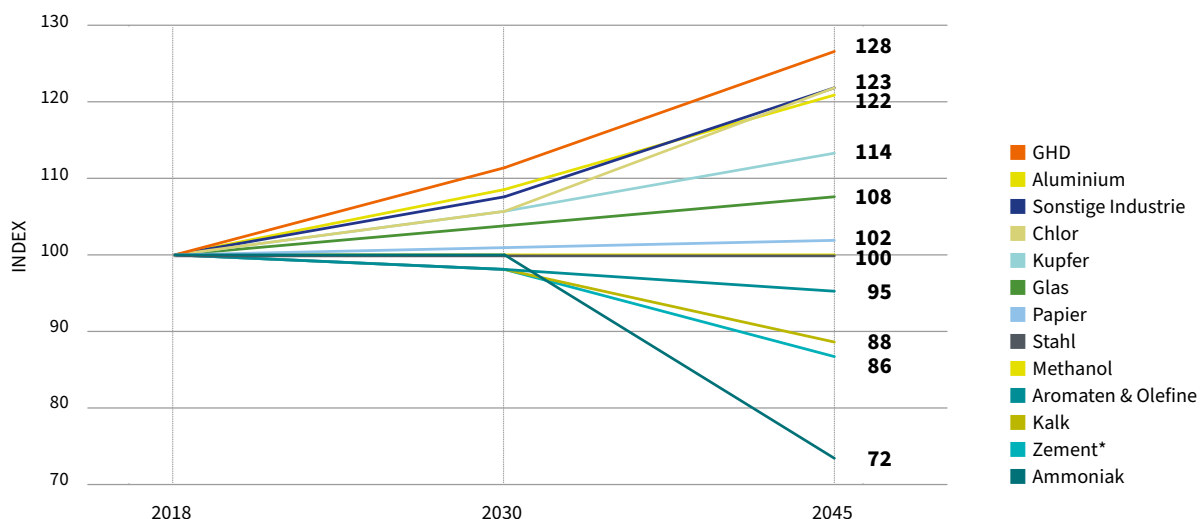
Für die Erhöhung der Ressourceneffizienz gibt es verschiedene Ansätze. Ziel ist dabei immer, die gleiche (wirtschaftliche oder gesellschaftliche) Wertschöpfung durch einen geringeren Einsatz von Ressourcen zu erreichen. Dies kann etwa durch Materialeffizienz erreicht werden, also die Konzeption und Herstellung von Produkten mit geringerem Materialeinsatz (z. B. Leichtbauweise,

Reduktion von Überdimensionierung), durch eine Senkung der Nachfrage für neue Produkte (etwa durch Erhöhung der Langlebigkeit, Vermeidung gewisser Konsumformen oder Verbesserung der Auslastung), durch die Erhöhung von Recycling- und Wiederverwendungsquoten und damit der Senkung des Primärstoffeinsatzes, oder auch durch die Substitution durch weniger energieintensive Produkte oder Materialien, wo die Anwendung es zulässt (z. B. Substitution von Plastik- durch Papierverpackungen, Förderung der Holz-Hybridbauweise, etc.).

Die Annahmen für Produktionsmengen in der Modellierung erfordern bereits ein erhebliches Maß an Materialeffizienz, da sonst die Produktion bei kontinuierlichem Wirtschaftswachstum sehr viel stärker steigen müsste. Damit der Ressourcenverbrauch weitgehend vom Wirtschaftswachstum entkoppelt werden kann, sind Anreize und Vorschriften zur Erhöhung der Effizienz erforderlich. Ebenfalls wurden in der Modellierung Annahmen zur Erhöhung der Sekundärmaterialanteile angenommen.

Die Einsparpotenziale sind erheblich: So benötigt zum Beispiel die Herstellung von einer Tonne Recycling-Aluminium nur ca. 5 Prozent des Endenergieverbrauchs einer Tonne Primär-Aluminium.¹⁰ Eine Tonne eingesparten Primärstahls führt zu über 1,5 Tonnen CO₂-ä vermiedener Emissionen. Auch können Umweltschäden durch Rohstoffabbau vermieden werden und die Abhängigkeit der deutschen Wirtschaft von Rohstoff- und Energieimporten gesenkt.

Abb. 7.5 Produktionsmengenentwicklung im Sektor Industrie



* Sinkende Zement-Produktionsmengen sind auf Effizienzgewinne bei Formulierung und Verwendung von Beton zurückzuführen. Siehe auch: Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), 2020

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

¹⁰ Gesamtverband der Aluminiumindustrie e. V., kein Datum.

Um diese Ziele zu erreichen, soll eine gesamtwirtschaftliche **Circular-Economy-Strategie** entwickelt werden, die über die gesamte Produktionskette wirkt, von der Produktion und dem Einsatz von Primärrohstoffen, über Produktdesign und die Produktnutzungsphase, bis zum Produktlebensende und der Verwertung. Dafür gibt es Instrumente, die an allen Stufen der Wertschöpfungskette ansetzen. Dabei sollen die Verbesserung der Effizienz und die Verringerung des THG-Fußabdruckes in einer Lebenszyklus-Betrachtung die entscheidenden Kriterien sein. Im Rahmen dieser Strategie ist eine Kombination von Instrumenten sinnvoll, die Markt- bzw. Preisanreize, Ordnungsrecht und den Abbau von Hindernissen verbinden.

Eine **Endverbrauchsabgabe** (auch „Klima-Umlage“) auf energieintensive Produkte kann eine steuernde Wirkung für Konsum und Produktdesign entfalten und für mehr Kostengerechtigkeit durch eine teilweise Internalisierung externer Kosten sorgen:

Aktuell wird der Carbon Leakage Schutz bei der Produktion Energie- und THG-intensiver Produkte in Deutschland und Europa primär durch die Befreiung von gewissen staatlich induzierten Komponenten bei Energie- und CO₂-Preisen gewährleistet, u. a. durch die kostenlose Zuteilung im ETS. In Zukunft soll die Umstellung auf klimaneutrale Verfahren durch CCfD zusätzlich gefördert werden. Diese Maßnahmen, die je nach Definition, als Subventionen betrachtet werden können,¹¹ führen dazu, dass durch die CO₂-Bepreisung intendierte Preissignale nicht an die

Konsumenten weitergegeben werden und somit THG-intensive Produkte stärker nachgefragt werden. Ein Abbau ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da Produzenten in anderen Ländern ähnlich bevorzugt werden. Eine Endverbrauchsabgabe auf in Deutschland verkaufte Produkte kann diese Subventionen teilweise ausgleichen, ohne die Produzenten zu belasten.

Diese Abgabe sollte sich an dem THG-Fußabdruck sowie der Energieintensität von Produkten orientieren. In einem ersten Schritt können dafür einheitliche Benchmark-Werte für Produktkategorien zugrunde gelegt werden unabhängig von der Herstellungsweise. Sobald adäquate Tracking-Systeme verfügbar sind, kann sich die Abgabe am spezifischen THG-Fußabdruck bemessen. Die Einnahmen aus dieser Bepreisung können eine stabile Finanzierung von Maßnahmen zur Umstellung auf THG-arme Verfahren wie CCfD sicherstellen, ohne dass zusätzliche Steuer-gelder aufgewendet werden müssen.

Sharing-Konzepte sollten ausgebaut werden, um die Nachfrage nach Besitz besonders energieintensiver Produkte zu verringern. Vor allem ist dies im Mobilitätsbereich relevant. **Fehlzanreize**, die zu einem höheren Materialeinsatz oder schwereren Produkten führen, sollten abgebaut werden. Als Beispiel ist hier die Flottengrenzwertregelung für Pkws zu nennen, die schwereren Pkws höhere Verbrauchswerte erlaubt und daher Anreize zum Bau schwerer Fahrzeuge setzt.

7.2 Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten schaffen

Aktuell gibt es an Märkten nur eine geringe Honorierung klimafreundlich hergestellter Produkte. Sofern sie teurer sind als konventionelle Produkte, also wenn die CO₂-Vermeidungskosten über dem CO₂-Preis-Niveau liegen, kann es für Unternehmen schwierig sein, Abnehmer zu finden. Dies hemmt die Investitionsbereitschaft für Unternehmen, in den Aufbau entsprechender Produktionsverfahren zu investieren. Die Sicherstellung einer Nachfrage nach THG-arm produzierten Stoffen, insbesondere Grundstoffen, mindert das Risiko solcher Investitionen. Zudem wird bei der Einbeziehung importierter Produkte ein Anreiz zur Umstellung industrieller Produktionsprozesse auf klimaneutrale Verfahren auch über die Landesgrenzen hinaus geschaffen. Dies kann wiederum einen positiven Effekt auf die Exportmärkte deutscher Industrieunternehmen haben.

Da es aktuell keine transparente, obligatorische und einheitliche Ausweisung von THG-Fußabdrücken von Produkten gibt, sind

Voraussetzung für informierte Kaufentscheidungen ist Transparenz über spezifische CO₂-Emissionen

THG-arme kaum von konventionellen Produkten unterscheidbar; Unternehmen und Endverbraucher können somit keine informierte Entscheidung beim Einkauf treffen. Das obligatorische Ausweisen der

THG-Fußabdrücke dient damit dem besseren Funktionieren des Marktes, ist zudem aber auch Voraussetzung für die gezielte Beschaffung und/oder Förderung THG-armer Produkte.

¹¹ Diskussion des Subventionsbegriffes siehe z. B. Bundesministerium der Finanzen (BMF), 2021.

Die Kennzeichnung des THG-Fußabdrucks kann bereits einen **Anreiz** für Kunden schaffen, sich für „grüne“ Produkte zu entscheiden, und somit für Unternehmen, diese bevorzugt einzusetzen. Imagesensible Kategorien oder „Premium“-Produkte könnten hier bereits ohne staatliche Verpflichtungen eine Vorreiterrolle einnehmen, zumal die Mehrkosten für „grüne“ Materialien am Produkt-Endpreis oft gering sind. Als Beispiel: Der Mehrpreis für THG-armen Stahl in der PKW-Fertigung würde deutlich unter 1 Prozent des Verkaufspreises ausmachen.

Der Staat sollte daher die Kennzeichnung des **THG-Fußabdrucks** (Product Carbon Footprint, PCF) für in Deutschland produzierte und nach Deutschland importierte Zwischen- und Endprodukte¹² vorschreiben, wobei eine Ausweitung auf EU-Ebene anzustreben ist. Der THG-Fußabdruck muss über die komplette Lieferkette ermittelt, erfasst und festgehalten und in jeder Wertschöpfungsstufe angegeben und weitergereicht werden, inklusive der kompletten Vorkettenemissionen, die zum Beispiel bei der Erzeugung der verwendeten Energieträger anfallen.

Für die Ausweisung des THG-Fußabdrucks gibt es schon heute zertifizierbare Standards, beispielsweise aus der ISO-14000er-Reihe, den EU Product Environmental Footprint (PEF) oder den GHG Protocol Product Life Cycle Standard. Um Standardisierung und Vergleichbarkeit der PCFs zu gewährleisten, müssen Regeln für Produktkategorien (Product Category Rules) erarbeitet bzw. harmonisiert werden. Hierbei ist die Beteiligung von Wissenschaft, Politik und der betroffenen Branche sicherzustellen. KMUs sollten bei der Einführung unterstützt werden, nach Möglichkeit basierend auf Opensource-Bilanzierungstools und hochwertigen Datenbanken (z. B. EcoInvent oder GaBi). Für Produktkategorien wie etwa Biokraftstoffe existieren bereits etablierte internationale Nachweissysteme, die ggf. ausgeweitet werden könnten.

Die Zertifizierung könnte in einer Übergangszeit oder für importierte Waren freiwillig sein. Produkte, für die kein zertifizierter PCF vorliegt, würden mit dem höchsten THG-Fußabdruck der Produktkategorie (anhand Benchmark) bilanziert, mit einem Hinweis wie „Dieses Produkt kann bis zu X Tonnen CO₂e verursacht haben“.

Für Endverbraucherinnen und Endverbraucher könnte der PCF ergänzt werden durch eine einfache **Kennzeichnung** zur schnellen Orientierung, ähnlich der bestehenden Energieeffizienz-Kennzeichnung mit einer Einordnung anhand einer Farbskala, welche die Klimawirksamkeit im Vergleich zu anderen Produkten derselben oder vergleichbarer Produktgruppen darstellt. Die Einführung dieser Systeme sollte flankiert werden durch entsprechende Informationskampagnen.

Unternehmen mit Geschäftstätigkeiten in Deutschland bzw. der EU sollten verpflichtet werden, ihre **THG-Emissionen** (Scope 1, 2 und 3) auf **Gesamtunternehmensebene** zu veröffentlichen, inklusive der daraus resultierenden möglichen Risiken. Zudem sollten verbindliche **Standards** geschaffen werden, nach denen sich Unternehmen als **klimaneutral** bezeichnen können. Dies sollte eine Verpflichtung zur Entwicklung eines plausiblen Reduktionspfades für Emissionen beinhalten, verbunden mit Kompensation (noch) nicht vermeidbarer Emissionen nach zertifizierten Standards im Rahmen von Projekten zur CO₂-Vermeidung oder -Entfernung.

Begleitend dazu sollte eine gezielte Nachfrage nach klimaneutralen Produkten in Form von **Leitmärkten** geschaffen werden, um Anbietern zusätzliche Investitionssicherheit für die Investition in

Leitmärkte erzeugen planbare Nachfrage für grüne Produkte. Hier hat der Staat eine doppelte Verantwortung: Als Rahmensetzer und Nachfrager

klimafreundlichere Verfahren zu ermöglichen und somit die Entwicklung zu beschleunigen. Ein wichtiges Instrument ist die Einführung von **Quoten für grüne Produkte**. Dabei soll in bestimmten Produktkategorien ein gewisser, steigender Anteil THG-armer Mate-

rialien (z. B. grüner Stahl) verpflichtend zum Einsatz kommen. Diese Quoten sollten möglichst technologieoffen ausgestaltet werden, orientiert am THG-Fußabdruck über den gesamten Herstellungsprozess.

Die öffentliche Verwaltung sollte bei Beschaffungsprojekten konsequent die THG-Fußabdrücke von Produkten und Materialien als Entscheidungskriterium berücksichtigen und THG-arme bzw. grüne Produkte bevorzugen. Der Staat hat mit einem jährlichen Beschaffungsvolumen von etwa 300 Milliarden einen großen Hebel, um THG-Emissionen einzusparen und zur Entwicklung eines Leitmarktes für grüne Produkte beizutragen. Dabei sollte eine technologieoffene Ausgestaltungsvariante wie die Einführung eines ausreichend hohen CO₂-Schattenpreises gewählt werden.

¹² Neben industriellen Produkten ist dies grundsätzlich auch für Lebensmittel und Beförderungsdienstleistungen sinnvoll.

7.3 Schnelle Umstellung auf emissionsarme Produktionsverfahren

Viele Produktionsprozesse sind über mehrere Jahrzehnte immer weiter ausgereift worden. Obgleich weitere Effizienzsteigerungen insbesondere durch systemübergreifende Optimierungen möglich sind, so ist die erzielbare THG-Minderung doch begrenzt. Um klimaneutral produzieren zu können, müssen fossile Brennstoffe – in erster Linie Erdgas und Kohle – komplett durch klimaneutrale Energieträger ersetzt sowie entstehende Prozessemissionen vermieden werden. Dafür sind in vielen Fällen grundlegend neue, emissionsarme, innovative Technologien (Low Carbon Break through Technologies, LCBT) sowie neue Prozesse und Verfahren erforderlich.

Für alle relevanten Branchen existiert eine Auswahl an heute oder in naher Zukunft verfügbaren LCBT; für die Anwendung auf industriellem Niveau sind allerdings teilweise noch weitere Investitionen in die Erforschung und Pilotierung notwendig. Im Rahmen der Hochskalierung werden weitere Kostendegressionen und energetische Optimierungen möglich sein.

In der Modellierung wurden für die wichtigsten Prozesse Prozessumstellungen angenommen. Viele dieser Verfahren sind aktuell noch deutlich teurer als konventionelle Produktionsverfahren, sei es durch ihre technische Neuheit, sei es durch die höheren Preise der eingesetzten Energieträger (insbesondere grüner Wasserstoff), sei es durch den Aufwand der Umstellung. Idealerweise würde die Transformation durch den CO₂-Preis genügend angereizt werden. Allerdings übersteigen die CO₂-Vermeidungskosten dabei oft das aktuelle CO₂-Preis-Niveau von ca. 60 Euro/Tonne im EU-ETS (September 2021).¹³ Um die Klimaziele 2030 zu erreichen, aber auch um die Weichen für die langfristige Transformation rechtzeitig zu stellen (u. a. im Hinblick auf notwendige Investitionszyklen zur Erneuerung bestehender Anlagen), muss die **Umstellung der Produktion auf diese LCBT** schon bis Mitte des Jahrzehnts im großen Maßstab begonnen werden. Dafür müssen geeignete **Investitions- und Marktbedingungen** geschaffen werden, damit die mit diesen neuen Verfahren produzierten Produkte wettbewerbsfähig werden.

TRANSFORMATION DER CHEMIEINDUSTRIE



Für die Chemieindustrie wurden in dieser Studie die Herstellung der folgenden Produkte detailliert modelliert: Ammoniak, Chlor sowie organische Grundchemikalien wie Methanol und die wichtigsten Olefine und Aromaten (Ethylen, Propen, Benzol, etc.). Die energetischen Emissionen können durch die Substitution von Erdgas durch Wasserstoff und Strom weitgehend vermieden werden. Der Endenergiebedarf in der Produktion steigt dabei nur leicht an (2018: 152 TWh, 2045: 161 TWh).

Die Komplexität des Transformationspfads der Chemieindustrie ergibt sich hauptsächlich daraus, dass stofflich eingesetzte fossile Energieträger der organischen Chemie größtenteils durch erneuerbare Alternativen ersetzt werden müssen. Heute findet die Herstellung von Methanol hauptsächlich durch Hydrolyse von Schweröl oder Erdgas statt, während für die Olefine und Aromaten Naphtha, Erdöl oder Erdgas im Steamcracker verarbeitet werden.

Im angenommenen Pfad wird Methanol durch Biomassevergasung oder durch Umsetzung von Wasserstoff mit aus der Luft (DACCU) oder Biomasse (BECCU) abgeschiedenem CO₂ synthetisiert. Olefine und Aromaten wiederum werden entweder aus Methanol gewonnen (MTO/MTA), oder aus „grünem Naphtha“ das mittels des Fischer-Tropsch-Verfahrens aus grünem Synthesegas hergestellt wurde. Etwa die Hälfte des verwendeten Methanols und das komplette Naphtha werden aus dem Ausland importiert.

Insgesamt beträgt der **Primär-Strombedarf** 2045 der Chemieindustrie 379 TWh. Davon sind 81 TWh für den Prozessenergiebedarf im Inland erforderlich. Im Ausland sind es 105 TWh für die Herstellung von Naphtha und 86 TWh für die Herstellung von Methanol. Dazu kommen 107 TWh für die Produktion von grünem Wasserstoff, der ebenfalls hauptsächlich importiert wird.

Da der in der Chemieindustrie verwendete Kohlenstoff größtenteils aus erneuerbaren Quellen kommen wird, können Netto-Negativemissionen erzielt werden, wenn daraus langlebige Produkte hergestellt werden oder der Kohlenstoffkreislauf am Lebenszyklusende durch CCU oder CCS geschlossen wird. In der Modellierung wird mit einer Senkenleistung von 12 Millionen Tonnen CO₂ aus grünem Naphtha und grünem Methanol gerechnet (Siehe Kapitel 10 „Natürliche Ökosysteme und Senken“)

¹³ Für Vermeidungskosten einiger LCBT, siehe Agora Energiewende, 2019.

Abb. 7.6 Neue emissionsarme Produktions- und Verfahrenstechnologien (Low Carbon Breakthrough Technologies, LCBT)

Technologieübersicht

Produkte		Status Quo		Neu		
		Prozess	Hauptenergieträger	Prozess/Technologie	Hauptenergieträger	Anmerkung
Aluminium	Primär	Hall-Héroult, point feeder	Strom	Einsatz inerter Anoden	Strom	Vermeidung CO ₂ -Emissionen durch Anodenbrand
	Sekundär	Erdgas-Schmelzöfen	Erdgas	Hybrid-/Stromöfen	Strom und/oder Wasserstoff	
Ammoniak		Haber-Bosch, Steam Methane Reforming (SMR)	Erdgas (energetisch + stofflich)	Haber-Bosch mit grünem Wasserstoff	Wasserstoff bzw. Elektrolysestrom	
Aromaten & Olefine		Steam cracking	Fossiles Naphtha (nichtenergetisch)	Methanol to Olefins/Aromatics Steam cracking, grünes Naphtha	Strom (energetisch) PtL (stofflich)	Fossile werden durch erneuerbare Rohstoffe ersetzt, Elektrifizierung der Cracker
Glas		Klassische Schmelzwanne	Erdgas	Wasserstoff-Schmelzwanne Elektrische Schmelzwanne Hybridöfen	Strom, Wasserstoff	CCS für Prozess-emissionen möglich, in Modellierung nicht verwendet
Kupfer	Primär	Schmelzen und Raffination	Strom Erdgas Steinkohle	Umstellung von fossilen Energieträgern auf Strom und Wasserstoff	Wasserstoff, Strom	
	Sekundär	Kupferrecycling				
Methanol		Synthese aus: Partialoxidation von Schweröl Dampfreformierung von Methan	Schweröl/Erdgas	Synthese aus: Wasserstoff/CO₂ Biomassevergasung	Wasserstoff, Strom, Biomasse	Methanol dient auch zur Herstellung von Olefinen/Aromaten
Papier	Primär	Papierfaserherstellung (mechanisch/chemisch)	Strom Erdgas für Dampferzeugung	Elektrische Dampferzeugung (P2H/ Wärmepumpen)	Strom	
	Sekundär	Papierfaserherstellung (Recycling)				
Stahl	Primär	Hochofenroute/ Basic Oxygen Furnace Stahlverarbeitung mit Koksgas/Erdgas	Kokskohle	Direktreduktion + Elektrolichtbogenofen Stahlverarbeitung mit Wasserstoff	Wasserstoff, Strom	Komplett neuer Prozess
	Sekundär	Elektrolichtbogenofen	Strom	Elektrolichtbogenofen	Strom	Substitution fossiler Gase durch Wasserstoff
Zement		Halbtrockenverfahren	Alternative Brennstoffe Steinkohle	Trockenverfahren	Alternative Brennstoffe Biomasse	Einsatz von CCS für Prozessemissionen und energetische Emissionen (BECCS)
		Trockenverfahren				
GHD/ Sonstige Industrie		diverse Prozesse /Verfahren	diverse Energieträger	Substitution konventioneller Energieträger durch Strom, H ₂ und ggf. SNG	Strom	Erhebliche Effizienzgewinne durch Elektrifizierung

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Grundsätzlich gilt, dass mit Blick auf das Ziel der Erreichung von Klimaneutralität in weniger als 25 Jahren staatliche Förderprogramme nur noch solche Neuanlagen fördern sollten, die auch Klimaneutralitätskompatibel sind. Das bedeutet, dass keine Anlagen gefördert werden, die etwa durch die Festlegung auf fossile Brennstoffe nicht mit einer klimaneutralen Energiewelt kompatibel sind.¹⁴ Dies gilt ebenfalls für KWK-Anlagen, die nur noch H₂-ready als „iKWK“ („Innovative Kraft-Wärme-Kopplung“, die erneuerbare Energien und elektrische Wärmeerzeuger integriert mit netzdienlichem Einsatz) verbaut werden sollten.

Um den Technologiewechsel zu beschleunigen und bereits vor der ausreichenden Verfügbarkeit von Wasserstoff CO₂-Emissionen zu reduzieren, kann bei einzelnen Prozessen übergangsweise von Kohle auf Erdgas umgestellt werden. Eine Voraussetzung dabei ist, dass diese Prozesse zu einem späteren Zeitpunkt (bei Verfügbarkeit ausreichend großer Mengen grünen Wasserstoffs) ohne größere Anpassungen bzw. erneute Investitionsbedarfe mit Wasserstoff betrieben werden können. Besonders relevant ist dies in der Stahlindustrie, wo Hochöfen schnellstmöglich auf Direktreduktionsanlagen (DRI) umgestellt werden sollten, da diese schon beim Betrieb mit Erdgas erhebliche THG-Einsparungen gegenüber den heute üblichen Kohlekoks-basierten Verfahren ermöglichen.

Eine zentrale Rolle, um neue Produktionsverfahren konkurrenzfähig zu machen, spielen die **Betriebskosten** (Operational Expenditure, OpEx), die aufgrund verfahrensbedingter Gründe oder der Energieträgerkosten meist noch höher als bei konventionellen Verfahren sind.

Um mit neuen Verfahren und klimaneutralen Energieträgern hergestellte Produkte marktgängig zu machen, können Instrumente zum Ausgleich der Mehrkosten erforderlich sein. Dabei können sogenannte **CO₂-Differenzverträge** (Carbon Contracts for Difference, CCfD)¹⁵ ein geeignetes Mittel sein. CCfD gleichen Mehrkosten für klimafreundliche Schlüsseltechnologien aus, solange deren CO₂-Vermeidungskosten über dem CO₂-Preis-Niveau liegen. Differenzverträge reduzieren das Risiko hinsichtlich der CO₂-Preis-Entwicklung für Unternehmen und erhöhen so die Planbarkeit und Investitionssicherheit. CCfDs sind insbesondere in Branchen sinnvoll, wo zur Umstellung auf emissionsarme Verfahren große Investitionen mit langen Planungsvorläufen und/oder langen Amortisationszeiten vorgenommen werden müssen und der CO₂-Preis auch perspektivisch nicht ausreichend sein wird, um die notwendigen Investitionen allein in einer betriebswirtschaftlichen Investitionskostenrechnung zu rechtfertigen. Hierdurch können langfristig notwendige Investitionen bereits kurzfristig „nach vorne gezogen“ werden, wodurch ein wichtiger Beitrag zur Erreichung der Sektorziele 2030 geleistet würde. Gleichzeitig wird vermieden, dass Unternehmen anstehende

Ersatz- und Erneuerungsinvestitionen in Produktionsanlagen basierend auf den aktuellen CO₂-Preisen (bzw. Preiserwartungen) in konventionelle Verfahren tätigen und damit ein Lock-in in Prozesstechnologien und -anlagen entsteht, die später nicht auf emissionsarme Verfahren oder/und Energieträger umgestellt werden könnten. Langfristig sollen LCBT durch den CO₂-Preis wettbewerbsfähig werden und CCfDs somit nicht mehr erforderlich sein.

In der Hochskalierungsphase für LCBT, oder für Investitionen, die allein aus Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen derzeit nicht erfolgen würden, beispielsweise wenn die Ersatzinvestitionen in neue Produktionsverfahren außerhalb der üblichen Investitionszyklen erfolgen würde, kann zusätzlich eine **Investitionsförderung** sinnvoll sein, um die Entwicklung zu beschleunigen. Um eine Marktverzerrung zu vermeiden, sollte diese Förderung jedoch zeitlich begrenzt sein: Mittelfristig müssen notwendige Investitionen aus Eigenleistung der Industrie erbracht werden. Zur Senkung der Kapitalkosten für Unternehmen sollten Finanzierungsinstrumente wie vergünstigte Kredite oder Risikobürgschaften angeboten werden.

Wichtig ist, dass Instrumente auf der Nachfrageseite (z. B. Quoten) und eventuelle Förderungen auf der Angebotsseite sinnvoll verzahnt werden, damit die Klimaziele sicher erreicht werden können und gleichzeitig Unter- oder Überförderung sowie Mitnahmeeffekte vermieden werden. Dafür sind eine sorgfältige Planung und Kalkulation im Rahmen eines Impact Assessments erforderlich. Förderprogramme sollten möglichst haushaltsunabhängig gestaltet werden, etwa durch spezielle Fonds oder refinanziert durch Endverbrauchsabgaben oder -umlagen.

Der Einsatz von CCU/S wird nötig sein, um schwer vermeidbare Prozessemissionen abzuscheiden und dadurch Negativemissionen zu erreichen bzw. geschlossene Kohlenstoffkreisläufe zu schaffen. Dazu muss möglichst bald mit dem Hochlauf von regionalen, nationalen und internationalen Strukturen für CO₂-Abscheidung, -Transport und -Lagerung begonnen werden, und ein gesellschaftlicher Dialog mit möglichen Stakeholdern geführt werden. THG-Vermeidung muss jedoch weiterhin Vorrang vor CCS und CCU haben (siehe Kapitel 10 „Natürliche Ökosysteme und Technische Senken“).

Um den Einsatz von LCBT zu ermöglichen, müssen ebenfalls die notwendigen **Infrastrukturen** geschaffen werden, insbesondere zur Bereitstellung erneuerbarer Energieträger (Strom und Wasserstoff) sowie für den Transport von CO₂. Um die Verfügbarkeit dieser Energieträger sicherzustellen, sind ein schneller Ausbau der erneuerbaren Energien sowie der Aufbau internationaler Wasserstoff-Partnerschaften unabdingbar.

¹⁴ Ausnahmen sind allenfalls dort sinnvoll, wo innerhalb der begrenzten Lebensdauer der Anlage besonders hohe THG-Einsparungen erzielt werden können, oder die neue Technologie noch nicht verfügbar ist.

¹⁵ Lösch, 2021.

CCfD IN DER INDUSTRIE

CO₂-Differenzverträge zur Dekarbonisierung der Industrie – Was ist das und wie können solche CCfDs ausgestaltet sein?

CO₂-Differenzverträge (Carbon Contracts for Difference, CCfD) in der Industrie sind projektbezogene Verträge zwischen Unternehmen und der öffentlichen Hand, die Mehrkosten für emissionsarme Schlüsseltechnologien gegenüber konventionellen Produktionsmethoden (teilweise) ausgleichen sollen. Durch die Unterstützung für den Einsatz dieser Verfahren, bei denen die produktbezogenen CO₂-Vermeidungskosten in den nächsten Jahren noch deutlich über dem CO₂-Preisniveau liegen, soll Planbarkeit für den Betrieb dieser Technologien unabhängig vom tatsächlichen CO₂-Preis ermöglicht werden.

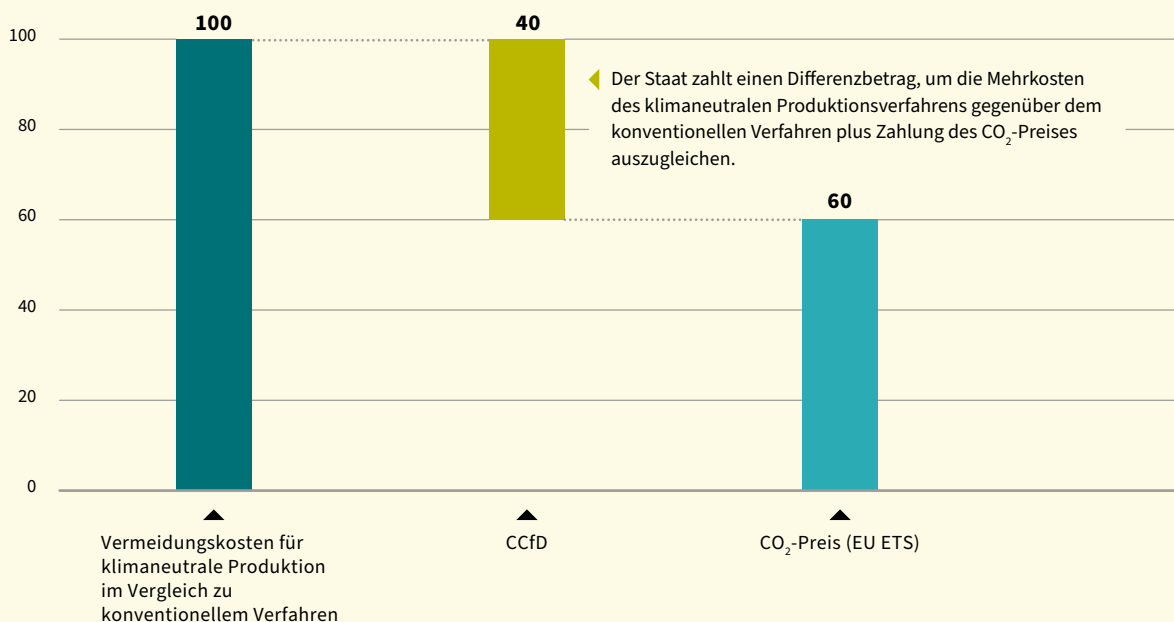
Die Höhe der Verträge bzw. der Ausübungspreis (der sogenannte „Strike price“) soll dabei über produkt- bzw. branchenspezifische Ausschreibungen ermittelt werden. Die Ausschreibungen sollten technologieoffen sein, aber begrenzt auf Technologien, die mit einer langfristig klimaneutralen Industrie vereinbar sind. Die Dauer eines CCfD muss projektspezifisch festgelegt werden und kann sich an den Abschreibungsdauern oder der tatsächlichen Betriebsdauer einer Anlage orientieren, wobei die Eigenheiten der einzelnen Sektoren berücksichtigt werden müssen. Da bei einem höheren CO₂-Preis das Unternehmen Geld zurückzahlen muss, kann auf Wunsch des Unternehmens auch eine kürzere Laufzeit gewählt werden. Langfristig soll die klimaneutrale Wertschöpfung der Industrie ohne Unterstützung erfolgen können.

Wichtigster Kostenfaktor sind die Mehrkosten erneuerbarer Energieträger (meist Wasserstoff oder Grünstrom) und Rohstoffe (z. B. Biomasse oder „grünes Naphtha“), die in der Vertragsgestaltung für CCfD im Rahmen eines vertraglich vereinbarten Monitorings indexiert werden sollten, um ein Kostenrisiko oder eine Überförderung zu vermeiden.

Um Klimaschutzverträge nicht von der Haushaltslage abhängig zu machen, aber auch um die Verursachergerechtigkeit zu stärken, sollte eine stabile Refinanzierungsmöglichkeit geschaffen werden, etwa eine Endverbraucherabgabe, die zusätzliche eine steuernde Wirkung haben kann, und deren Auswirkung auf die Verbraucher typischerweise gering wäre.

Abb. 7.7 Funktionsweise CO₂-Differenzverträge (Carbon Contracts for Differences, CCfD)

Angaben in € je t CO₂



Quelle: Eigene Darstellung.

Es ist zu erwarten, dass der aktuelle **Fachkräftebedarf** durch die Energiewende in der Industrie noch weiter steigen wird. Daher bedarf es einer flankierenden Ausbildungs- und Qualifizierungssoffensive für Fachkräfte, zum Beispiel Anlagenbauer oder Prozessingenieure. In den Ausbildungsprogrammen sollten Klimaschutzrelevante Technologien und Inhalte stärker berücksichtigt werden. Auch die **Zuwanderungspolitik** sollte den Fachkräftebedarf berücksichtigen (siehe auch Exkurs „Arbeit und Fachkräfte in der Transformation“).

Die **Technologieentwicklung** von Verfahren mit Potenzial für THG-Einsparungen muss beschleunigt werden, sowohl für einsatzbereite Verfahren mit hohem „Technology Readiness Level“ als auch für zukünftige Technologien. Neben der gezielten Forschungsförderung spielen dabei Pilotprojekte und Reallabore zur Hochskalierung eine wichtige Rolle. Die Mittel für energiebezogene Forschung und Entwicklung sollten erhöht und universitäre und privatwirtschaftliche Forschung sollte besser verzahnt werden.

7.4 Sicherung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit

Das sich verändernde wirtschaftliche und regulatorische Umfeld im Rahmen von Klimaschutz und Energiewende ist eine Herausforderung für Unternehmen, besonders für stark im internationalen Wettbewerb stehende Branchen.

Dabei besteht einerseits das Risiko von **Carbon Leakage**, also einer durch steigende CO₂-Preise und sonstige Auflagen getriebenen Abwanderung von Unternehmen in Länder mit geringeren Umweltstandards oder fehlenden CO₂-Bepreisungssystemen, wo die Herstellung der emissionsintensiven Produkte ohne bzw. mit geringeren Umwelt- und Klimaschutzkosten fortgesetzt werden kann.

Ein gegenteiliges Risiko für die Wettbewerbsfähigkeit ist **Green Leakage**. Hierunter versteht man die Abwanderung von Unternehmen oder Produktionsstufen in Länder mit besseren Bedingungen für klimafreundliche Produktion – sei es durch die kostengünstige Verfügbarkeit klimaneutraler Energieträger wie erneuerbarem Strom¹⁶ oder den technologischen Fortschritt der dortigen Industrie. Beschleunigende Faktoren sind stärkere internationale Klimaschutzbemühungen, eine zunehmende Nachfrage nach THG-arm hergestellten Produkten sowie die Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Transport von Wasserstoff.

Die Umstellung auf neue THG-neutrale Verfahren ist daher auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten erforderlich: Falls die Umstellung auf emissionsarme Verfahren nicht gelingt, wird die deutsche Industrie einen Teil ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit einbüßen und die Zukunft des Produktionsstandortes Deutschland im Wirtschaftsraum Europa gefährden.

Für die Transformation in der Industrie ist ein schnellerer EE-Ausbau in Deutschland notwendig, um international konkurrenzfähige Stromkosten sicherzustellen. Zudem bedarf es geeigneter Mittel zum Carbon-Leakage-Schutz, welche die Konkurrenzfähigkeit inländischer bzw. europäischer Hersteller bei steigenden CO₂-Preisen auf dem Binnen- und Weltmarkt ermöglichen.

Bereits die Ausweisung des THG-Fußabdrucks von Produkten birgt einen gewissen Schutz vor Importen aus Ländern mit geringeren Umweltstandards oder ineffizientem Einsatz fossiler Energieträger. Um ein tatsächliches „Level Playing Field“ zwischen inländischen und ausländischen Produzenten aus Ländern ohne äquivalente CO₂-Bepreisung sicherzustellen, sind jedoch weitere Maßnahmen erforderlich. Insbesondere kann dafür ein Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) sinnvoll sein, der für Importe in die EU eine am THG-Ausstoß der Produkte orientierte Abgabe erhebt. Zur genauen Ausgestaltung dieses Instruments gibt es verschiedene Vorschläge¹⁷ (siehe auch Kapitel 5 „Internationale Einbettung“). Wichtig ist, dass ein effektiver Carbon Leakage Schutz gewährleistet wird, damit die europäische Industrie Sicherheit für ihren ambitionierten Weg zur Klimaneutralität hat.

Um die WTO-Kompatibilität zu gewährleisten, muss ein CBAM nach Einschätzung der EU-Kommission¹⁸ dabei nach einer Übergangsfrist die kostenlosen Zuteilungen von Emissionserlaubnissen für die Industrie ablösen. Für Exporte aus der EU sollte daher eine entsprechende Ausgleichsregelung zum Tragen kommen, damit europäische Unternehmen in ihren Exportmärkten wettbewerbsfähig bleiben können.

¹⁶ Faktoren sind neben den Erzeugungsbedingungen für erneuerbare Energien (Sonneneinstrahlung, Windintensität) auch die politischen Rahmenbedingungen für deren Ausbau.

¹⁷ Stiftung Umweltenergierecht (SUER), 2021a.

¹⁸ Simon, 2021.

Ein geeignet ausgestalteter Mechanismus könnte auch in den außereuropäischen Produktionsländern Anreize zur Dekarbonisierung schaffen, kann aber nur erfolgreich sein, wenn seine Einführung von intensiver diplomatischer Überzeugungsarbeit begleitet wird.¹⁹ Für die Erhebung des CBAM sollte es Ausnahmeregelungen für Entwicklungsländer geben, etwa eine Mindestschwelle der Importmengen, ab welcher der Mechanismus greift, damit der europäische Markt nicht gegenüber kleineren Entwicklungsländern abgeschottet wird.²⁰ Diese sollten besser über bilaterale Kooperationen bei der Dekarbonisierung unterstützt werden.

Diese Maßnahme sollte eingebettet werden in eine gesamtheitliche Strategie im Rahmen einer **internationalen Handels- und Industriepolitik**, die über eine geschickte Klimadiplomatie eng mit internationalen Partnern zusammenarbeitet und auf Verbünde mit kompatiblen Regeln zur CO₂-Erfassung und -Bepreisung wie Klimaclubs hinarbeitet (siehe auch Kapitel 5 „Internationale Einbettung“). Dies kann helfen, gemeinsame Standards zur Ermittlung aussagekräftiger THG-Fußabdrücke durchzusetzen, Umgehungsmöglichkeiten zu verhindern und den CBAM gegenüber etwaigen Einwänden durchzusetzen.

Im Rahmen der Neustrukturierung industrieller Wertschöpfungsketten ist die Verlagerung einzelner Schritte oder ganzer Wertschöpfungsketten ins Ausland möglich. Dadurch entstehende nachteilige Effekte für die heimische Wirtschaft und Gesellschaft müssen durch frühzeitiges Steuern der Politik vermieden werden. Dafür sind transparente Entscheidungen der Politik über den strategischen Schutz bestimmter Industrien und die Umsetzung entsprechender geeigneter Interventionen nötig. Gleichzeitig ist – neben dem entschlossenen Ausbau der erneuerbaren Energien im Inland – auch der Aufbau weiterer bzw. neuer **Energiepartnerschaften** notwendig, um die notwendigen Mengen an grünem Wasserstoff und die für eine klimafreundliche Chemieindustrie erforderlichen Grundstoffe wie grünes Naphtha und sonstige Vorprodukte sicherzustellen.

7.5 Effizienter Einsatz klimaneutraler Energieträger – Strom und Wasserstoff

Zur Dekarbonisierung des Energiebedarfs industrieller Prozesse müssen fossile durch erneuerbare Energieträger ersetzt werden, wofür im Wesentlichen die Elektrifizierung und der Einsatz von Wasserstoff in Frage kommen, in geringerem Umfang auch andere Energieträger und Rohstoffe wie Biomasse oder erneuerbare Fernwärme. Dazu kommt die weitgehende Substitution von fossilen Grundstoffen durch klimaneutrale Alternativen. Im KN100-Szenario wird der Stromverbrauch 2045 im Vergleich zu heute um etwa 85 TWh (gut ein Drittel) auf 311 TWh gestiegen sein, 88 TWh grüner Wasserstoff wird direkt energetisch eingesetzt werden, dazu kommt die stoffliche Verwendung von 103 TWh Wasserstoff und 51 TWh des Wasserstoff-Derivates „grünes Naphtha“.²¹ Für die Energiebereitstellung des Industriesektors werden kohlenstoffbasierte Powerfuels aufgrund der höheren Kosten und des höheren Energieverbrauchs (durch Direct Air Capture, DAC, und Methanisierung bzw. Fischer-Tropsch-Synthese) voraussichtlich nicht eingesetzt.

Für ein Industrieunternehmen sind primär technische Überlegungen, aber auch Kostenerwägungen maßgeblich für die Entscheidung, welcher Energieträger gewählt wird. Viele Prozesse sind technisch festgelegt. In der Stahlindustrie wird beispielsweise von einer Primärstahlerzeugungsroute mittels Direktreduktion (mit Wasserstoff, übergangsweise gegebenenfalls mit Erdgas) und eines elektrischen Schmelzvorgangs (Lichtbogenöfen oder eventuell auch Einschmelzer) ausgegangen. Bei anderen Produktionsprozessen sind aktuell Produktionsrouten mit beiden Energieträgern in der Entwicklung oder Erprobung, etwa in der Glasindustrie. Hier ist noch offen, welche Technologie sich durchsetzen wird. Bei anderen Prozessen kann der Energiebedarf technisch problemlos durch Wasserstoff oder Strom gedeckt werden, insbesondere bei Niedrig- und Mitteltemperatur-Prozesswärme.

¹⁹ Dröge, 2021.

²⁰ Vorschläge z.B. hier: Lowe, 2021.

²¹ Zusätzlich werden 2045 noch ca. 50 TWh grünen Methanols importiert und in der Chemieindustrie stofflich eingesetzt.

Das Marktdesign sollte daher technologieoffen jedem Unternehmen beide Pfade zum Ausstieg aus der fossilen Energieträgernutzung ermöglichen. Eine Senkung der Abgaben auf den Strompreis ist Voraussetzung für die Elektrifizierung vieler Prozesse; auch für die Ermöglichung des Einsatzes grünen Wasserstoffs wird es Anpassungen im Marktdesign geben müssen (siehe Kapitel 2 „Marktdesign“). Dabei sollten jedoch drei Aspekte besonders berücksichtigt werden: Der Effizienzgedanke (Wie kann am meisten Endenergie eingespart werden?), die zeitliche Verfügbarkeit (Wann wird eine bestimmte Technologie bzw. ein bestimmter Energieträger zur Verfügung stehen?) und die Gesamtsystemsicht (Wie können Emissionen im gesamten Energiesystem – unter Berücksichtigung von Vorketten und Speicher-notwendigkeiten – kosteneffizient minimiert werden?).

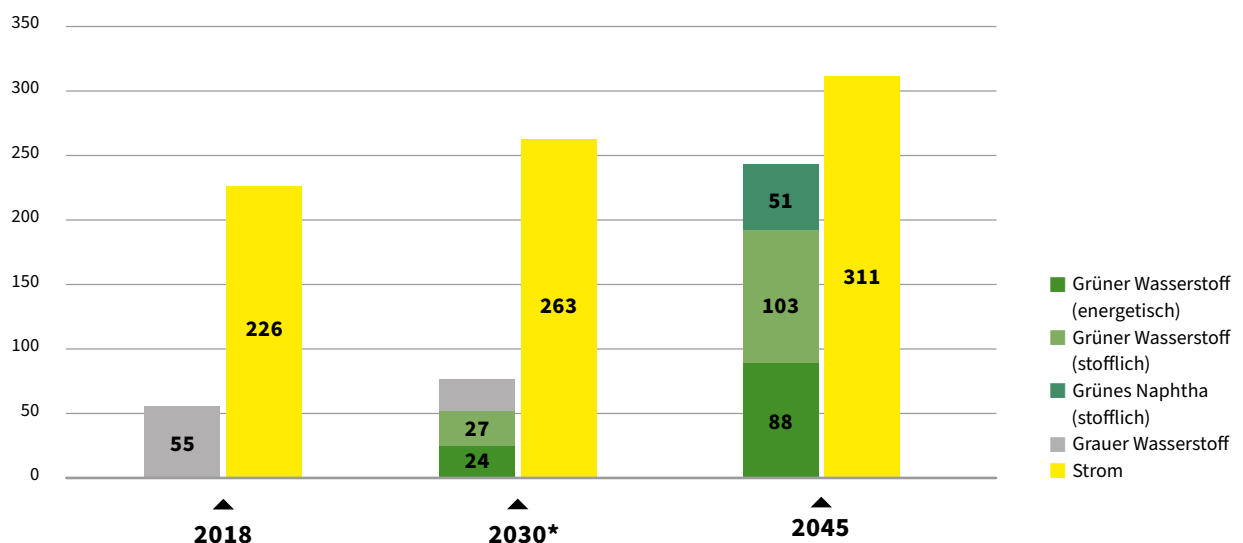
Der Elektrifizierung kommt eine besondere Bedeutung in der Industrie zu, da sie in vielen Fällen früher verfügbar sein wird als Wasserstoff, die Abhängigkeit von importierten Energieträgern verringern kann und durch die Ermöglichung von Hocheffizienz-technologien wie Hochtemperaturwärmepumpen Endenergie einsparen kann. Entscheidende Voraussetzung ist der schnelle Ausbau erneuerbarer Energieerzeugung im Inland, ohne den die Industrie keinen Zugang zu günstigem Strom in ausreichenden Mengen haben wird.

Der Einsatz von netzdienlich einsetzbaren Hybridsystemen wie beispielsweise iKWK, die zwischen elektrischer Wärme-erzeugung und Wasserstoff wechseln können, sowie die verstärkte Nutzung von Laststeuerung (DSM) ermöglichen eine nachfrage-geleitete Flexibilisierung von Produktionsprozessen und können somit zu einer Entlastung der Stromsysteme und einem insge-samt robusteren Energiesystem führen.

In der Modellierung der dena-Leitstudie wurden im Rahmen der Analyse der Pfadausprägungen Unterschiede bei der Elek-trifizierung bzw. dem Einsatz von Powerfuels in der Industrie untersucht. Diese Sensitivitätsanalyse wurde exemplarisch für den Sektor „Sonstige Industrie“ durchgeführt, da hier in gro-ßem Umfang Querschnittstechnologien zum Einsatz kommen und bereits im Basisszenario KN100 vergleichsweise hohe Effi-zienzugewinne angenommen werden, deren Realisierung ohne geeignete Rahmenbedingungen nicht als gesichert gelten kann, andernfalls aber auch noch höher ausfallen könnte.

Abb. 7.8 Verbrauch synthetischer Energieträger und Strom in der Industrie

Angaben in TWh



* Die Menge grauen Wasserstoffs wird für 2030 nicht separat berechnet. Über alle Sektoren werden 2030 5 TWh blauen Wasserstoffs verwendet

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode



AUFGABE 43

Energieeffizienz weiter verbessern und alle Förderprogramme auf THG-Minderung ausrichten

Die Bundesregierung sollte Anreize und Förderung für Energieeffizienz stärken, um Investitionen durch verkürzte Amortisationszeiten und reduzierte Risiken wirtschaftlicher zu gestalten. Hierfür sind insbesondere **bestehende Förderprogramme** wie „Energieeffizienz in der Wirtschaft“ sind weiterzuführen und zu verbessern. Dabei sollten die Programme jedoch konsequenter auf die Reduzierung von **THG-Emissionen** ausgerichtet werden. Anstatt des spezifischen Energieverbrauchs im Vergleich zu Referenzanlagen allein, sollten auch die tatsächlichen absoluten Emissionsreduktionen als Kernkriterium für Förderung herangezogen werden. Anlagen, die zu einer Erhöhung der Emissionen führen, sollten nicht mehr gefördert werden.

Bei **Neuanlagen** sollte dabei verpflichtend die jeweils effizienteste Technologie zum Einsatz kommen. Insbesondere sollten Anlagen, die nicht **Klimaneutralitäts-kompatibel** sind (die also nicht auf klimaneutrale Energieträger und Rohstoffe umgestellt bzw. deren Weiterbetrieb bei Erreichung der Klimaziele nicht mehr möglich sein wird) nur noch in Ausnahmefällen gefördert werden, zum Beispiel bei Erzielung besonders hoher kurzfristiger Emissionsminderungen innerhalb der Laufzeit. Kleine und mittelständische Unternehmen sollten beim Aufbau klimaneutraler Produktionsanlagen besonders unterstützt werden (siehe unten).

Für Investitionen zur Steigerung der Energieeffizienz oder Minderung der THG-Emissionen sollten **kürzere Abschreibungszeiten** eingeführt werden, um die Amortisationszeiten zu verkürzen. Der Zugang zu zinsgünstigen Krediten für diese Investitionen sollte weiter vereinfacht werden, dies gilt auch für Contracting-Anbieter.

Die bestehenden Abgabenbefreiungen auf Energie- und CO₂-Preise sowie sonstige Vergünstigungen sollten auf Anreizkompatibilität und Notwendigkeit überprüft werden. Insbesondere sollte die Regulierung industrieller Energieverbraucher systematisch auf **Fehlanreize** untersucht werden und diese rasch abgebaut werden:

- **Starre Schwellenwerte** sollten durch flexiblere Regelungen (gleitende Schwellenwerte) abgelöst werden, damit Effizienzverbesserungen nicht zum Verlust von Privilegien führen, zum Beispiel im Rahmen der Besonderen Ausgleichsregelung. Desweiteren sollte die **Nutzung von Flexibilisierungsoptionen** (Demand Side Management, DSM) erleichtert und angereizt werden. Die 7.000-Stunden-Regelung nach § 19 Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) sollte durch eine gleitende Lösung ersetzt und andere Regelungen wie die Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) überarbeitet werden.²²
- **Fehlanreize in Carbon Leakage Maßnahmen** sollten abgebaut werden, etwa durch eine Stärkung der Steuerungswirkung des BEHG durch Anpassung der zugehörigen Carbon Leakage Verordnung: Inkrementelle THG-Einsparungen durch Unternehmen müssen zu einer Entlastung in Höhe des CO₂-Preises führen, wie es auch im „Benchmark-Ansatz“ im EU ETS bereits implementiert ist. Auszahlungen im Rahmen eines Carbon Leakage Schutzes sollten dabei an die Bedingung geknüpft werden, für Maßnahmen und Transformationsprojekte hin zur Klimaneutralität genutzt zu werden (wie Energieeffizienzprojekte oder andere THG-Einsparmaßnahmen).²³

Zur Erhöhung der Anteile erneuerbarer Energien unter Berücksichtigung der gesamtsystemischen Effizienz sind zusätzliche Maßnahmen auf anderen Ebenen notwendig:

- **Förderungen und Anreize für KWK-Anlagen** sollten stärker auf die Verbesserung der Netzdienlichkeit ausgerichtet werden. Um Lock-in-Effekte zu vermeiden, sollten neue KWK-Anlagen nur zugelassen werden, wenn sie „H₂-ready“ sind und erneuerbare Erzeugung einbinden („Innovative KWK-Systeme“).

²² Einige Empfehlungen, siehe hier: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2018.

²³ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021f.

- Beschleunigter **Ausbau der erneuerbaren Energien** im Inland, um die weitere Elektrifizierung der Industrie (z. B. für Prozesswärme) zu ermöglichen und die Abhängigkeit von importierten erneuerbaren Energieträgern zu reduzieren. Zudem schneller Aufbau von **Energiepartnerschaften** zum Import von Wasserstoff und anderen Powerfuels aus dem EU- und nicht-EU-Ausland.
- Die **erneuerbare Stromerzeugung** durch PV und Windkraft in Industrieanlagen sollte ausgebaut werden. Hierzu sind neben einer PV-Pflicht für Neubauten (sowie für Bestandsgebäude im Falle von wesentlichen Umbauten des Daches) eine Abgabenbefreiung für Eigenverbrauch und die Vereinfachung von Genehmigungsverfahren sinnvoll.
- **Green PPAs** (langfristige Stromabnahmeverträge) stellen für Unternehmen eine Möglichkeit dar, sich ohne Kapitalaufwand für eigene Erzeugungsanlagen mit wettbewerbsfähigem grünem Strom zu versorgen und den EE-Ausbau nachfragebasiert voranzutreiben. Daher sollte der Abschluss dieser Verträge durch Maßnahmen auf der Anbieter- und der Nachfragerseite erleichtert werden. Dazu gehören beispielsweise die Ermöglichung der Strompreiskompensation für den Grünstrombezug für energieintensive Unternehmen und die Erleichterung von Pooling-Modellen für die kollektive Stromabnahme durch mittelgroße Industrieunternehmen.

Um **neue Technologien** (beispielsweise Abwärmeverstromung, Groß- und Hochtemperatur-Wärmepumpen, Geothermie oder industrielle Solarthermie) schneller auf dem Markt zu etablieren sind in den kommenden Jahren spezifische Förderungen als Anschubfinanzierung sinnvoll. Ein Mittel dafür könnten technologiebezogene Ausschreibungen oder ein erhöhter Fördersatz im Rahmen von Energieeffizienz-Förderprogrammen sein.



AUFGABE 44

Rohstoffeffizienz erhöhen und Kreislaufwirtschaft für sämtliche nicht erneuerbaren Rohstoffe einführen

Die Bundesregierung soll aufbauend auf bestehenden Ansätzen die Erarbeitung einer **Circular-Economy-Strategie** anstoßen, um ambitionierte Ziele bezüglich Material- und Ressourceneffizienz anzustreben.

Designstandards sollten gestärkt werden und zu effizienterem Materialeinsatz führen, indem die **Ökodesign-Richtlinie** ausgeweitet wird von der reinen Bewertung des Energieverbrauchs im Betrieb hin zu einer Lebenszyklus-Betrachtung (Produktion, Verpackung, End-of-Life etc.). Dadurch sollen Produkte materialeffizienter und langlebiger konzipiert werden. Als Anreiz wären auch eine **preisliche Bevorzugung** effizienter Produkte oder **verpflichtende Standards** möglich.²⁴

Konsistente, verbindliche Regelungen sollen zu mehr Effizienz und weniger Primärstoffeinsatz führen. Dies kann erreicht werden durch branchenspezifische **Recyclingquoten** (bzw. **Quoten** für den Sekundärrohstoffeinsatz) und konkrete Zielvorgaben zum Einsatz von Recyclingmaterialien unter Berücksichtigung der Ökobilanzen und Verfügbarkeiten von Sekundärrohstoffen.

Zur Erhöhung der Recyclinganteile, Abfallvermeidung, Verringerung des Primärstoffeinsatzes und Stärkung des Sekundärrohstoffmarkts branchenspezifischer finanzieller Anreize geschaffen werden: Für geeignete Materialkategorien sollte eine **Abgabe auf** importierte und in Deutschland produzierte **Primärrohstoffe** geprüft werden, die sich an objektiven Kriterien wie THG-Emissionen, Energieintensität oder anderen ökologischen Auswirkungen orientiert und bei Inverkehrbringen erhoben wird. Für die Einführung dieser Abgabe sollten für die jeweilige Stoffkategorie die Lenkungswirkung, Bürokratieaufwand, Nebeneffekte, sowie mögliche Wechselwirkungen mit anderen Instrumenten evaluiert werden.

²⁴ Umweltbundesamt (UBA), 2021a.

Eine weitere Option wäre eine Abgabe für nicht verwerteten Müll oder Schutt (**Deponiesteu**er).

Die Entwicklung und Anpassung von **Designstandards** soll erreichen, dass die Nutzung von Produkten über den Gesamt-lebenszyklus effizienter wird. Ansätze sind dabei:

- Verbesserung der **Langlebigkeit und Reparierbarkeit** (zum Beispiel eine obligatorische Erhöhung der Garantiezeit, Vorschriften zur Reparierbarkeit sowie flankierende Maßnahmen wie etwa die Mehrwertsteuerbefreiung von Reparaturdienstleistungen.)
- Stärkung der Vorschriften für **Energieeffizienz** technischer Geräte und Erhöhung der **Mindeststandards** im Betrieb (Energielabel)
- Ermöglichung der Verwendung von Recyclingmaterialien
- Vorschriften für **Recyclingfähigkeit** aller nicht-erneuerbaren Materialien.

Abbau von Hindernissen: Standards und Normen sollten darauf überprüft werden, ob sie aktuell den Einsatz von Sekundärrohstoffen oder neuen materialsparsamen Verfahren erschweren, insbesondere im Baubereich. Unter anderem sollten qualitätsgesicherte Sekundärrohstoffe am Ende des Aufbereitungsprozesses ihre Abfalleigenschaft verlieren. Der Umgang mit den Sekundärrohstoffen würde dadurch vereinfacht und ihre Verwendung im Produktionsprozess erleichtert.

Die Umstellung auf eine Kreislaufwirtschaft könnte zusätzlich auch durch ordnungsrechtliche Vorgaben unterstützt werden:

Zur Erhöhung der Rückführquote für Produkte und Verpackungen, sollten bestehende **Pfandsysteme** in Deutschland weiterentwickelt und auf weitere Produktkategorien verpflichtend ausgeweitet werden, wie zum Beispiel Elektronikgeräte oder Batterien.

Konkrete Vorschriften für die **End-of-Life-Phase** in der Produktnutzung: Produkte sollten schon so konzipiert werden, dass eine möglichst gute Rückgewinnung der verbauten Rohstoffe und Recyclbarkeit ermöglicht wird.

Müllverbrennungsanlagen für Abfallströme, die keiner stofflichen Verwertung zugeführt werden können und daher thermisch verwertet werden müssen, sollten im Laufe der 2030er-Jahre mit einer **CO₂-Abscheidung** ausgestattet werden, um einen weitgehend geschlossenen Kohlenstoffkreislauf sicherzustellen. Eine Erfassung der Abfallwirtschaft in den EU ETS würde helfen, dort anfallende Emissionen genauer zu erfassen und Anreize zu deren Vermeidung bzw. Abscheidung zu setzen.

Um Wertstoffe möglichst vollständig im Kreislauf zu führen und unsachgemäße Entsorgung zu vermeiden, sollten Müll- und Schrottexporte in Nicht-EU-Länder reduziert und weitgehend verboten werden, es sei denn, es kann sichergestellt werden, dass im Zielland eine hochwertige Wiederverwertung durchgeführt wird. Für besonders umweltbelastende oder leicht substituierbare Produktkategorien sollten **Verbote des Inverkehrbringens** analog zum EU-Einwegplastikverbot geprüft werden.

Energieaudits sollten im Sinne eines **Umweltaudits** um die Themen THG-Emissionsminderung und Ressourceneinsparung erweitert werden. Zusätzlich sollten die Unternehmen durch ein **Beratungsprogramm** bei der Umstellung auf eine Kreislaufwirtschaft unterstützt und notwendige Investitionen in Maßnahmen zur Einsparung von Ressourcen und Material gefördert werden.



AUFGABE 45

Lenkungswirkung von THG-Emissionen auf den Konsum erhöhen und die Kostengerechtigkeit verbessern

Um die durch Produkte und Leistungen verursachten THG-Emissionen bei Kaufentscheidungen berücksichtigen zu können, müssen Informationen hierüber sowohl im zwischenbetrieblichen Handel (B2B) als auch für die Verbraucherinnen und Verbraucher verfügbar sein.

- Eine verpflichtende **Ausweisung des CO₂-Fußabdrucks** (Product Carbon Footprint, PCF) für Zwischen- und Endprodukte ist Basis dafür, bei Kaufentscheidungen die THG-Intensität des Produkts und eine Einordnung innerhalb der Produktkategorie berücksichtigen zu können. Die Erarbeitung der notwendigen Standards und Zertifizierungen sowie die Harmonisierung und Komplettierung von Regeln für Produktkategorien (Product Category Rules) sollte zeitnah durch ein Gremium unter Einbeziehung von Wissenschaft und den betroffenen Branchen erfolgen.
- In Ergänzung könnte eine Veröffentlichungspflicht einer **Unternehmensklimabilanz** (Scope 1/2/3) im Jahres- oder Nachhaltigkeitsbericht für alle Unternehmen mit Geschäftstätigkeit in Deutschland bzw. in der EU eingeführt werden. Hierin sollte die Ökobilanz für jede Produktkategorie inklusive der Umweltauswirkungen entlang der gesamten Lieferkette veröffentlicht werden. Auch hier sollten kleine und mittelständische Unternehmen ggf. unterstützt werden.

- Für eine konsistente, verbraucherfreundliche (im Sinne von Transparenzerhöhende) **kommunikative bzw. werbliche Verwendung der Informationen** über THG-Emissionen bzw. die Klimawirksamkeit von Produkten oder Unternehmen, ist die Erarbeitung stringenter Kriterien notwendig, nach denen Unternehmen oder Produkte als „klimafreundlich“ oder „klimaneutral“ bezeichnet werden dürfen (z. B. in Form eines Qualitätssiegels).

Zudem sollten Richtlinien zu nachhaltigem, THG-armem Einkauf als auch zu nachhaltiger und THG-armer Produktion erarbeitet werden (z. B. unter Einbindung der Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke oder anderer Unternehmensinitiativen). Auch sollte geprüft werden, das Lieferkettengesetz um eine entsprechende Verpflichtung zu erweitern.

In Ergänzung zur Schaffung von Transparenz und der Entwicklung von Regelungen für eine THG-arme Beschaffung sollte eine **Verbrauchsabgabe** auf Endprodukte eingeführt werden, die sich am **Energieverbrauch und THG-Fußabdruck** bemisst. Die Abgabe sollte so gestaltet sein, dass sie Lenkungswirkung auf Konsum- bzw. Kaufentscheidungen entfalten kann. Die hierüber erwirtschafteten Mittel könnten zur Refinanzierung von CCfD sowie zum sozialen Ausgleich (wo erforderlich) verwendet werden.



AUFGABE 46

Durch „grüne Leitmärkte“ konkrete Nachfrage nach THG-armen Produkten schaffen und die Investitionssicherheit erhöhen

Derzeit ist die klimaneutrale Erzeugung im Vergleich zur Produktion mit etablierten, aber emissionsintensiveren, Verfahren für die meisten Produkte mit höheren Kosten verbunden. Gründe hierfür sind etwa die kleineren Produktionsvolumina (geringere Skaleneffekte) und höhere Investitions- sowie Betriebs- und Energieträgerkosten. Klimaneutrale Produkte sind daher typischerweise in frühen Phasen des Einsatzes neuer emissionsarmer Produktionsverfahren bzw. erneuerbarer Energieträger und Rohstoffe noch nicht preislich wettbewerbsfähig.

Um trotzdem eine ausreichend hohe Nachfrage nach klimaneutral erzeugten Produkten zu schaffen und damit die langfristigen Investitionen in die Umstellung der Produktion zu ermöglichen, sollten frühzeitig „grüne Leitmärkte“ für klimaneutrale und recycelte Produkte und Grundstoffe geschaffen werden.

Hierbei sollten folgende einander ergänzende Ebenen betrachtet werden:

- Durch die Einführung von **Mindestquoten für THG-arme Grundprodukte** sollte für ausgewählte Grundstoffe (z. B. einzelne Metalle) innerhalb einer Produktgruppe der Einsatz besonders CO₂-armer (perspektivisch klimaneutraler) Grundstoffe vorgeschrieben werden. Diese Quoten sollten technologieoffen ausgestaltet werden; maßgebliche Kenngröße sollte der THG-Fußabdruck des Grundstoffs über den gesamten Lebenszyklus sein. Um die Umstellung der Produktionsverfahren im Rahmen der bestehenden betrieblichen Zyklen zu erleichtern und innerhalb der Betriebe auch mit neuen Produktionsverfahren rasch Skaleneffekte erreichen zu können, sollten für die Einzelunternehmen durch ein marktbasiertes Bonus-Malus-System auch die Über-/Unterfüllung der Quote ermöglicht werden.
- Ergänzend ist für einzelne Produkte eine **Obergrenze für den THG-Fußabdruck von Endprodukten** (wo geeignet) zu prüfen, um die Verwendung emissionsärmerer Materialien und Verfahren anzureizen. Ein möglicher Ansatz wäre eine Produktbenchmark, wobei die „schlechtesten“ Produkte ihrer Kategorie mit einem Malus versehen werden oder nicht mehr verkauft werden dürfen.
- In der **Beschaffung der öffentlichen Hand** sollten insbesondere bei Ausschreibungen der THG-Fußabdruck von Produkten berücksichtigt und THG-arme Produkte bevorzugt werden. Die Bundesregierung sollte dazu bindende Vorgaben und geeignete Mechanismen für Bund, Länder und Kommunen entwickeln. Die Verwendung eines ausreichend hohen **THG-Schattenpreises** könnte eine geeignete technologieoffene Ausgestaltungsoption sein.²⁵

²⁵ Eine Orientierung an Schadenskosten von 195 bis 680 Euro je Tonne CO₂-ä laut Methodenkonvention 3.1 des UBA wäre dabei für den Einsatz fast aller LCBT ausreichend, siehe Umweltbundesamt (UBA), 2021a.



AUFGABE 47

Raschen Einsatz und Hochlauf neuer emissionsarmer Technologien und Verfahren durch CO₂-Differenzverträge ermöglichen

Die Bundesregierung sollte schnellstmöglich Parameter und Vertragsbedingungen für den Einsatz von CO₂-Differenzverträgen (Carbon Contracts for Difference, CCfD) im Rahmen eines **CCfD-Programms** ausarbeiten, um bereits im ersten Halbjahr 2022 erste Ausschreibungen durchführen zu können. Nach einer ersten erfolgreichen Durchführung sollten Finanzierung und Ausschreibungsmengen entsprechend ausgeweitet werden, um die Sektorziele für 2030 erreichen zu können. Dabei sollte geprüft werden, welche Branchen bzw. Produkte unterstützt werden sollten, und wie CCfD möglichst effizient mit anderen Instrumenten verzahnt werden können.

Die Bundesregierung sollte daneben die **Investitionsförderung** für den Einsatz und Hochlauf von emissionsarmen Produktionstechnologien und -verfahren (Low Carbon Breakthrough Technologies, LCBT) ausweiten, um den Ausbau in industriellem Maßstab anzustoßen und Hemmnisse abzubauen. Hierzu sollte neben der Schaffung neuer unterstützender Finanzierungsinstrumente insbesondere die Finanzierung der „**Reallabore der Energiewende**“ ausgeweitet werden, um Technologien und Anwendungen möglichst schnell hochzuskalieren. Begleitend sollten **Planungs-, Genehmigungs- und Beteiligungsverfahren** vereinfacht und beschleunigt werden, um größere Investitions- und Umbauprojekte zu erleichtern.

Aus industriepolitischer Sicht sollte der zunehmende Einsatz von LCBT in der heimischen Industrie durch ein Programm zur **Exportförderung für Klimatechnologien** flankiert werden, um den Hochlauf von LCBT auch im Ausland zu unterstützen. Hierdurch können Marktchancen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau durch die globale Transformation zu Klimaneutralität geschaffen bzw. genutzt werden und gleichzeitig auch Lernkurven und Kostendegressionen für die globale Energiewende beschleunigt werden.



AUFGABE 48

Besondere Unterstützung für den Mittelstand und KMU durch einen „individuellen Transformationsfahrplan“ zu Klimaneutralität

Für die erfolgreiche Transformation zu Klimaneutralität der deutschen Industrie müssen neben den häufig großen Unternehmen aus den emissions- oder energieintensiven Branchen auch der Mittelstand und die große Zahl kleinerer und mittlerer Unternehmen (KMU) und Betriebe ‚mitgenommen‘ werden.

Hierfür sollte speziell für den Mittelstand und KMU ein Beratungsprogramm entwickelt werden. Im Rahmen dieses Programms kann für die Unternehmen konkret ein „**individueller Transformationsfahrplan**“ (ITFP-KMU) erarbeitet werden, der in Form eines Energie- und Klimaaudits den Status Quo feststellt und einen möglichen Weg zum Umbau der Produktion hin zur Klimaneutralität beschreibt. In Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten und der langfristig geplanten Entwicklung der (Energie-)Infrastrukturen werden die Unternehmen gegebenenfalls auch bei der Beantragung von Fördergeldern unterstützt.

Mit Einführung des Programms sollte eine Ausweitung der Pflicht zur Erstellung eines **Energie- und Klimaaudits** auf diese Unternehmen erfolgen. Zudem sollte für besonders wirtschaftliche Maßnahmen aus Energieaudits eine Begründungspflicht eingeführt werden, falls die empfohlenen Maßnahmen nicht umgesetzt werden. Für besonders emissionsintensive bzw. ineffiziente Altanlagen sollte ein obligatorischer Phase-out im Rahmen eines Energieeffizienz-Fahrplans festgelegt werden können, um den Weiterbetrieb überholter Anlagen zu minimieren.

Eine **Sonderförderung „Kohle-Ausstieg in der Industrie“** sollte als „Quick Win“ für den Klimaschutz wie auch zur Sicherung der Zukunftsfähigkeit der betroffenen Unternehmen, den direkten Umstieg von Kohle zu klimaneutralen Energieträgern bzw. Verfahren ermöglichen.

Viele der in diesem Kapitel empfohlenen Maßnahmen können für kleine und mittlere Unternehmen schwierig sein. Wo erforderlich sollte die Umsetzung also zusätzlich gefördert werden, insbesondere, wo neue technische oder administrative Prozesse eingeführt werden müssen (z. B. Ersterstellung einer Unternehmensklimabilanz).



AUFGABE 49

Wärmenetze stärken und die vermehrte Nutzung von Abwärme ermöglichen

Energieeffizienz muss in Zukunft stärker intersektoral gedacht werden. Dies beinhaltet die überbetriebliche **Nutzung verfügbarer (Ab-)Wärmequellen**. Industrieunternehmen sollten dabei stärker in Wärmenetze, Quartierskonzepte und andere Formen der betriebsübergreifenden Wärmenutzung eingebunden werden, um Primärenergie einzusparen und die Effizienz des Gesamtsystems zu verbessern.

Dafür sollten stärkere Anreize für die Nutzung von nicht-vermeidbarer Abwärme in benachbarten Betrieben oder die Einspeisung in Wärmenetze gesetzt werden. Auch sollte der Aufbau gemeinsamer Wärmeerzeuger aus erneuerbaren Energien sowie der Bezug von Energie aus Wärmenetzen (wo energetisch sinnvoll) stärker angereizt werden. Um Hindernisse abzubauen, sind dabei verschiedene Maßnahmen sinnvoll:

- Verbesserte Förderung überbetrieblicher **Konzepte zur Abwärmenutzung** sowie ein Beratungsprogramm für Unternehmen, das sowohl technische als auch regulatorische Fragestellungen abdeckt.
- Umstellung der **Wärmenetze** auf Niedrigtemperaturwärme zur Erleichterung der Wärmeeinspeisung und eine Verpflichtung zur Abnahme von (industrieller) Abwärme aus Punktquellen in Wärmenetze, wo technisch und wirtschaftlich möglich. Nicht-vermeidbare Abwärme sollte dabei regulatorisch wie erneuerbare Energie behandelt werden.
- Prüfung staatlicher **Garantien bzw. Bürgschaften** für komplexe (insbesondere sektorübergreifende) Investitionsprojekte mit einer Vielzahl unterschiedlicher Akteure, um durch Risikoabsicherung Investitionshemmnisse aufzulösen.

Um die Potenziale durch die stärkere deutschlandweite Nutzung von nicht-vermeidbarer Abwärme zu ermitteln und konkrete regionale Konzepte zur Abwärmenutzung zu ermöglichen, sollte ein deutschlandweites **Abwärmekataster (Wärmeatlas)** nach dem Vorbild einzelner Bundesländer erstellt werden.

Bei situativem Marktversagen könnten größere Abwärmeemissionen auch über das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) reguliert werden.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- ▶ **Ausbildungs- und Qualifizierungsinitiative für Fachkräfte der Energiewende** (Kapitel 4 „Transformation“)
- ▶ **Einheitliche Mindeststandards erarbeiten, um globale Klimaziele zu erreichen und die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu bewahren** (Kapitel 5 „Internationale Einbettung“)
- ▶ **Akzeptanz für CCU/S schaffen** (Kapitel 10 „Natürliche Ökosysteme und Senken“)
- ▶ **Abstimmung auf EU-Ebene zur Weiterentwicklung integrierter Energieinfrastrukturen und Erzeugungskapazitäten verstärken** (Kapitel 5 „Internationale Einbettung“)

8 Verkehr

**Wie kann im Verkehr
effiziente motorisierte
Mobilität mit neuen,
innovativen Mobilitäts-
konzepten verbunden
werden?**



Die Emissionen im Verkehrssektor stagnieren und die derzeitigen Rahmenbedingungen unterstützen eine Verkehrswende nur unzureichend

Klimapolitisches Ziel ist, bis 2030 mindestens 48 Prozent weniger CO₂ im Verkehr gegenüber 1990 zu emittieren und auch danach steigt das Ambitionsniveau kontinuierlich. In den letzten Jahrzehnten konnte der Verkehrssektor seine Emissionen jedoch kaum reduzieren: Der absolute CO₂-Ausstoß bei Pkws liegt 13 Prozent unter dem Niveau von 1990, die Emissionen der Nutzfahrzeuge sind im selben Zeitraum aufgrund des erheblich gestiegenen Straßengüterverkehrs sogar um mehr als 60 Prozent gestiegen. Die nationalen Luftverkehrsemissionen sind in den letzten Jahren konstant, jedoch haben der von Deutschland ausgehende internationale Luftverkehr bis zur Corona-Pandemie und die daraus resultierenden Mobilitätseinschränkungen deutlich zugenommen. Der Anteil erneuerbarer Kraftstoffe im gesamten Verkehrssektor liegt aktuell bei ca. 7 Prozent.

Im Jahr 2020 sind die Emissionen erstmals deutlich (um 19 Millionen Tonnen gegenüber 2019) gesunken, jedoch war dies zum allergrößten Teil auf die reduzierte Verkehrsleistung während der COVID-19-Pandemie zurückzuführen¹. Bereits 2021 kehrte sich die Entwicklung wieder um. Der Anteil des Motorisierten

Im Verkehrssektor gibt es bisher keinen zielgerichteten und konsistenten Treibhausgasminderungspfad.

Individualverkehrs (MIV) ist noch stärker gestiegen, es wurden noch mehr Fahrzeuge in Deutschland zugelassen und die durchschnittliche Auslastung des Öffentlichen Verkehrs (ÖV) ist geringer als in den Vor-

jahren. Darüber hinaus hat der ÖV in den letzten Jahren weiter an Wettbewerbsfähigkeit gegenüber dem MIV verloren, was u. a. auf die deutlich gestiegenen Personalkosten im ÖV zurückzuführen ist. Demgegenüber sind die Preise für Fahrzeugkauf, Fahrzeughaltung und Kraftstoffe deutlich geringer gestiegen.²

Für Haushalte mit einem Einkommen zwischen 900 und 3.600 Euro lagen die anteiligen Ausgaben für Verkehr im Jahr 2018 unter denen des Jahres 1998. Haushalte mit einem Einkommen bis 1.500 Euro geben selbst anteilig nur halb so viel ihres Haushaltseinkommens für Verkehr aus wie Haushalte mit einem Einkommen von über 5.000 Euro. Die relativen Ausgaben für Kraftstoffe und Schmiermittel liegen dabei 20 bis 60 Prozent unter denen einkommensstarker Haushalte. Für den ÖV geben einkommensschwache Haushalte jedoch anteilig ca. 50 Prozent mehr aus.³ Dabei wäre gerade für Haushalte mit niedrigen Einkommen die Sicherstellung eines allgemein zugänglichen, günstigen Zugangs zu Mobilität, wie zum Beispiel ein wettbewerbsfähiger ÖV in Kombination mit neuen Mobilitätsangeboten, wichtiger als ein kostengünstiger Individualverkehr. Neue Dienstleistungsangebote im Verkehr, wie Free-Floating Sharing oder Ride-Pooling oder Formen der Mikromobilität, konzentrieren sich aus ökonomischen Gründen heute vorwiegend auf hochverdichtete, urbane Räume mit einer guten Versorgung durch den ÖV. Die gleichzeitig steigende Anzahl von privaten Pkws erhöht zusätzlich den Nutzungskonflikt um begrenzte Flächen im öffentlichen Raum. Daher bleiben geteilte Mobilitätsangebote ohne Anpassungen des Verkehrsraums bisher ohne nennenswert positive Effekte auf den Verkehrsfluss und die THG-Emissionen.

¹ Expertenrat für Klimafragen, 2021.

² Die Kraftstoffkosten liegen nominal auf dem Niveau von 2008. Real kostet Kraftstoff heute also weniger als vor 13 Jahren. Die Bundesregierung hingegen ist in ihrer Verkehrsprognose aus dem Jahr 2012 von einer jährlichen Preissteigerung von 2 Prozent ausgegangen.

³ Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021b.

Auch im Güterverkehr sind die Kosten für den Schienenverkehr und den kombinierten Verkehr stärker gestiegen als für reine Lkw-Transporte. Damit besteht unter den derzeitigen Rahmenbedingungen kein ökonomischer Grund für eine zunehmende Verlagerung von Transporten von der Straße auf Schiene oder Binnenschiff. Gerade unter Berücksichtigung des Güterstruktureffekts und flexibler Produktions- und Logistiksysteme ist ohne den Einbezug von externen Umweltkosten nicht mit einer zunehmenden Verlagerung auf die heute emissionsärmsten Verkehrsträger zu rechnen. Der stärkste Wachstumsmarkt im Güterverkehr der letzten Jahre sind KEP-Dienstleistungen (Kurier-Express-Paket-Dienste). Die Lieferung von Waren an private und gewerbliche Endverbraucher über den Online-Handel hat wesentlich dazu beigetragen, dass die THG-Emissionen der leichten Nutzfahrzeuge in Deutschland von 1990 bis 2019 um 194 Prozent gestiegen sind. Ein Vorteil für die KEP-Dienste, aber auch für andere Straßengütertransporte ist dabei, dass sie bisher den öffentlichen Straßenraum häufig kostenlos für ihre Dienstleistungen nutzen können. Dies erhöht den Kostenvorteil gegenüber dem stationären Einzelhandel zusätzlich. Auch gibt es bisher keine Vorgaben oder Mindestanforderungen an Qualität und Emissionen der genutzten Fahrzeuge. Damit sind Umschlag und Lagerung als Kostenelement der Logistik weiterhin entscheidender als der reine Transport. Emissionsarme Güterverkehrslösungen der Mikromobilität wie Lastenräder stellen deshalb bisher ein (ausbaufähiges) Nischenangebot dar.

Letztendlich ist der Status quo des Verkehrs daher durch eine Situation charakterisiert, in der neue Technologien, Energieträger sowie IT- und Mobilitätskonzepte bereits verfügbar sind, jedoch durch fehlende oder überholte politische Rahmenbedingungen keinen sich selbst tragenden Markt finden und somit ihr Potenzial nicht ausschöpfen können. Bisweilen gibt es aktuell sogar noch Marktentwicklungen und Trends, die dem

Der Wandel im Verkehr scheitert nicht an fehlender Technologie, sondern an Rahmenbedingungen für neue Gestaltungsmöglichkeiten und Geschäftsmodelle.

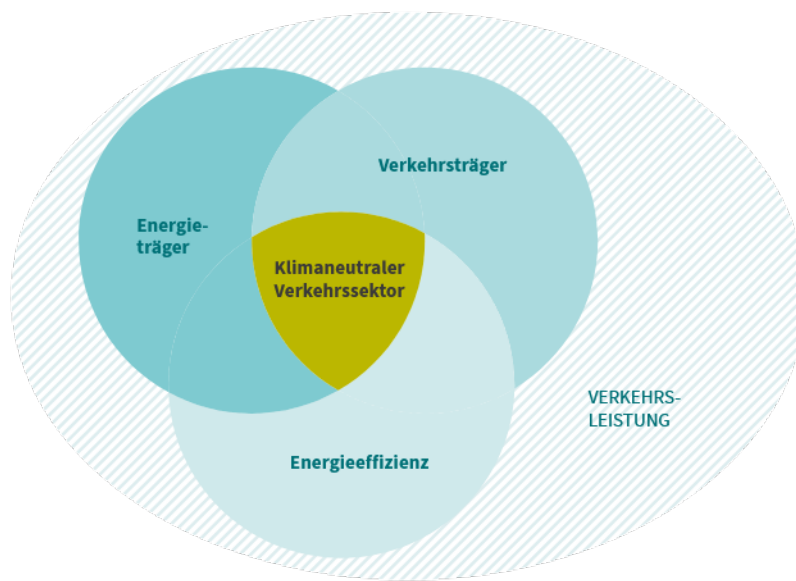
Ziel der Klimaneutralität entgegenlaufen. Dies trifft sowohl auf Konzepte der Mikromobilität als auch u. a. auf die durch die Fahrzeughersteller selbst angebotenen Sharing-Konzepte zu. Wie die statistischen Zahlen zu den Haushaltsausgaben für den Verkehr oder auch die Zulassungszahlen

der Pkw-Segmente zeigen, besteht aktuell weder für viele private noch gewerbliche Verbraucher ein umweltökonomischer Druck, auf emissionsarme und effiziente Verkehrsträger oder Technologien umzusteigen. Vielmehr bieten die aktuellen Rahmenbedingungen über die Pendlerpauschale, die Besteuerung von Kraftstoffen, die Ausgestaltung der Kraftfahrzeugbesteuerung oder Kaufprämien für Privatfahrzeuge und für private

Ladeinfrastruktur starke Anreize, den Status quo der Mobilität zu zementieren. Auch werden im Nutzfahrzeugbereich Diesel-Lkws gefördert, die Standard beim Neuwagenkauf von Unternehmen sind und die Wettbewerbsfähigkeit aller anderen Alternativtechnologien verringern. Damit läuft die Bundesregierung Gefahr, die selbst gesteckten Ziele im Verkehr deutlich zu verfehlen oder in den kommenden Jahren über unpopuläre und wenig nachvollziehbare Ad-hoc-Maßnahmen erreichen zu müssen. Es besteht grundlegender Handlungsbedarf an einer Vielzahl von Stellschrauben.

Langfristige Perspektiven zielen auf eine schnellere Emissionsminderung

Die Entwicklungen des COVID-19-Jahres 2020 zeigen: Die schnellste und kostengünstigste Emissionsminderung im Verkehrssektor wird über eine Veränderung des Mobilitätsverhaltens erzielt werden. Gleichwohl kann dies nur einen Teilaspekt der Lösung darstellen. Effizienz und erneuerbare Energieträger sind gemeinsam zu betrachtende Pfeiler. Je geringer der Energieverbrauch ist, umso höher wäre der Anteil fossiler Energieträger, der bereits heute durch erneuerbare Kraftstoffe ersetzt werden könnte. Gerade für die THG-Minderung der Bestandsflotte aller Verkehrsträger sowie neu in den Markt kommende Hybrid-Technologien muss der Anteil an erneuerbaren Kraftstoffen jedoch deutlich steigen, um zur Emissionsminderung beizutragen. Die Neuzulassung von effizienten Antrieben wird ihre Wirkung erst mit einer zeitlichen Verzögerung entfalten. Gleichwohl wird sie aber dazu beitragen, dass die Menge und der Anteil erneuerbarer Kraftstoffe im kommenden Jahrzehnt auf ein Niveau steigen können, das den Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren unter Klimaschutzgesichtspunkten weiterhin ermöglicht. Unabhängig von dem politischen Rahmen oder den Zielen, der Antriebseffizienz und den erneuerbaren Kraftstoffen wird das sinkende Emissionsbudget im Verkehr dazu führen, dass die Kosten für die Individualmobilität zukünftig steigen werden. Ebenso wird die Verantwortung des Einzelnen, einen Beitrag zu Emissionsminderung zu leisten, erheblich an Bedeutung gewinnen. Dies kann wiederum die Grundlage dafür schaffen, dass sich neue Mobilitätsmuster und Dienstleistungen im Markt etablieren, die den Mobilitätsbedarf der Verbraucherinnen und Verbraucher ebenso decken, dann jedoch mit stärker miteinander verknüpften Verkehrsmitteln.



Eine integrierte Betrachtung der Verkehrswende erfordert neue Denk- und Handlungsansätze

Die politischen Ziele im Verkehr sind nur mit neuen Denk- und Handlungsansätzen zu erreichen. Antriebstechnologien, Energieträger und Energieinfrastruktur spielen bei der Zielerreichung eine wesentliche Rolle, müssen jedoch durch tragfähige Geschäftsmodelle für effizientere Mobilitätsformen ergänzt werden. Die für die Zielerreichung dargestellten Transformationspfade bedingen Innovationen und neue Dienstleistungsangebote, die mit den derzeitigen gesetzlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht umgesetzt werden. Es braucht daher eine schnelle und grundlegende Anpassung von verkehrspolitischen sowie energie- und emissionsbezogenen Abgaben und Umlagen. Die in der Studie dargestellten Transformationspfade bedingen ebenfalls eine parallele und sehr schnelle Entwicklung von erneuerbaren Energien (für Strom, Gas und Flüssigkraftstoffe), Ladeinfrastruktur, Schienenkapazitäten, effizienten Antrieben sowie neuen Mobilitätsmustern. Die frühzeitige Kommunikation von Kostentransparenz der verschiedenen Mobilitäts Optionen gegenüber den Verbraucherinnen und Verbrauchern sollte einen Beitrag zur Akzeptanz und Investitionssicherheit leisten und wird die Emissionsminderung beschleunigen. Die dargestellten Transformationspfade setzen auch eine stärkere Verknüpfung der Verkehrsträger voraus. Diese wiederum bietet das Potenzial, Mobilität auch zukünftig kostengünstig zu gestalten sowie neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, die in andere Märkte exportiert und übertragen werden könnten.

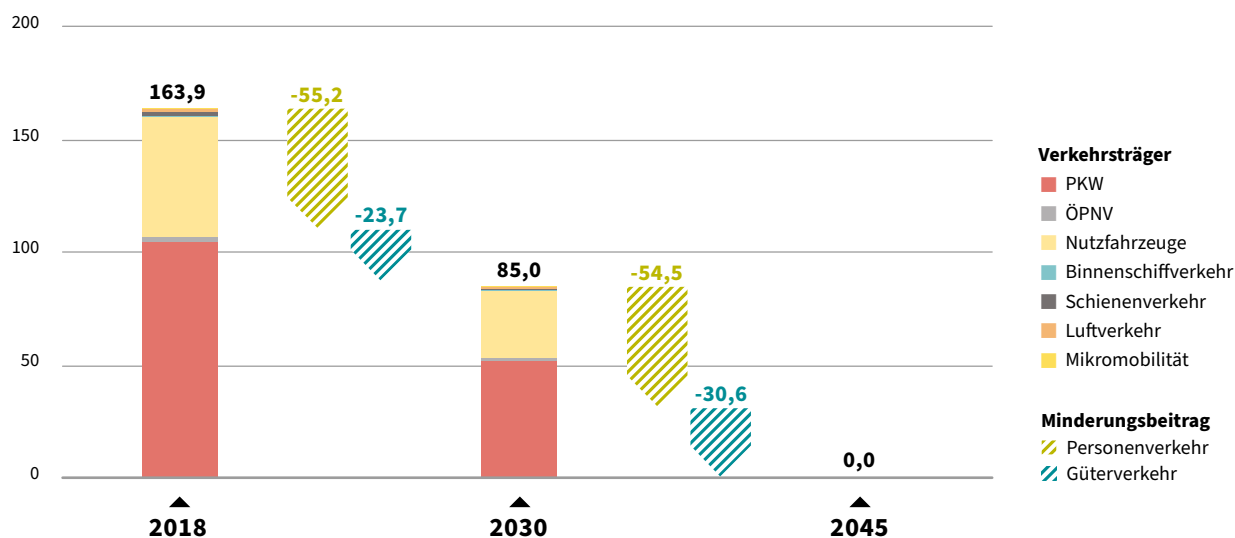
Die Transformationspfade der Studie zeigen damit eine Anpassung in allen Bereichen des Energie- und Verkehrsmarktes. Ohne entsprechende Anpassungen ist ein Erreichen der derzeitigen politischen Ziele unwahrscheinlich oder nur mit sehr kurzfristigen, nicht planbaren regulatorischen Maßnahmen machbar.

Alle Bereiche des Verkehrs erleben transformatorische Veränderungen

Die in dem KN100-Szenario quantifizierten Entwicklungen basieren in einem hohen Maße auf den bekannten politischen Rahmenbedingungen in Deutschland und in der EU im kommenden Jahrzehnt. Dabei beschreiben die bottom-up entwickelten Transformationspfade durchaus auch einen deutlichen Wandel der Bedeutung der verschiedenen Energieträger, Antriebstechnologien und Verkehrsträger. Je stärker zukünftig die Verkehrsleistung des motorisierten Personen- und Güterverkehrs steigt, umso schwieriger wird es, die Klimaziele zu erreichen. Das in den Transformationspfaden der Studie dargestellte Bild geht auch zukünftig von einem sehr hohen Niveau der Personenverkehrsleistung aus. Im Güterverkehr steigt die Verkehrsleistung bis 2045 um ein Fünftel an, jedoch etwas geringer als bisher prognostiziert, da regulatorische Änderungen auch die Kosten des Güterverkehrs steigen lassen werden. Der Anteil der Verkehrsleistung durch nicht straßengebundene Verkehrsträger und gebündelte Verkehrsmittel sowie die Auslastung der Verkehrsmittel steigen unter der Annahme eines breiteren Angebots der öffentlichen Verkehre und einer besseren Verknüpfung mit gewerblichen Sharing-Angeboten und dem MIV.

Abb. 8.1 THG-Minderungspfad im Verkehrssektor

Angaben in Mt CO₂ä



Verkehrsträger (Mt CO ₂ ä)	2018	2030	2045
PKW	104,8	52,1	0,0
ÖPNV	2,2	1,1	0,0
Nutzfahrzeuge	53,2	29,9	0,0
Binnenschiffverkehr	0,6	0,5	0,0
Schienenverkehr	1,4	0,4	0,0
Luftverkehr	1,6	1,0	0,0
Mikromobilität	0,2	0,0	0,0
Summe	163,9	85,0	0,0

Verkehrsbereich (Mt CO ₂ ä)	2018	Minderungsbeitrag	2030	Minderungsbeitrag	2045
Personenverkehr	109,7	- 55,2	54,5	- 54,5	0,0
Güterverkehr	54,2	- 23,7	30,6	- 30,6	0,0
Summe	163,9		85,0		0,0

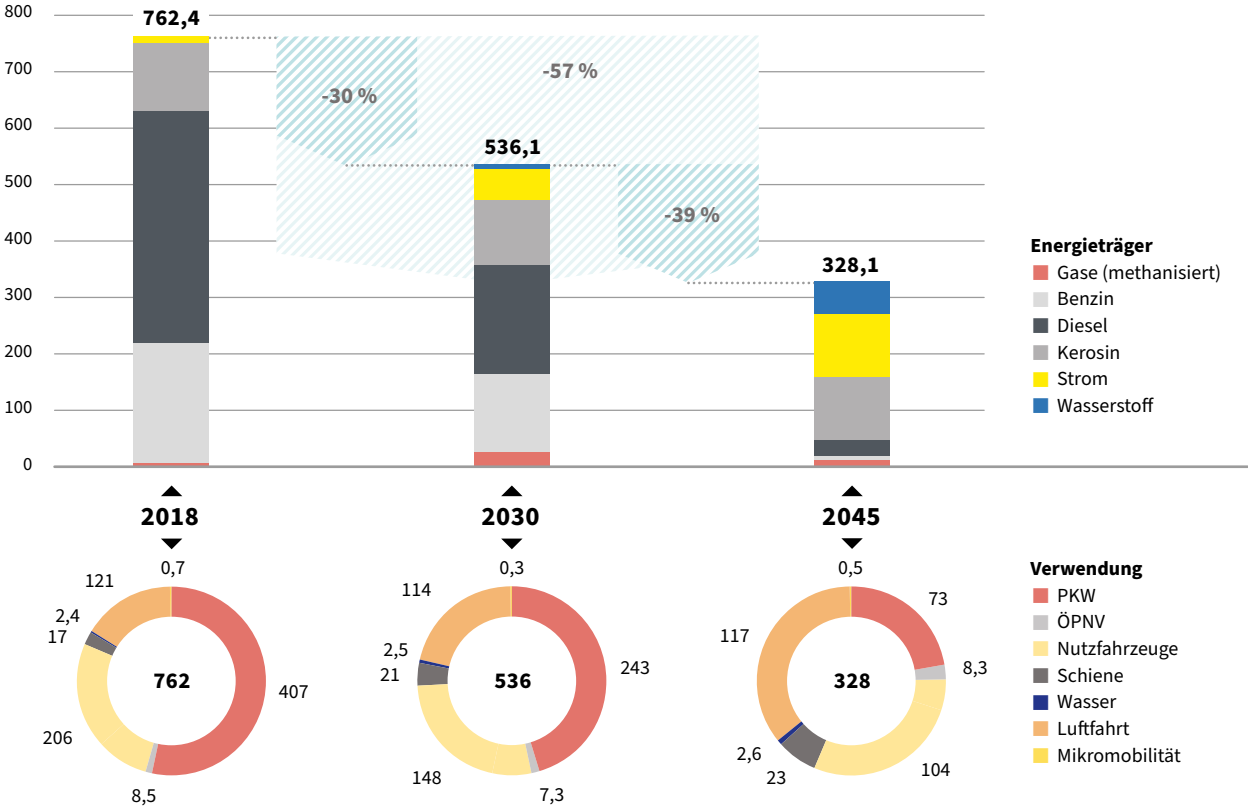
Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Das Szenario geht dabei von einer Steigerung der Effizienz aller Fahrzeuge aus – sowohl mit Verbrennertechnologie als auch mit elektrifiziertem Antrieb auf der Straße, auf der Schiene und in der Luft. Aufgrund der aktuellen regulatorischen Vorgaben durch die Flottenzielwerte ist davon auszugehen, dass sich die Marktdurchdringung elektrifizierter Antriebe bei Pkws und leichten Nutzfahrzeugen deutlich beschleunigen wird und sie Ende der 2030er Jahre mehrheitlich den Fahrzeugbestand charakterisieren. Aufgrund der Annahme einer deutlichen Kostendegression und des Markthochlaufs von H₂-Lkws inklusive deren Infrastruktur gewinnen auch brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) in Teilsegmenten der Pkws ab den 2030ern an Bedeutung. Im Güterverkehr steht in den 2020er Jahren LNG (Liquefied Natural Gas) als einzige marktreife Alter-

native neben dem Diesel für den Langstreckentransport (> 500 km) zur Verfügung und kann aufgrund der Beimischung von fortschrittlichen Biokraftstoffen, später strombasiertem Methan, einen Beitrag zum Klimaschutz im Schwerlastverkehr leisten. Mit fortschreitender Technologiereife und im Fall deutlicher Kostendegressionen werden auch FCE-Lkws bei mittelschweren und schweren Nutzfahrzeugen Ende der 2020er Jahre und in den 2030er Jahren an Bedeutung gewinnen. Batterieelektrisch betriebene Nutzfahrzeuge spielen in allen Segmenten eine Rolle. Aufgrund der ökonomischen Anforderungen an die Nutzlast und Reichweite sowie an die logistischen Abläufe wird der Einsatz im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge jedoch vorwiegend auf Strecken bis zu 300 bis 500 km limitiert bleiben.

Abb. 8.2 Energieverbrauch nach Energieträger & Verkehrsträger

Angaben in TWh



Energieträger (TWh)	2018	2030	2045
Gase (methanbasiert)	6,4	25,5	12,3
Benzin	212,6	138,0	6,9
Diesel	410,2	194,8	26,6
Kerosin	121,5	113,6	113,3
Strom	11,7	55,3	110,3
Wasserstoff	0,0	8,9	58,8
Summe	762,4	536,1	328,1

Verwendung (TWh)	2018	2030	2045
PKW	407,1	243,4	73,4
ÖPNV	8,5	7,3	8,3
Nutzfahrzeuge	205,6	147,9	103,4
Schiene	16,7	20,8	23,2
Wasser	2,4	2,5	2,6
Luftfahrt	121,5	114,0	116,7
Mikromobilität	0,7	0,3	0,5
Summe	762,4	536,1	328,1

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Die Schiene gewinnt sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr Anteile. Damit verbunden ist ein deutlicher Anstieg an Fahrgastzahlen und Tonnage. Dieses Ziel setzt voraus, dass die dafür notwendigen infrastrukturellen Anpassungen geschaffen werden können und sich die Wettbewerbsfähigkeit der Bahn deutlich erhöht. Gleiches gilt für den ÖPNV. Die angenommenen Zuwächse der Verkehrsleistung werden durch eine Verlagerung aus dem MIV infolge höherer Kosten und durch ein gleichzeitig verbessertes Angebot des ÖV erreicht. Dazu bedarf es auch einer deutlich stärkeren Verknüpfung der Verkehrsträger. Aufgrund langer Planungs- und Umsetzungszeiträume für Schienenverkehre wird von einem Bedeutungszuwachs von Busverkehren ausgegangen – sowohl im Regional- als auch im Langstreckenverkehr. Für einen höheren Anteil an alternativen Antrieben im Schienenpersonenverkehr werden hauptsächlich Vorgaben für

die Ausschreibungen der Verkehrsleistung durch die Trägergesellschaften verantwortlich sein.

Für den nationalen Luftverkehr wird angenommen, dass eine bessere Verknüpfung von Schiene und Luftverkehr die Attraktivität der Schiene erhöhen wird, sowohl für nationale Verbindungen als auch für Zubringerverkehre zu internationalen Flügen. Aufgrund der Annahme einer anhaltend steigenden Internationalisierung der wirtschaftlichen Zusammenarbeit und einer hohen Zahlungsbereitschaft der Kunden im Luftverkehr steigen jedoch die von Deutschland ausgehenden internationalen Luftverkehre an. Dies wird maßgeblich den Bedarf an Powerfuels erhöhen, auch wenn die internationalen Luftverkehre nicht Teil der deutschen Klimabilanz sind.

8.1 Weiterentwicklung der Antriebsarten, erneuerbaren Energien und neuen Konzepte

Elektrifizierte Antriebe werden durch mehr Wettbewerb und politische Rahmenbedingungen den Pkw-Markt verändern

Das Szenario KN100 sieht, wie auch die Nationale Plattform Mobilität, bis 2030 14 Millionen batterieelektrische Pkws im Markt, 9 Millionen davon rein elektrisch (Battery Electric Vehicles, BEVs) und 5 Millionen Plug-in-Hybride (PHEVs). Bis 2045 steigt die Zahl reiner BEVs im Bestand auf 32 Millionen. Die Pfadausprägung „Electrons“ geht sogar von 11 Millionen BEVs im Jahr 2030 und 34 Millionen im Jahr 2045 aus. Die „Molecules“-Ausprägung ist hingegen durch eine stärkere Hybridisierung geprägt mit 8 Millionen PHEVs 2030 und 12 Millionen 2045. Parallel werden die Grundlagen für eine intensivere Nutzung von Powerfuels für die weitere Phase auf dem Weg zur Klimaneutralität gelegt.

Bisher ist die Marktentwicklung von **elektrifizierten Fahrzeugen** stark subventionsgestützt. Gleichwohl wird der Neuwagenabsatz noch immer von Verbrennungsfahrzeugen dominiert. Ob und welche Pfadentwicklung am wahrscheinlichsten ist, wird von der Attraktivität und Wettbewerbsfähigkeit der Pkw-Modelle, der Geschwindigkeit beim Aufbau der Ladeinfrastruktur

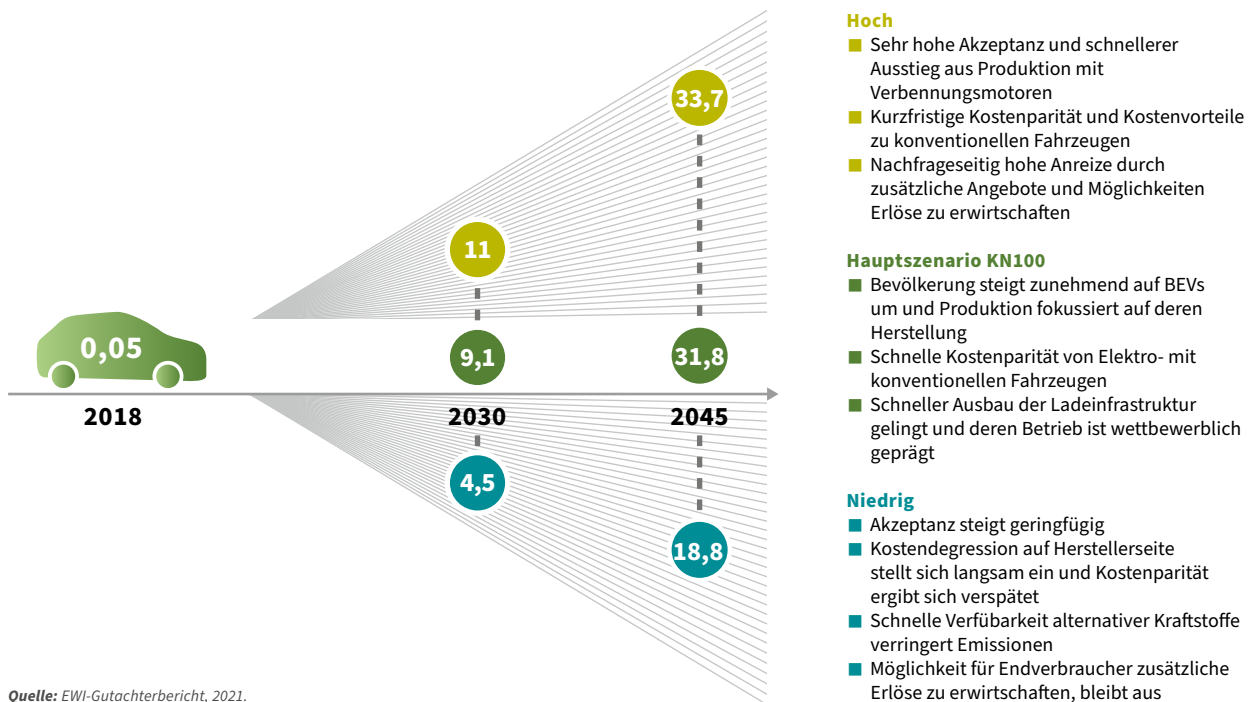
sowie der Attraktivität von Verbrennungsfahrzeugen für die Verbraucherinnen und Verbraucher abhängen. Die staatliche Subventionierung des gewerblichen und privaten Pkw-Kaufs resultierte darin, dass von den Elektro-Pkws in etwa zur Hälfte PHEVs und BEVs neu zugelassen wurden.

Damit sich die in den Transformationspfaden dargestellte Entwicklung einstellt, müssten

- elektrifizierte Pkws und Lkws eine größere Modellvielfalt aufweisen und der Wettbewerbsdruck zwischen den Herstellern steigen, damit die Fahrzeuge auch ohne klassische Subventionen wettbewerbsfähig werden. Auch müssten BEVs bereits in den kommenden Jahren gegenüber PHEVs sowohl bei privaten als auch bei gewerblichen Kunden finanziell attraktiver werden.
- der öffentliche und der marktgetriebene Ladeinfrastrukturaufbau in Deutschland, in den Nachbarstaaten und in der gesamten EU deutlich forciert werden.
- Rahmenbedingungen für Dienstleistungen geschaffen werden, die einerseits energiesystemdienliches Laden anreizen und andererseits die Tragfähigkeit einer Schnellladeinfrastruktur ermöglichen.

Abb. 8.3 Indikator „Elektromobilität , Batteriebetriebene Pkw“

Angaben in Millionen Fahrzeuge



Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Der Markt der schweren Nutzfahrzeuge wird von den Nutzeranforderungen geprägt bleiben

Im Nutzfahrzeugbereich dominieren in den 2020er Jahren weiterhin Diesel-Lkws als kostengünstige Option. Ihre Bedeutung nimmt jedoch ab, abhängig vom Marktumfeld für erneuerbare Kraftstoffe, den Vorgaben zu den Flottenzielen und den anderweitig gesetzten politischen Rahmenbedingungen. Im Szenario KN100 wird der Lkw-Bestand 2030 (Nutzfahrzeuge über 12 Tonnen) geprägt sein von 72 Prozent reinen Diesel-Lkws, 10 Prozent LNG-Lkws sowie 9 Prozent BEVs und 4 Prozent H₂-Lkws. Innerhalb der 2030er Jahre ändert sich das Bild der Zulassungsverteilung, sodass 2045 knapp 50 Prozent der Lkws auf Basis der Brennstoffzellentechnologie betrieben werden und 20 Prozent batterieelektrisch.

Ein Wandel der Antriebe setzt voraus, dass

- BEV-Lkws deutlich günstiger werden und über die Maut sowie potenzielle lokale Zufahrtspriorisierungen Wettbewerbsvorteile gegenüber Diesel-Lkws erhalten.

- der Aufbau der Ladeinfrastruktur der BEV-Lkws als Teil der Kraftstoffkosten über möglichst viele Fahrzeugnutzer verteilt wird. Die Attraktivität könnte auch steigen, wenn Transporteure die Möglichkeit erhalten, über entsprechende Dienstleister privat und gewerblich produzierten Grünstrom durch die Inverkehrbringer auf die THG-Minderungsquote anrechnen zu lassen.
- LNG-Lkws in einem steigenden Maße erneuerbare Kraftstoffe tanken und es ermöglicht wird, über Quoten, Mautberücksichtigung und freiwillige Instrumente zur Anrechnung von erneuerbaren Kraftstoffen Kostenvorteile zu generieren.
- die Entwicklung leistungsfähiger und verlässlicher H₂-Lkws beschleunigt wird, sodass diese ab der zweiten Hälfte der 2020er Jahre marktreif sind und die Kosten von Fahrzeugen und von grünem Wasserstoff deutlich sinken – dies als Voraussetzung dafür, gegenüber den anderen Alternativen wettbewerbsfähig zu werden. Auch würde ein möglichst einheitlicher Betankungsstandard für die FCEVs und die H₂-Tankstelleninfrastruktur Vorteile bieten.

Erneuerbare Energieträger sind der maßgebliche Hebel zur Treibhausgasminderung aller Verkehrsträger

Wie hoch der Anteil erneuerbarer Energieträger in den kommenden Jahren sein wird, hängt maßgeblich von der Erneuerbare-Energien-Richtlinie und der nationalen THG-Minderungsquote sowie weiteren Instrumenten ab. Gemäß Szenario KN100 werden mindestens 41 TWh biogene Energieträger und 13 TWh Wasserstoff und Wasserstoffderivate (Powerfuels) zum Erreichen der Klimaziele 2030 benötigt; 2045 wären es 197 TWh Powerfuels.

Letztendlich sind erneuerbare Kraftstoffe damit die Grundvoraussetzung für das Erreichen der kurz- und mittelfristigen Klimaziele, gerade wenn sich die in dieser Studie getroffenen Annahmen zur Steigerung von Energieeffizienz, Verkehrsverlagerung und Auslastung der Fahrzeuge nicht erfüllen.

Daher sollten

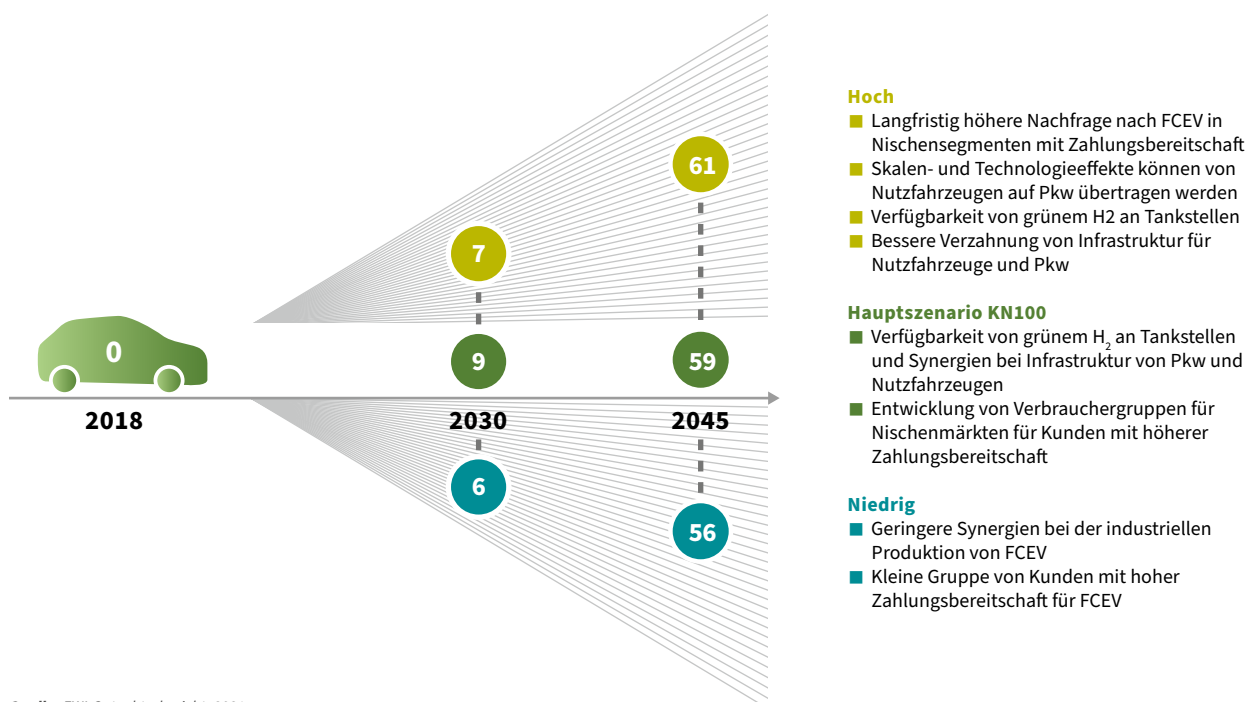
- die Erneuerbare-Energien-Richtlinie bzw. die nationale Umsetzung der THG-Minderungsquote eher ambitionierter als zu konservativ ausgestaltet werden und dabei bereits die notwendigen THG-Minderungsziele und Kraftstoffmengen nach 2030 in den Blick nehmen.

- die Synergien und technischen Zusammenhänge bei der Produktion von strombasierten Kraftstoffen Beachtung finden. Gerade flüssige Powerfuels werden nicht nur für die Schifffahrt oder Luftfahrt produziert, sondern auch immer anteilig im Straßenverkehr genutzt werden.
- die unterschiedlichen Zahlungsbereitschaften und Wettbewerbssituationen verschiedener Sektoren und Bereiche des Verkehrs berücksichtigt werden. Ziel sollte es sein, in den kommenden Jahren möglichst schnell und auch ohne Förderprogramme den Powerfuels-Markt zu entwickeln. Davon können dann in der Zukunft auch Bereiche mit geringerer Zahlungsbereitschaft und internationalem Wettbewerb (z. B. Industrie) profitieren.
- erneuerbare Stromgestehungskapazitäten innerhalb Deutschlands deutlich beschleunigt zugebaut werden. Nur mit erheblich höheren nationalen erneuerbaren Strommengen wird auch die Elektromobilität das Anforderungsniveau der Klimaziele erfüllen können.

Die Stellhebel zur Beschleunigung des Anteils und der Menge erneuerbarer Kraftstoffe sind vielfältig. Die kommende Bundesregierung sollte mit einer Kombination aus Quoten, Steueranpassungen, Förderung und freiwilligen Instrumenten sowie der Festlegung von Kriterien (z. B. Nachhaltigkeitsstandards und Zertifizierungen) den Markthochlauf forcieren.

Abb. 8.4 Indikator „Wasserstoffnachfrage im gesamten Verkehrssektor“ (in Abhängigkeit vom FCEV-Pkw-Bestand und der Antriebseffizienz aller Pkw)

Angaben in TWh



Eine deutliche Erhöhung der nationalen **THG-Minderungsquote** bzw. des EU-Entwurfs zur RED III würde dabei sowohl dem aktuell wachsenden Fahrzeugbestand als auch dem großen Bedarf an erneuerbaren Energieträgern nach 2030 Rechnung tragen. Auch müsste aus Klimaschutzperspektive bereits heute alles darangesetzt werden, die Verkehrsemissionen sofort und nicht erst im Jahr 2030 zu reduzieren.

Vom Hochlauf strombasierter Kraftstoffe könnten dabei in den kommenden Jahren auch Sektoren profitieren, die eine geringere Zahlungsbereitschaft aufweisen und im internationalen Wettbewerb stehen. Die im Entwurf der RED III empfohlene Aufhebung von Mehrfachanrechnungen ist grundsätzlich zu begrüßen und erhöht die Transparenz der realen THG-Minderung einzelner Energieträger. Gleichwohl müssten gerade für heute noch kostenintensive erneuerbare Energieträger nicht biogenen Ursprungs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBOs) schnelle Marktzugangsoptionen zum Beispiel über Unterquoten geschaffen werden.

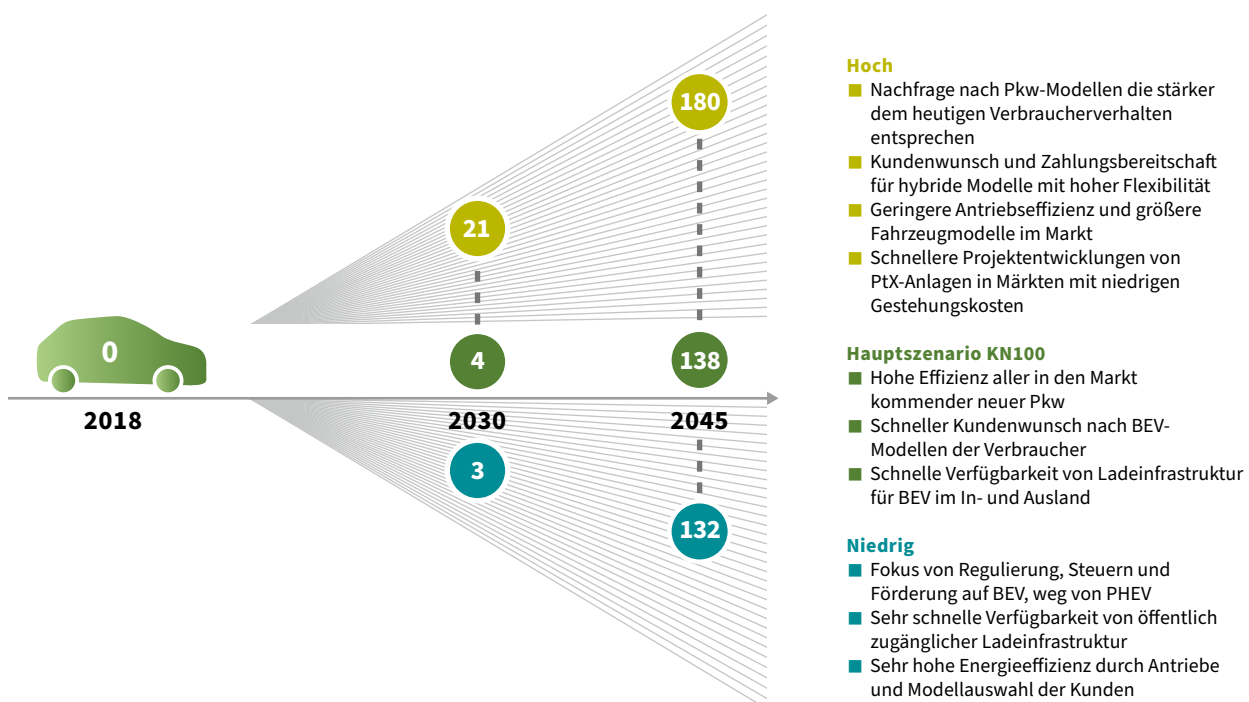
Powerfuels werden dadurch charakterisiert sein, dass ihre Kosten mit zunehmenden Skalen sinken. Der frühe Markthochlauf sollte daher durch limitierte Ausschreibungsprogramme, wie beispielsweise „H₂ Global“, flankiert werden. Solche Programme minimieren das finanzielle Risiko der „First Mover“ und erlauben technologischen Fortschritt.

Die EU-Kommission hat ebenfalls einen Vorschlag für eine **Mindestbesteuerung** von Energieträgern vorgelegt, der grundsätzlich begrüßenswert ist. Er bietet eine Grundlage für eine stärkere Kostendifferenzierung von erneuerbaren und fossilen Energieträgern. Damit besteht die Option, dass Quoten günstiger zu erfüllen sind oder auch Kraftstoffmengen außerhalb von Quotenanforderungen in den Markt gelangen.

Auch **freiwillige Instrumente**, wie die Anrechnung von Powerfuels auf die Flottenzielwerte von Pkws und Lkws oder grüne Label, die einen gesicherten Nachweis über die Vertankung von erneuerbaren Kraftstoffen (unabhängig ob in Form von Strom, gasförmig oder flüssig) liefern, böten ein Potenzial, über die THG-Quote hinaus emissionsarme Energieträger in den Markt zu bringen. Die über ein Nachweissystem (grünes Label) nachvollziehbaren erneuerbaren Kraftstoffmengen sollten dann mit Instrumenten wie der Lkw-Maut verrechnet werden können.

Ein wesentliches Hemmnis für die Produktion von Powerfuels sind heute fehlende nationale Festlegungen und Definitionen von **Nachhaltigkeitskriterien** der EU. Dies betrifft insbesondere Strombezugskriterien und CO₂-Quellen. Hier sollte sich die Bundesregierung für eine schnelle Lösung auf EU-Ebene einsetzen und gleichzeitig eigene Vorschläge vorlegen, die auf ein möglichst zügiges Marktwachstum ausgerichtet sind. Gerade für die Steigerung des Anteils von flüssigen Biokraftstoffen müssten ebenfalls in den kommenden Jahren **Qualitätsnormen** für die höhere Beimischung in Otto- und Dieselmotoren zum Teil neu festgelegt werden.

Abb. 8.5 Indikator „Nachfrage nach flüssigen Powerfuels im gesamten Verkehrssektor“ (in Abhängigkeit vom Pkw-Bestand mit Verbrennungsmotoren und der Antriebseffizienz aller Pkw)
Angaben in TWh



Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

8.2 Verbesserung der spezifischen Effizienz zur Reduzierung des Energiebedarfs

Der spezifische Energieverbrauch von Pkws und Lkws, aber auch von Bussen und in der Luftfahrt hat sich im vergangenen Jahrzehnt verbessert. Gleichwohl gibt es viele gegensätzliche Tendenzen, die die technischen Fortschritte relativieren. So sind beispielsweise die verkauften Fahrzeugmodelle größer, schwerer und leistungstärker geworden. Auch trägt eine wachsende und immer ältere Fahrzeugflotte bei Pkws und leichten Nutzfahrzeugen nur ungenügend zur Emissionsminderung bei.

Die EU-Flottenzielwerte waren und sind daher für die Fahrzeughersteller das maßgebliche Orientierungsinstrument für die Reduktion des Energieverbrauchs der Neuwagen bzw. für deren notwendige Teil- und Vollelektrifizierung. Unter der Annahme der bereits bekannten und zu erwartenden Flottenvorgaben der EU haben sich mittlerweile einige Fahrzeughersteller gegenüber ihren Shareholdern zu einer Fokussierung auf vollständig elektrifizierte Pkws bekannt. Unter dieser Voraussetzung und unter Berücksichtigung des Vorschlags der EU, ein separates Emissionshandelssystem für den Verkehr (und Gebäude) aufzubauen, könnte auch über die Neugestaltung der **Flottenzielwerte innerhalb eines Emissionshandelssystems** mit einem limitierten und stark sinkenden Emissionsbudget nachgedacht werden. Dieses System müsste jedoch Einkommensunterschiede innerhalb der EU beachten und den Umstand, dass der größte Posten der Haushaltsausgaben von einkommensschwachen Haushalten im Bereich Wohnen liegt.

Das Erreichen der Flottenzielwerte für Pkws und Nutzfahrzeuge ist im hohen Maße von anderen politisch beeinflussten Rahmenbedingungen, wie Kraftstoffkosten, Fahrzeug- und Neuzulassungssteuern (oder Abgaben) oder emissionsreduzierenden und emissionsinduzierenden Subventionen, abhängig. Für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben bedarf es des Aufbaus einer neuen Infrastruktur. Das bedeutet, dass nicht allein die Hersteller für die Steigerung der Fahrzeugeffizienz verantwortlich sind, sondern zunehmend auch die gewerblichen und privaten Fahrzeugkäufer sowie die einzelnen EU-Mitgliedsstaaten. Eine Verhaltensänderung durch sehr teure und sozial umstrittene Subventionen für den Kauf von Neuwagen sollte nur ein zeitlich begrenzter Impuls in der frühesten Marktphase sein, um Skalen und Sichtbarkeit zu erzeugen. Nun sollte es jedoch darum gehen, die Kunden zu einer Verhaltensänderung beim Kauf durch eine **staatlich induzierte Kostendifferenzierung in Abhängigkeit von den CO₂-Emissionen** zu bewegen.

Für schwere Nutzfahrzeuge stellt sich die Situation noch einmal komplexer dar, als bei Pkws und leichten Nutzfahrzeugen. Die Marktreife ist bei elektrifizierten Antrieben noch nicht so weit wie bei Pkws, die Gesamtkosten der Fahrzeuge (Total Cost of Ownership, TCO), das wesentliche Entscheidungskriterium für den Kauf von gewerblichen Fahrzeugen, sind deutlich höher. Die Infrastruktur ist bisher kaum verfügbar. Im Fernverkehr handelt es sich außerdem um einen Markt im internationalen Wettbewerb mit einem hohen Anteil osteuropäischer Fahrzeuge. Gerade in diesen Ländern wurden bisher kaum Rahmenbedingungen für einen zukünftigen Markthochlauf von elektrifizierten Lkws geschaffen. Daher könnte es sich gerade für diesen Bereich aus Klimaschutzgründen als Vorteil erweisen, wenn eine **Anrechenbarkeit des Einsatzes von Powerfuels auf die Zielwerte** der Fahrzeughersteller möglich würde. Damit könnten auch hohe Strafzahlungen aller Fahrzeughersteller, die gegebenenfalls nicht zielorientiert in die Weiterentwicklung von emissionsmindernden Technologien und Kraftstoffen fließen, vermieden werden.

Die Transformationspfade der Studie sehen auch eine **höhere Auslastung** aller Verkehrsmittel vor. Dies widerspricht dem Trend der letzten Jahre, würde jedoch zu einem deutlich verringerten Energieverbrauch bei gleichbleibend hoher Mobilität führen. Eine solche Entwicklung ist dann zu erwarten, wenn die Folgekosten des Verkehrs insgesamt, der verschiedenen Verkehrsmittel und der unterschiedlichen Energieträger transparent auf die Verbraucherinnen und Verbraucher umgelegt werden. Erst dies wird den ökonomisch notwendigen Druck erzeugen, Fahrzeuge effizienter im Sinne einer besseren Auslastung zu nutzen. Dies trifft sowohl auf Privatfahrzeuge als auch auf gewerbliche Sharing-Angebote zu. Gleichzeitig wird dies auch die Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge (unabhängig vom Antrieb) steigern und kann die Kosten für die Nutzung erneuerbarer Energieträger reduzieren.

8.3 Öffentlich zugängliche und geteilte Verkehrsmittel für neue Mobilitätsangebote

Stärkung des ÖV als Rückgrat für bezahlbare Mobilität

Auch wenn der Begriff „bezahlbare Mobilität“ nicht definiert ist und in zunehmender Häufigkeit mit einem sehr unterschiedlichen Verständnis benutzt wird, ist der Öffentliche Verkehr (ÖV) heute ihr Rückgrat. Denn es sind gerade einkommensschwache Haushalte, die auf den ÖV angewiesen sind. Der ÖV als Grundlage eines kostengünstigen Mobilitätsangebots für alle Einkommensschichten muss nach der COVID-19-Pandemie jedoch flexibler, besser verknüpft, verlässlicher und insgesamt wettbewerbsfähiger werden.

Entgegen dem Trend der letzten Jahre geht das Zielszenario der Studie davon aus, dass der ÖV-Anteil des Modal Split bereits bis 2030 auf über 21 Prozent steigt. Dafür notwendig wäre eine Steigerung der Schienenpersonenverkehrsleistung um 50 Prozent bis 2030 und sogar um 80 Prozent bis 2045. Im gesamten ÖPNV beträgt die Steigerung der Verkehrsleistung bis 2030 rund ein Drittel gegenüber dem Referenzjahr 2018. Bis 2045 soll hier sogar eine Verdoppelung stattfinden.

Der ÖV hat gegenüber dem Motorisierten Individualverkehr (MIV) in den letzten Jahren ökonomisch an Wettbewerbsfähigkeit verloren. Neue Mobilitätsangebote und IT-Lösungen können dazu beitragen, die Qualität und den Komfort einer vernetzten Mobilität zu erhöhen.

Um Marktanteile im ÖV zu gewinnen, bedarf es

- einer besseren Verknüpfung zwischen den Angeboten des ÖV und anderen Verkehrsmitteln. Dies betrifft nicht nur den MIV, sondern besonders geteilte Mobilitätsangebote wie Car-sharing oder Formen der Mikromobilität.
- einer schnelleren Planung und Umsetzung von Baumaßnahmen und der schnelleren Zulassung von Fahrzeugen (insbesondere im Schienenverkehr). Aufgrund der langen Planungs- und Realisierungszeiträume des Schienenverkehrs müssten Busse eine neue, herausgehobene Bedeutung als leistungsfähiges und kostengünstiges Massentransportmittel im Regional- und Fernverkehr erhalten.
- bereits kurzfristig adäquater Preissignale für die THG-Emissionen aller Verkehrsträger, einer Fokussierung von Fördermaßnahmen auf den Umweltverbund und einer Anpassung des Straßenverkehrsrechts mit dem Ziel, den kommunalen Handlungsspielraum für verkehrsplanerische Maßnahmen zu vergrößern.

- gleichzeitig Maßnahmen, durch die das Angebot des ÖV gestärkt wird und die angebotenen Dienstleistungen attraktiver und verlässlicher werden. Dies würde auch vielerorts die Verknüpfung mit dem MIV oder mit Mikromobilitätsangeboten verbessern.
- über das Straßenverkehrsrecht einer größeren Entscheidungsfreiheit der Kommunen, wie sie den Verkehr entsprechend der Klimaziele steuern wollen. Dadurch könnte ein wirtschaftliches Potenzial für Mobilitätsdienstleistungen mit höheren Auslastungsquoten entstehen und Privatfahrzeuge könnten stärker ausgelastet werden.

Daher muss die Stärkung von gebündelten, geteilten Verkehren an der Schnittstelle zum ÖV wesentliches Ziel der Bundesregierung werden. Das bedeutet jedoch eine Verbreiterung und Verbesserung des Angebots und flexiblere Preis- und Tarifmodelle. Es bedeutet auch eine insgesamt höhere Verlässlichkeit und Qualität. Dies wird jedoch nur mit deutlich erhöhten Gesamtinvestitionen in den ÖV als Pull-Maßnahmen sowie einem Abbau von Subventionen für den privaten Individualverkehr als Push-Maßnahme möglich sein. Weiterhin wären mehr Wettbewerb und neue Angebotsformen der Beförderung nötig.

Da der ÖV außerhalb der hochverdichteten Nachfrageregionen einen strukturellen Nachteil gegenüber dem MIV hat, wird es in den kommenden Jahren **massive Investitionen in eine Erweiterung des Angebots und die digitale und physische Verknüpfung** mit Sharing-Diensten und geteilten MIV-Dienstleistungen geben müssen. Dies würde die Chance auf ein breites und flexibles Mobilitätsangebot für alle Bevölkerungsgruppen bieten. Weil der ÖV in den letzten Jahren auch wirtschaftlich gegenüber dem MIV verloren hat, sollten **Fördermittel prioritär für den ÖV** und nicht für eine Subvention des MIV, der besonders intensiv von Haushalten mit mittleren und hohen Einkommen genutzt wird, eingesetzt werden. Subventionen in den MIV schwächen die Wettbewerbsfähigkeit von öffentlich zugänglichen Mobilitätsdienstleistungen der Zukunft und reduzieren den finanziellen Anreiz, diese anzunehmen.

Veränderte Ausschreibungs- und Angebotsmodelle, ein **stärkerer Wettbewerb** zwischen privaten und öffentlichen Dienstleistern und mehr On-Demand-Dienste könnten die Kostensteigerungen des ÖV reduzieren. Darüber hinaus könnten **flexiblere Preismodelle und digitale Fahrkarten** dem Mobilitätsbedarf vieler Kundinnen und Kunden besser gerecht werden. Die Preise und Fahrkarten sollten dann aber nicht allein den klassischen ÖV, sondern die damit verbundenen Dienstleistungsangebote abdecken.

Ein **Vorteil des ÖV** und geteilter Mobilitätsdienstleistungen in der Zukunft könnte darin liegen, dass tendenziell **steigende Investitionskosten** für die Fahrzeuge und die Energieinfrastruktur sowie höhere Energiekosten besser **auf viele Nutzer umgelegt** werden können. Dass die Verbraucherinnen und Verbraucher heute überwiegend den MIV nutzen, liegt auch daran, dass sie einerseits eine hohe Zahlungsbereitschaft für Flexibilität und Komfort haben und andererseits die politischen Rahmenbedingungen auf eine kostengünstige Individualmobilität ausgerichtet sind.

Ziel der Bundesregierung sollte es daher sein, **mit einem Paket von Push- und Pull-Maßnahmen** gebündelte, geteilte Verkehre an der Schnittstelle zum klassischen ÖV mit den heute zur Verfügung stehenden Technologiepotenzialen zu stärken. Je geringer die Bedeutung des ÖV in den kommenden Jahren sein würde, umso höher wäre der Bedarf an EE-Strom und anderen erneuerbaren Kraftstoffen, die zusätzlich zu den in den Transformationspfaden dargestellten Mengen schnell in den Verkehrsmarkt kommen müssten. Beides erscheint angesichts der aktuellen und prognostizierten Entwicklungen kaum umsetzbar.

Neue und geteilte Mobilitätsformen benötigen einen veränderten Rahmen für tragfähige Geschäftsmodelle

Geteilte private Verkehre und die Mikromobilität sind heute Nischenprodukte der großen Metropolen. Unter den richtigen Rahmenbedingungen als Teil eines Gesamtverkehrssystems könnten sie jedoch insbesondere im urban verdichteten Raum und im weiteren Umland einen Hebel zur Reduktion des MIV darstellen. Wie hoch das THG-Minderungspotenzial sein wird, bleibt abzuwarten. Es wird sehr stark von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen des MIV und den Rahmenbedingungen in den Kommunen abhängig sein. In den Szenarien dieser Studie spiegelt sich die Bedeutung des Mobilitätswandels durch die Annahme eines steigenden Besetzungsgrads der Verkehrsmittel, der Reduktion der Pkws (minus 10 Millionen) und von mehr als dreieinhalb Mal so viel Mikromobilität bis 2050 wider.



WIE STOCKHOLM DURCH AUSBAU DES ÖPNV UND EINFÜHRUNG EINER CITY-MAUT DAS VERKEHRSVERHALTEN VERÄNDERT HAT

Europaweit wurde vor allem im skandinavischen Raum begonnen, die City-Maut einzuführen. Später folgten weitere europäische Städte. Vorreiter war hier 1986 Bergen, 1990 bzw. 1991 folgten Oslo und Trondheim. Gerade im ersten Jahrzehnt der 2000er folgten eine Reihe von weiteren Städten in Europa. Als besonders erfolgreiches Beispiel sticht die im Jahr 2005 eingeführte City-Maut in Stockholm heraus. Seit Beginn der Überlegungen zur City-Maut in Stockholm wurden Bedenken und Proteste laut. Das Vorhaben wurde daher von Anfang an als zeitlich begrenzter Versuch durchgeführt. Am Ende der Testperiode sollte eine Volksabstimmung über eine Weiterführung der City-Maut entscheiden.

Der Versuch begann am 22. August 2005 mit einer deutlichen Angebotsausweitung des öffentlichen Personennahverkehrs und endete am 31. Juli 2006. Straßenbenutzungsgebühren wurden zwischen dem 3. Januar 2006 und dem 31. Juli 2006 erhoben. Die Angebotserweiterung des öffentlichen Personennahverkehrs sollte bis zum 31. Dezember 2006 aufrechterhalten werden. Ein Referendum zur Abstimmung der Weiterführung von städtischen Straßenbenutzungsgebühren in Stockholm war für den 17. September 2006 geplant.

Die deutliche Angebotserweiterung des ÖPNV führte dazu, dass zur Einführung der Bepreisung der „Schockeffekt“ der Gebühr optimal funktionieren konnte. Durch die attraktive Alternative des deutlich erweiterten ÖPNV-Angebots konnten Personen nachhaltig für das Umsteigen auf den ÖPNV gewonnen werden.

Auf die Frage nach einer permanenten Einführung der städtischen Straßenbenutzungsgebühren zeigte sich ein deutlicher Trend. Nur 30 Prozent der befragten Teilnehmerinnen und Teilnehmer äußerten sich vorab positiv zur permanenten Einführung. Dieser Wert stieg jedoch nach Einführung der Testphase. Im abschließenden Referendum am 17. September 2006 stimmten 51 Prozent der Stimmberechtigten für die Weiterführung des City-Maut-Konzepts. Stimmberechtigt waren dabei die Bürgerinnen und Bürger der Stadt Stockholm. Das City-Maut-System wurde daraufhin beibehalten.

Im Testzeitraum wurde eine Reduzierung des MIV-Verkehrs um bis zu 24 Prozent und eine Minderung der CO₂-Emissionen um 14 Prozent innerhalb des City-Maut-Bereichs ermittelt.

Die Bereitstellung von ausreichend Raum für neue Mobilitätsdienstleistungen und die Finanzierung des ÖV stellen die Kommunen vor oftmals kaum lösbare Aufgaben. Eine viel diskutierte, in anderen internationalen Metropolen jedoch bereits genutzte Möglichkeit, dieses Problem zu mindern, stellt die Einführung **einer Bepreisung der Zufahrt zu urbanisierten Räumen**, zum Beispiel über eine City-Maut, dar. Die City-Maut ist ein in anderen Ländern bereits erprobtes Verfahren, in Deutschland aber bislang noch überhaupt nicht existent. Städte und Kommunen haben dabei auch große regulatorische Herausforderungen bzw. Hemmnisse.

Daher sollte die Möglichkeit geschaffen werden, **in Pilotprojekten die Einführung flexibler Bepreisungssysteme** zur Stärkung des Umweltverbunds und zur Verringerung des MIV zu erproben. Hierbei steht die Optimierung des Spiels zwischen Push- und Pull-Faktoren im Vordergrund. Um den Effekt des „Preisschocks“ optimal zu nutzen, ist die Bereitstellung von zusätzlichen Angeboten im ÖV und alternativen Mobilitätsangeboten bereits vor der Einführung einer Bepreisung elementar. In diesen Pilotprojekten werden die Effekte und die Akzeptanz des Zusammenspiels dieser Push- und Pull-Faktoren untersucht und optimiert. Durch die eingenommenen Mittel können im Nachhinein die Kosten des Bepreisungssystems und die Stärkung des Umweltverbunds finanziert werden. Die Bepreisung führt bei der richtigen Abstimmung der Push- und Pull-Faktoren insgesamt zu einem niedrigeren Verkehrsaufkommen und zu einem höheren Besetzungsgrad. Die Ergebnisse anderer Metropolen zeigen ebenfalls eine entsprechende CO₂-Minderung.

Um neue Mobilitätsdienstleistungen zu etablieren, müssten ebenfalls **privat und häufig kostenlos genutzte Verkehrsflächen** in Nutzungsflächen für deutlich stärker frequentierte, geteilte Verkehrsmittel **umgewidmet werden**. Dies könnte Raum für multimodal genutzte Mobility Hubs schaffen, die beispielsweise auch die Möglichkeit für eine hoch ausgelastete Nutzung von Ladeinfrastruktur oder Wechselakku-Stationen bieten – und dies sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr.

Neben den infrastrukturellen Voraussetzungen sollten geteilte Mobilität und Mikromobilität zukünftig auch stärker als Teil des gesamten öffentlich zugänglichen Verkehrs gedacht werden. So sollten **die Ausschreibungen von Kommunen für den Öffentlichen Verkehr** nicht allein auf die klassischen Verkehrsangebote beschränkt bleiben, sondern auch **Ergänzungen durch neue Mobilitätsangebote einbeziehen**, die dann durch private, flexibler als öffentliche Unternehmen agierende Dienstleister erbracht werden. Dies wäre ein Hebel, damit sich Mikromobilität nicht nur auf die verdichteten Räume konzentriert.

Luftfahrt als Teil der internationalen Verantwortung

Während sich der nationale Luftverkehr in den letzten Jahren auf etwa konstantem Niveau bewegt, sind die internationalen Luftverkehre aus und nach Deutschland bis 2019 gestiegen. Infolge der COVID-19-Pandemie wurden jedoch von März bis Mai 2020 fast 90 Prozent der Flüge in Europa gestrichen und nach Einschätzung von EUROCONTROL ist eine Rückkehr auf Vorkrisenniveau frühestens ab 2024 absehbar⁴. Ein Wachstum der internationalen Luftverkehre um knapp 10 Prozent bis 2050, das in dem Szenario KN100 der Studie unterstellt wird, würde den Anstieg der europäischen und globalen THG-Emissionen beschleunigen, falls nicht entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Auf die nationale Zielerreichung hätte es hingegen keine Auswirkungen.

Verantwortlich für die Emissionen in der Luftfahrt sind insbesondere Geschäftsreisende und durch einkommensstärkere Teile der Gesellschaft induzierte Flüge. Der bisher als Entwurf vorliegende dritte Teilbericht des sechsten Sachstandsberichts des Weltklimarats (IPCC) geht davon aus, dass global betrachtet die wohlhabendsten 1 Prozent der Weltbevölkerung für 50 Prozent der Emissionen aus der Luftfahrt verantwortlich sind⁵. Eine adäquate Bepreisung der Luftfahrt entsprechend der Treibhausgasfolgekosten wäre daher vielfach weniger eine soziale Frage. Vielmehr verhindern industriepolitische Interessen einzelner Staaten wirksame internationale Klimaschutzmaßnahmen.

Die wichtigsten Maßnahmen für die kommenden Jahre werden daher sein: Mechanismen für eine wirksame und **THG-abhängige Bepreisung** des Luftverkehrs zu schaffen, die **Effizienz** der Luftverkehrsflotte zu steigern und deutlich höhere Anteile von **erneuerbaren Flugkraftstoffen (SAF)** einzusetzen.

Die bestehenden Abgaben der Luftfahrt aus der Luftverkehrssteuer und die nicht kostenlos zugeteilten Emissionszertifikate des ETS beeinflussen dabei hauptsächlich den Wettbewerb zwischen europäischen und nicht-europäischen Netzwerk-Airlines mit Interkontinentalflügen. Daher muss es das Ziel der Bundesregierung sein, sich auf internationaler und EU-Ebene für Abgabemechanismen einzusetzen, die alle Airlines betreffen.

Im Bereich der erneuerbaren Flugkraftstoffe hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, bis 2030 zwei Prozent PtL-Kerosin im innerdeutschen Luftverkehrsmarkt zu nutzen. Die EU strebt eine Quote von sogenannten „Sustainable Aviation Fuels“ (SAF) von fünf Prozent an (inklusive 0,7 Prozent PtL). Hier gilt es, die **Zielsetzungen zu harmonisieren**. Da die ReFuelAviation für 2035 bereits 20 Prozent SAF (davon 5 Prozent PtL) vorsieht, sollte sich

⁴ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021c.

⁵ Harvey & Tremlett, 2021.

die Bundesregierung dafür einsetzen, dass erstens die Gesamtquote von SAF bis 2030 in Deutschland ebenfalls mindestens fünf Prozent beträgt und zweitens der Anteil von PtL-Kerosin bis 2030 bei mindestens 50 Prozent liegt und anschließend weiter steigt.

Um die Markteinführung von SAF zu beschleunigen, könnten europäische Ausschreibungen, ähnlich denen der aktuellen

Differenzkostenförderungen in Deutschland, Investitionsrisiken in der frühen Marktphase und mögliche Wettbewerbsnachteile für europäische gegenüber außereuropäischen Airlines reduzieren. Perspektivisch muss es jedoch das Ziel sein, für alle aus Europa abgehenden Flüge pro Passagier bis zu seinem Endziel einen SAF-Aufschlag auf die Ticketpreise zu erheben, sollte der Gesamtflug nicht oder in Teilen ohne SAF-Beimischung erfolgen.

8.4 Mehr Ehrlichkeit in der politischen und öffentlichen Kommunikation

Die Szenarien der Studie zeigen eine Veränderung der Verkehrsmittelwahl sowie der Wahl effizienter Antriebe und emissionsarmer Energieträger auf. Dazu bedarf es einer Trendumkehr und veränderter Investitionen, für die bereits heute, auch kommunikativ, ein Bewusstsein geschaffen werden muss.

Dass die Verkehrsleistung im Straßen- und im Luftverkehr über die letzten Jahre kontinuierlich gestiegen ist, immer größere und leistungsstärkere Fahrzeuge in den Markt gekommen sind, der Fahrzeugbestand weiter wächst, die stark von der Verbrauchernachfrage geprägten KEP-Dienstleistungen überproportional im Gesamtmarkt gestiegen sind sowie der nationale und der internationale Straßengüterverkehr stetig wachsen, sind Indizien dafür, dass Individualmobilität und Straßengüterverkehre in Deutschland sehr günstig sind. Dies zeigt sich auch daran, dass der ÖV insbesondere in der Coronazeit bis jetzt Fahrgäste gegenüber dem MIV verloren hat. Politische Debatten über Preissteigerungen fossiler Kraftstoffe, die dem Niveau von tagesaktuellen Preisschwankungen an Tankstellen entsprechen, tragen nicht zu einem faktenbasierten und wirksamen Klimaschutz im Verkehr bei. So zeigt eine Umfrage der dena unter 1.002 Verbraucherinnen und Verbrauchern aus dem Jahr 2021, dass zwei Drittel der Befragten erst ab einem Kraftstoffpreis von zwei Euro oder mehr auf Fahrzeuge mit alternativen Antrieben umsteigen oder das eigene Fahrzeug seltener nutzen wollen. Das entspricht einem zusätzlichen CO₂-Preis von gut 200 Euro je Tonne.

Ohne **mehr Ehrlichkeit in der Debatte** und einer stärker faktenbasierten Diskussion werden die Emissionen in den kommenden Jahren nicht zurückgehen und die politisch gesetzten Ziele verfehlt werden. Die hohe Zahlungsbereitschaft und die geringeren Transaktionskosten für individuelle Mobilität führen erst ab relativ hohen CO₂-Preisen zu einem Wechsel zu effizienten Fahrzeugen oder Verkehrsmitteln bzw. verändertem Verkehrsverhalten. Daher verfehlt eine reine Förderstrategie und Kommunikation der Bundesregierung ihr Ziel. Stattdessen bedarf es einer Strategie des Forderns, die durch die Förderung der effizientesten und emissionsärmsten Verkehrsmittel flankiert werden muss.

Kostentransparenz und Ehrlichkeit als Bestandteil der Kommunikation sind auch der Schlüssel dafür, die Verantwortung für die THG-Emissionen nicht allein auf Politik und Industrie, sondern auch auf die Verbraucherinnen und Verbraucher zu übertragen. Politik und Industrie sind für die Rahmenbedingungen und das Angebot verantwortlich. Die Nachfrage nach Technologien, Energieträgern und Verkehrsmitteln liegt in der Verantwortung der Verbraucherinnen und Verbraucher. Eine allein und fortwährend auf Förderung basierende Marktentwicklung von Pkws und Lkws mit alternativen Antrieben ist auch aus Sicht von Finanzdienstleistern wie der Deutschen Bank weder finanziell noch sozial umsetzbar und bietet auch keinen planbaren Wettbewerbsrahmen für die Unternehmen des Marktes und die Verbraucherinnen und Verbraucher⁶.

Eine **frühzeitige Kommunikation**, unter welchen Voraussetzungen und mit welchen Maßnahmen die notwendige Emissionsminderung im Verkehr erreicht werden kann und was dies für die Verbraucherinnen und Verbraucher bedeuten wird, ist daher nicht nur für das Erreichen von politisch gesetzten Zielen, wie beispielsweise im Bereich Elektromobilität, wichtig. Sie ist **Grundlage für die Investitionsentscheidungen** der Verbraucherinnen und Verbraucher und verhindert, dass heute Investitionen in Fahrzeuge erfolgen, die in fünf bis zehn Jahren deutlich stärkere Wertverluste aufweisen bzw. wertlos sein könnten.

Weder der Politik noch den Fahrzeugherstellern oder der Energiewirtschaft hilft eine Kommunikation, die den Eindruck hinterlässt, der Verkehrs- und Energiemarkt würde sich nicht verändern (siehe auch Kapitel 4 „Transformation“). Denn einerseits wird es zu zusätzlichen Belastungen kommen. Andererseits besteht die Möglichkeit, durch bessere öffentliche und stärker geteilte Verkehre ein anderes Angebot zu schaffen. In der Verantwortung der Verbraucherinnen und Verbraucher wird es auch liegen, durch ein angepasstes Verkehrsverhalten, aber gegebenenfalls auch durch die angepasste Fahrzeugwahl steigende Kosten zu kompensieren.

⁶ Deutsche Bank AG, 2020.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode



AUFGABE 50

Rahmenbedingungen für die sich selbst tragende Marktentwicklung von alternativen Antrieben schaffen

Die Bundesregierung hat sich ambitionierte Ziele für den Markthochlauf von elektrifizierten Antrieben gesteckt. Nachdem in den vergangenen zwei Jahren die Marktentwicklung durch hohe Fördersummen gestützt wurde, muss die kommende Bundesregierung den wirtschaftlichen Rahmen für gewerbliche und private Verbraucherinnen und Verbraucher bereiten, sodass eine sich selbst tragende Entwicklung erfolgen kann. Dies muss auch dazu führen, dass sich die Infrastruktur perspektivisch selbst trägt. Wenn Fördergelder in den Aufbau von Betankungs- oder Ladeinfrastruktur fließen, sollten diese für die Entwicklung öffentlich zugänglicher Infrastrukturen eingesetzt werden, um Kostennachteile von Verbraucherinnen und Verbrauchern ohne Zugang zu privater Ladeinfrastruktur zu reduzieren.

Im Güterverkehr könnten durch freiwillige Instrumente (z. B. ein grünes Label) über die Quoten hinausgehende Mengen an erneuerbarem Strom bzw. erneuerbaren gasförmigen oder flüssigen Kraftstoffen in den Markt gelangen, wenn sie anderweitig angerechnet werden können (zum Beispiel bei Maut- oder Flottenzielwerten). Von der Nachfrageentwicklung und Skalenerträgen könnten zukünftig wiederum auch andere Sektoren im internationalen Wettbewerbsumfeld mit geringeren Zahlungspotenzialen profitieren.



AUFGABE 52

Öffentlichen Verkehr als Rückgrat der bezahlbaren Mobilität stärken und besser verzahnen

Da gerade Haushalte mit geringen Einkommen auf öffentliche Verkehre angewiesen sind, müssen deren Bedeutung und Qualität gestärkt werden. Öffentliche Fördergelder sollten daher in einen Ausbau des Angebots und in eine bessere Verknüpfung mit geteilten Verkehrsangeboten investiert werden.



AUFGABE 51

Zahlungsbereitschaft im Verkehr für Kostendegression von erneuerbaren Kraftstoffen nutzen

Verbraucherinnen und Verbraucher zeigen typischerweise eine eher niedrige Preissensitivität bezüglich ihrer Individualmobilität (auch deutlich höhere Kraftstoffpreise führen nur zu einem geringen Rückgang des Spritabsatzes). Über das Instrument der THG-Minderungsquote besteht daher die Chance, den Anteil erneuerbarer Energieträger ohne öffentliche Fördermaßnahmen zu steigern und somit die Emissionen im Verkehr zu reduzieren.



AUFGABE 53

Kommunen mehr Freiraum durch Anpassung des Straßenverkehrsrechts geben

Ein nachhaltigerer, gleichfalls bedarfsgerechter Verkehr sollte die regional spezifischen Herausforderungen adressieren. Eine umfangreiche Anpassung des Straßenverkehrsrechts sollte daher so schnell wie möglich angegangen werden, um Kommunen mehr Spielraum bei der Planung und bei Eingriffen im Straßenraum zu geben. Flankiert werden sollten diese wichtigen regulatorische Anpassungen durch innovative Pilotprojekte, z.B. City Maut Projekte unter Einbezug innovativer verkehrsplanerischer Ansätze und Mobilitätsangebote.



AUFGABE 54

Planungen und Umsetzungen von Infrastrukturmaßnahmen und Genehmigungen beschleunigen und verfügbare Alternativen mitdenken

Die Stärkung des Umweltverbunds im Verkehr scheitert derzeit auch an langen Planungsverfahren für Bahntrassen oder Radwege. Hinzu kommen langwierige Baumaßnahmen. Die Bundesregierung muss daher dringend Wege suchen, um das Planungsrecht weiter zu vereinfachen und Verfahren zu beschleunigen. Gleichfalls müssen Genehmigungskompetenzen mit entsprechenden personellen Ressourcen auf Landes- und Kommunalebene erhöht werden, um die Anträge schnell zu bearbeiten. Da davon auszugehen ist, dass gerade im Schienenverkehr die gewünschten Potenziale durch infrastrukturelle und planerische Defizite nicht schnell genug aufgebaut werden können, sollte insbesondere in den 2020er Jahren Regional- und Fernbussen als Teil des Verkehrssystems eine größere Aufmerksamkeit zukommen.



AUFGABE 55

Anpassung von Steuern und Abgaben mit Fokus auf Zielerreichung

Der bisherige energiesteuerliche und Kfz-steuerliche Rahmen sendet noch nicht genügend Impulse für Investitionen in effiziente Fahrzeuge oder erneuerbare Kraftstoffe. Gleichfalls werden bei stärkerer Marktdurchdringung von elektrifizierten Fahrzeugen die steuerlichen Einnahmen deutlich sinken. Daher muss die kommende Bundesregierung eine grundlegende Anpassung der energie- und verkehrsseitigen Steuern sowie Abgaben vornehmen, die auf Treibhausgasmindern ausgerichtet sind, jedoch mittelfristig Einnahmen aus dem Verkehr sichern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass über die derzeitige Energiebesteuerung von Kraftstoffen erhebliche Finanzmittel für den Auf- und Ausbau bzw. Erhalt der Verkehrsinfrastrukturen erzielt werden. Dies ist auch bei einer Reform staatlicher Steuern und Abgaben zu berücksichtigen.



AUFGABE 56

Europäische und nationale Instrumente verzahnen

Mit dem „Fit for 55“-Paket hat die EU-Kommission einen umfangreichen Vorschlag für verschiedenste Bereiche des Verkehrs und des Energiemarktes gemacht. Gerade für den international geprägten Luftverkehr sollten die Anforderungen der ReFuelAviation mit dem nationalen Zielniveau von SAF in Übereinstimmung gebracht werden. Darüber hinaus müssten Instrumente zur CO₂-abhängigen Bepreisung wie BEHG, Energiesteuer und sektoraler ETS darauf geprüft werden, ob und inwiefern sie nebeneinander existieren können.



AUFGABE 57

Kostenwahrheit als Grundlage eines verursachergerechten und sozial ausgewogenen Klimaschutzes implementieren

In den Mittelpunkt der Klimaschutzbemühungen müssen in den kommenden Jahren adäquate Folgekosten der Emissionen aus fossilen Quellen treten. Staatliche Instrumente, die THG-Emissionen begünstigen, müssen dementsprechend abgebaut werden. Dies stärkt Effizienztechnologien, erneuerbare Kraftstoffe und den Umweltverbund. Sozial besonders belastete Haushalte sollten nicht pauschal für höhere Kosten kompensiert werden, sondern über zielgerichtete Zuschüsse in den Lebensbereichen, die am stärksten ihre Grundbedürfnisse und ihre soziale Teilhabe betreffen.



AUFGABE 58

Veränderte berufliche Anforderungsprofile durch Ausbildung und Umschulungen unterstützen

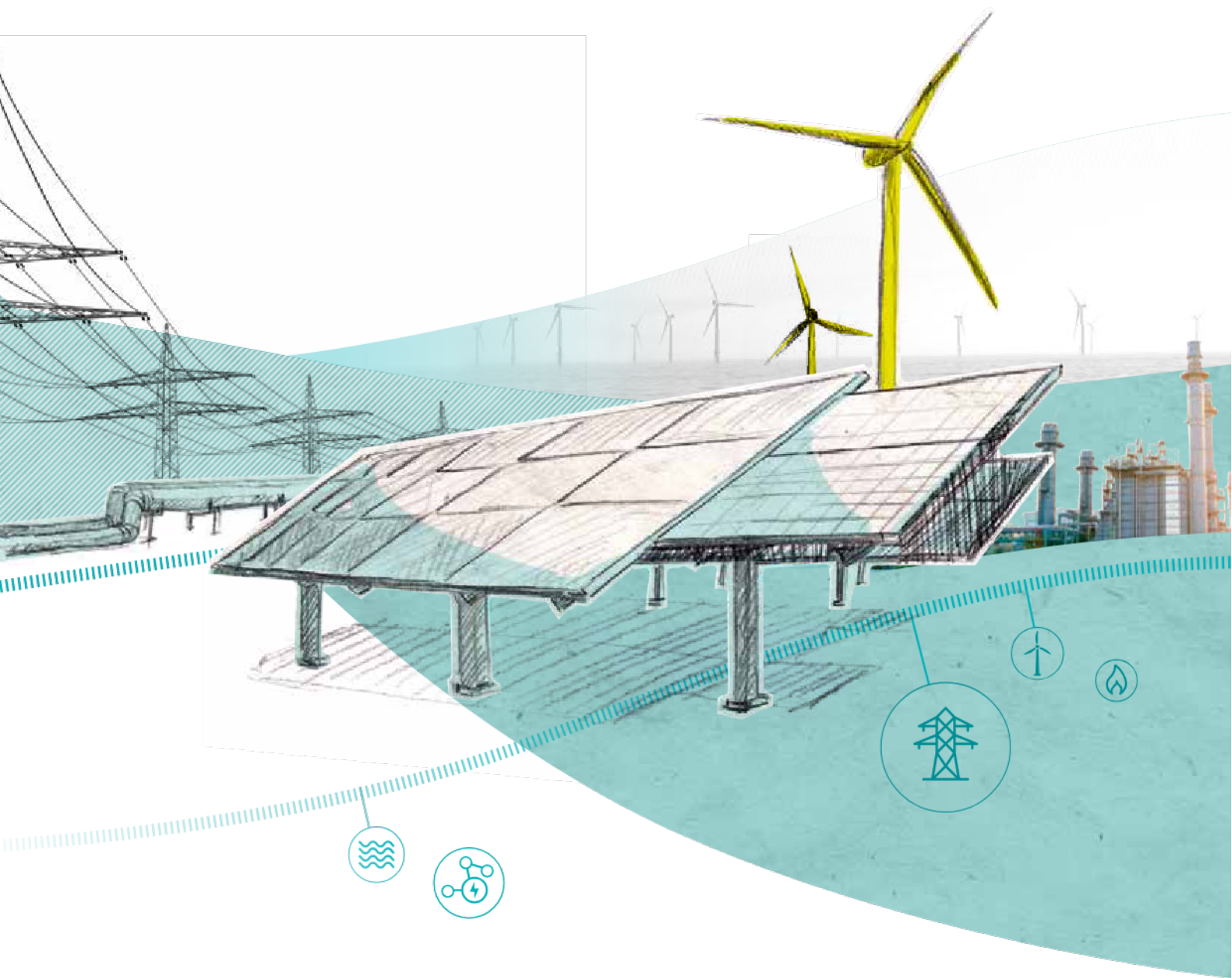
Die stärkere Durchdringung des Marktes mit elektrifizierten Fahrzeugen, aber auch die weitere Digitalisierung wird zu Stellenabbau und veränderten Stellenanforderungen führen. Gleichzeitig wird es im Bereich Softwareengineering und für den Aufbau und die Wartung der Ladeinfrastruktur sowie im Bereich von Planungsprozessen einen erhöhten Bedarf an qualifizierten Fachkräften geben. Die dem Bedarf entsprechende Ausbildung und Umschulung muss hohe Priorität besitzen und beispielsweise durch Fördermaßnahmen wie den Zukunftsfonds Automobilindustrie hinterlegt werden.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- ▶ **Die Rolle der Kommunen stärken**
(Kapitel 4 „Transformation“)
- ▶ **Ehrlich machen, Kommunikation verbessern und Informationsangebote gestalten**
(Kapitel 4 „Transformation“)
- ▶ **Abgaben auf Energie auf CO₂-Bepreisung und Infrastrukturabgaben fokussieren**
(Kapitel 2 „Marktdesign“)

9 Energie

Wie kann eine klimaneutrale und sichere Energieversorgung gestaltet werden?



Im Zeitraum seit der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende 2018 haben sich im fachlichen und politischen Diskurs die nötigen Erfordernisse für einen klimaneutralen Energiesektor konkretisiert und umfassen deutlich gleichwertiger als in der Vergangenheit alle Energieträger. Für den Energiesektor zeigt die vorliegende dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität auf, dass die Bausteine und Entwicklungspfade für einen klimaneutralen Stromsektor aus der Vergangenheit grundsätzlich richtig angelegt sind. Durch die Beschleunigung im Zuge der klimapolitischen Zielverschärfung und die Erfordernisse einer sektorübergreifenden, integrierten Energiewende ergeben sich jedoch neue Herausforderungen, die mit frischem Blick angegangen werden müssen. Das gilt insbesondere für den Ausbau der erneuerbaren Energien sowie die dafür erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen und veränderten administrativen Prozesse. Parallel gilt es, vollständig neue Energiemärkte für Powerfuels, also klimaneutralen Wasserstoff und dessen Derivate aufzubauen – und das von der Erzeugungsseite über die nötigen nationalen und internationalen Infrastrukturen und Handelsbeziehungen bis hin zu den erforderlichen Umstellungen auf der Nachfrageseite.

Erneuerbare Energien im Stromsektor sind auf dem Vormarsch, fossile Energieträger dominieren noch immer im Wärme- und Verkehrssektor

Die Energieversorgung basierte 2018 auf den Primärenergieträgern Mineralöl (34 Prozent), Erdgas (23 Prozent), Braun- und Steinkohle (22 Prozent), erneuerbare Energien (14 Prozent) und Kernenergie (6 Prozent)¹. Dabei wird der Primärenergieverbrauch derzeit zu rund 74 Prozent durch Energieimporte gedeckt, 26 Prozent werden durch heimische Energieträger bereitgestellt.² Für die Versorgung der Sektoren Industrie, Gebäude, Mobilität, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft kommen im Wesentlichen Strom, gasförmige Energieträger wie Methan und flüssige Erdölprodukte zum Einsatz.

Mit einem Anteil erneuerbarer Erzeugung von heute 46 Prozent des Bruttostromverbrauchs³ hat die Stromversorgung bereits

signifikante EE-Anteile erreicht. Trotzdem wird der noch nötige weitere Umbau von den derzeit noch 54 Prozent konventioneller Stromerzeugung auf Basis fossiler Energien und der Kernenergie in den nächsten Jahren große Herausforderungen mit sich bringen: Die Stromerzeugung aus Kernenergie läuft Ende 2022 aus⁴, die Kohleverstromung ist ebenfalls rückgängig und wird dem aktuellen Gesetz nach spätestens 2038 beendet sein⁵. Die Erzeugung aus Erdgas dagegen erfuhr in den letzten Jahren aufgrund der Energieträger-Umstellung (Fuel Switch) von Kohle zu Erdgas eine Steigerung.

Deutschland ist eng eingebunden in den europäischen Strombinnenmarkt und das europäische Verbundnetz. Dies sorgt für wichtige Ausgleichseffekte bei Nachfrage und Erzeugung und eine gegenseitige Stützung der Versorgungssicherheit. Im Jahresverlauf war Deutschland in den vergangenen Jahren bilanziell Netto-Stromexporteur⁶.

Zur Deckung der Stromnachfrage in Engpasssituationen existieren auf dem Strommarkt begrenzte Reservemechanismen, die bisher insbesondere ausgediente fossile Kraftwerke nutzen. Auch steuerbare Lasten kommen für bestimmte Systemdienstleistungen zum Einsatz. Insgesamt ist die Stromnachfrage in Deutschland aber noch eher unflexibel und reagiert wenig auf Knappheiten im Markt; auch die Nutzung von Nachfrageflexibilität zur Netzentlastung ist noch kaum etabliert.

Im Gegensatz zur Stromerzeugung beruht die Bereitstellung von gasförmigen, flüssigen und festen Energieträgern heute noch fast ausschließlich auf fossilen Rohstoffen. Erdölprodukte wie Mineralöle, Benzin, Diesel und Kerosin werden insbesondere im Verkehrssektor und zu geringeren Anteilen auch in den Sektoren Gebäude und Industrie nachgefragt; erneuerbare biogene und synthetische Alternativen haben dabei bisher einen Anteil von ca. 6 Prozent. Erdgas spielt eine bedeutende Rolle zur Wärmebereitstellung im Gebäudesektor (42 Prozent) sowie in der Industrie (38 Prozent für energetische, prozessuale und stoffliche Nutzung).⁷ Darüber hinaus wird es für die Stromerzeugung (13 Prozent) und die Fernwärmebereitstellung (7 Prozent) verwendet. Kohle wird derzeit vor allem in der Stromerzeugung und Fernwärmebereitstellung sowie in der (Stahl-)Industrie eingesetzt.⁸

¹ AG Energiebilanzen e. V., 2020.

² Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2021d.

³ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2021c: 5.

⁴ Atomgesetz (ATG), 1985.

⁵ Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVBG), 2020.

⁶ AG Energiebilanzen e. V., 2020: 8.

⁷ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), 2020

⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2021a.

Für Strom und Methan (Erdgas und geringe Anteile Biomethan) existieren heute leitungsgebundene Infrastrukturen, die als natürliches Monopol reguliert sind. Die bisherigen Netzentwicklungspläne wurden vor der Novellierung des Klimaschutzgesetzes erstellt und legen daher aus heutiger Sicht veraltete Klimaschutzziele zugrunde. Für Wasserstoff existieren heute einzelne lokale Leitungsnetze in Industrieclustern, aber noch keine überregionalen Infrastrukturen. Infrastrukturen für feste und flüssige Energieträger werden nicht reguliert betrieben und bestehen neben einzelnen Pipelines insbesondere aus Transporten via Lkw, Schiff und Bahn. Auf kommunaler und zum Teil regionaler Ebene gibt es darüber hinaus Wärmenetze in Form von in sich geschlossenen lokalen Versorgungssystemen, die im Allgemeinen von vertikal integrierten Fernwärmeversorgern betrieben werden.

Die zukünftige Energieversorgung nutzt erneuerbaren Strom, Bioenergie sowie klimaneutralen Wasserstoff und weitere Powerfuels

Das Zielbild 2045 ist ein Energiesektor, der netto keine Treibhausgase ausstößt und nach 2045 durch CO₂-Abscheidung aus Bioenergie sogar THG-negativ wird. Verbleibende Restemissionen des Gesamtsystems werden langfristig durch technische Senken u. a. im Energiesektor⁹ überkompensiert. Eine langfristige Kompensation der CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger im Energiesektor durch CCS wird im Rahmen der Studie ausgeschlossen, sodass alle fossilen Energieträger komplett durch klimaneutrale Energieträger ersetzt werden. Erreicht werden kann das Ziel durch einen generellen Rückgang der Endenergienachfrage durch Effizienzsteigerungen und zunehmende Elektrifizierung¹⁰ sowie durch den Einsatz von

Insbesondere bis 2030 kann eine wesentliche Minderung der Treibhausgasemissionen im Stromsektor durch die Reduktion der Kohleverstromung erreicht werden.

Bioenergie und neue Energieträger wie klimaneutral erzeugten Wasserstoff und weitere Powerfuels auf der Basis erneuerbaren Stroms.

Kurzfristig werden wesentliche Minderungen der Treibhausgasemissionen im Energiesektor durch den beschleunigten

Rückgang der Kohleverstromung erreicht. Diese Minderung wird durch den Rückgang der Kraftwerkskapazitäten sowie einen deutlichen Rückgang der Volllaststunden der verbleibenden (Reserve-)Kapazitäten erreicht. Entscheidend wird es in dem

Zuge sein, dass auch die neben der reinen Energiebereitstellung übernommenen Aufgaben der Kraftwerke (gesichert regelbare Erzeugungsleistung, Systemdienstleistungen etc.) durch alternative klimaneutrale Technologien abgedeckt werden. Insgesamt gilt es bei der Transformation, die fossilen und nuklearen Energieträger vollständig durch erneuerbare Alternativen zu ersetzen. Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie und der Kohleverstromung¹¹ sind bereits erste konkrete Entscheidungen getroffen. Darüber hinaus müssen langfristig auch Erdgas und Mineralöl durch entsprechende klimaneutrale Alternativen ersetzt werden.

Die Bedeutung von Strom als Endenergieträger wird stark zunehmen

Im Jahr 2045 liegt der Bruttostrombedarf durch die zunehmende Nutzung von Strom in den Verbrauchssektoren mit 910 TWh fast 60 Prozent über dem heutigen Wert. Der Strom wird dabei überwiegend direkt aus erneuerbaren Energien wie Wind (Onshore und Offshore) und Photovoltaik erzeugt. Hinzu kommt zu einem geringeren Anteil (8 Prozent) die Verstromung von Wasserstoff in Gaskraftwerken, über die – gemeinsam mit Pumpspeicherkraftwerken, Batteriespeichern, Laststeuerung und Importen aus Europa – Stunden mit geringer Einspeisung erneuerbarer Energien abgedeckt werden, um eine sichere Stromversorgung zu gewährleisten.

Dabei werden gerade im Zeitraum bis 2030 die direktelektrische Nutzung von erneuerbarem Strom und die Steigerung der Energieeffizienz die beiden zentralen Hebel für die Reduktion der THG-Emissionen sein. Gleichzeitig müssen parallel die Infrastrukturen und Märkte für synthetische Energieträger als weiterer Baustein für einen klimaneutralen Energiesektor aufgebaut werden.

Eine weitgehende Sektorenkopplung in Verbindung mit der Erschließung von Flexibilitäten auf der Verbraucherseite wird in den nächsten Jahrzehnten wichtige Beiträge für einen effizienten Strommarkt sowie eine sichere Systemführung leisten. Um die großen Mengen erneuerbarer Energien effizient integrieren und neue elektrische Lasten bedienen zu können, bedarf es durch die politische Zielverschärfung bereits bis 2030 eines beschleunigten und weitreichenderen als bisher geplanten und absehbaren Ausbaus der Übertragungs- und Verteilnetze.

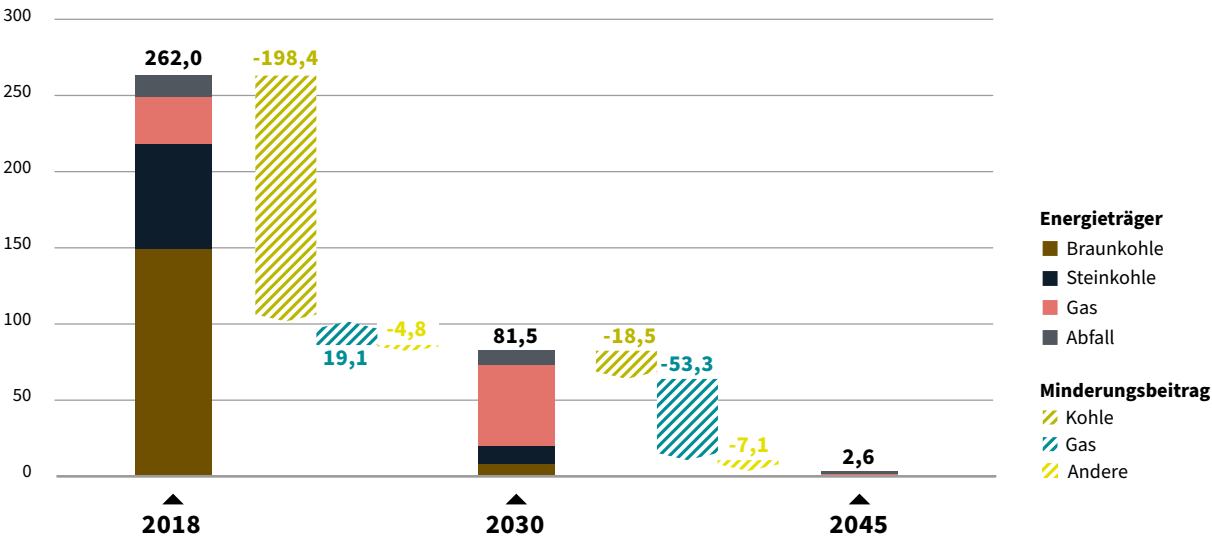
⁹ Beispielsweise durch den Einsatz von „Bioenergy with Carbon Capture and Storage“ (BECCS) (siehe auch Kapitel 10).

¹⁰ Direktelektrische Anwendungen haben in der Regel einen höheren Wirkungsgrad als Alternativen auf fossiler Basis.

¹¹ Der Ausstieg aus der Kernenergie wird bis zum Jahr 2023 erfolgen, der Ausstieg aus der Kohleverstromung bis spätestens 2038.

Abb. 9.1 THG-Minderungspfad im Energiesektor (Strom- & zentrale Wärmeerzeugung)

Angaben in Mt CO₂ä



Energieträger (Mt CO ₂ ä)	2018	2030	2045
Braunkohle	147,7*	7	0
Steinkohle	69,2*	11,5	0
Gas	30,9*	53,6	0,3
Abfall	14,2*,**	9,4	2,3
Summe	262,0	81,5	2,6

Energiebereich (Mt CO ₂ ä)	2018	Minderungsbeitrag	2030	Minderungsbeitrag	2045
Kohle	216,9	-198,4	18,5	-18,5	0,0
Gas	30,9	19,1	53,6	-53,3	0,3
Andere	14,2	-4,8	9,4	-7,1	2,3
Summe	262,0		81,5		2,6

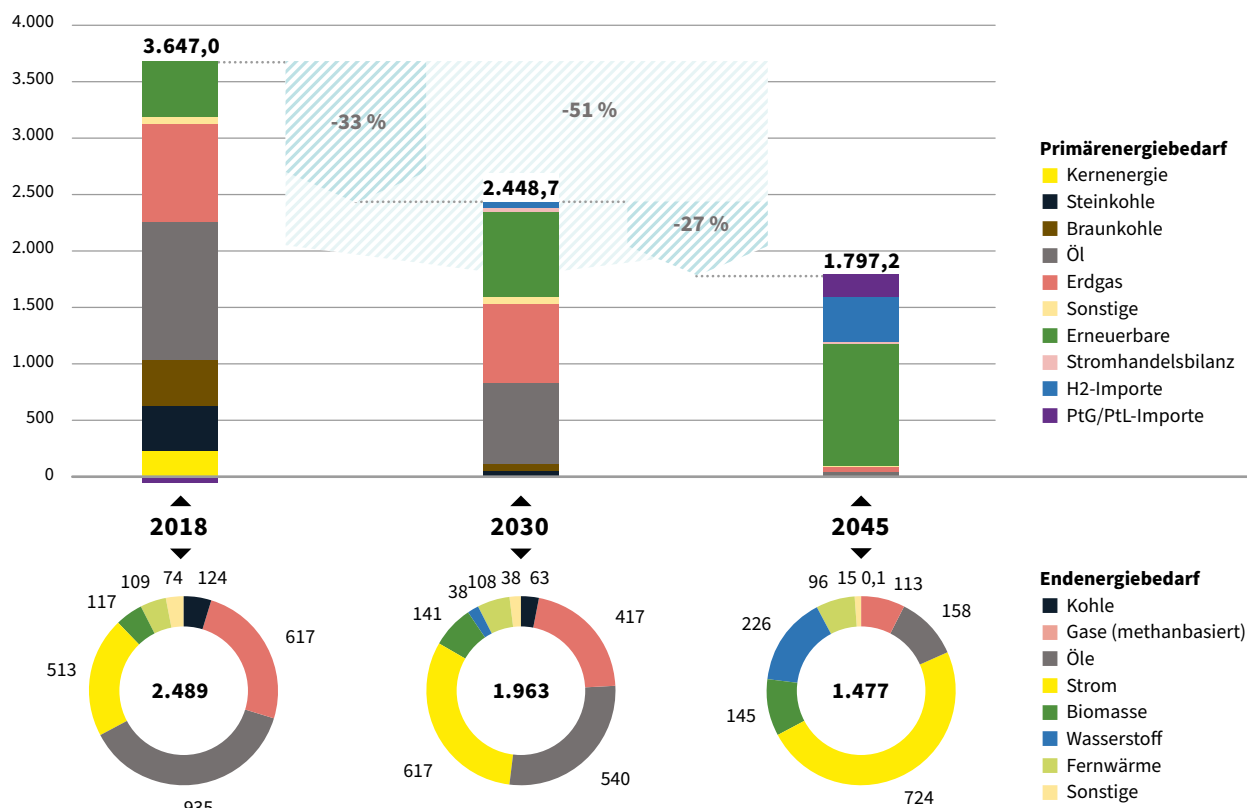
* Eigene Berechnungen basierend auf AG Energiebilanzen (AGEB), 2020; Umweltbundesamt (UBA), 2020c; EWI-Gutachterbericht, 2021.

** Die historischen Emissionswerte für Abfall für das Jahr 2018 inkludieren neben der Abfallverbrennung für die Strom- und zentrale Wärmeerzeugung auch einen kleinen Teil Verbrennung in Industrieanlagen.

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021; AG Energiebilanzen, 2020; Umweltbundesamt (UBA), 2020c, eigene Berechnung.

Abb. 9.2 Einsatz Primärenergieträger und Verwendung Endenergieträger (gesamt)

Angaben in TWh



Primärenergiebedarf (TWh)	2018	2030	2045
Kernenergie	230,3	0,0	0,0
Steinkohle	396,7	46,9	0,1
Braunkohle	411,3	70,2	0,1
Öl	1.225,8	712,5	35,9
Erdgas	871,4	710,8	45,6
Sonstige	59,6	58,0	14,4
Erneuerbare	500,6	749,9	1.078,7
Stromhandelsbilanz	-48,7	40,5	25,9
H2-Importe	0,0	56,3	398,3
PtG/PtL-Importe	0,0	3,7	198,3
Summe	3.647,0	2.448,7	1.797,2

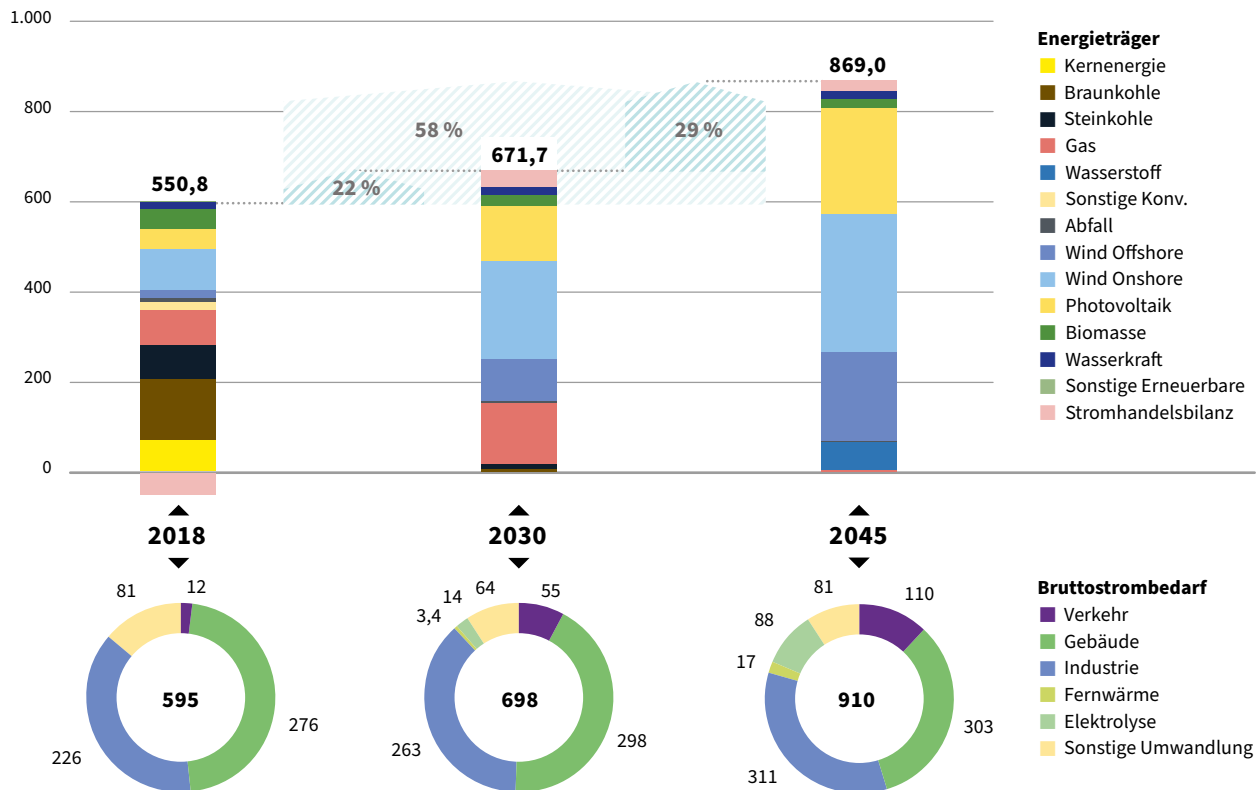
Endenergiebedarf (TWh)	2018	2030	2045
Kohle	124,0	62,9	0,1
Gase (methanbasiert)	617,4	416,8	112,9
Öle	934,8	540,2	158,4
Strom*	513,0	616,6	724,0
Biomasse	116,8	141,2	144,7
Wasserstoff	0,0	38,4	225,9
Fernwärme	109,0	108,4	95,8
Sonstige	74,0	38,0	15,1
Summe	2.489,0	1.962,6	1.477,0

* ohne Elektrolyse und PtH für Fernwärme

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Abb. 9.3 Stromerzeugung (netto)

Angaben in TWh



Energieträger (TWh)	2018	2030	2045
Kernenergie	71,9	0,0	0,0
Braunkohle	135,0	4,9	0,0
Steinkohle	75,2	11,4	0,0
Gas	78,5	137,4	2,9
Wasserstoff	0,0	0,0	65,3
Sonstige Konv.	15,5	0,0	0,0
Abfall	9,8	4,5	1,1
Wind Offshore	19,2	93,1	198,6
Wind Onshore	88,7	216,3	303,3
Photovoltaik	45,8	122,9	235,2
Biomasse	42,2	24,0	20,7
Wasserkraft	17,6	16,5	16,0
Sonst. Erneuerbare	0,1	0,3	0,0
Stromhandelsbilanz	-48,7	40,5	25,9
Summe*	550,8	671,7	869,0
Bruttostrombedarf (TWh)	2018	2030	2045
Verkehr	12,0	55,3	110,3
Gebäude	275,5	298,2	303,0
Industrie	226,1	263,1	310,7
Fernwärme	0,0	3,4	17,1
Elektrolyse	0,0	14,3	87,7
Sonstige Umwandlung**	81,0	63,9	81,1
Summe	594,6	698,2	909,9

* Differenz der Nettostromerzeugung zum Bruttostrombedarf ergibt sich aus dem Eigenenergieverbrauch innerhalb des Energiesektors und der Speichererzeugung.

** Netzverluste, Speicherbeladung, Kraftwerkeigenverbrauch

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Wasserstoff wird eine neue Rolle bei der Energieversorgung übernehmen

Wasserstoff wird 2045 eine wichtige Rolle bei der Energiebereitstellung spielen. Die Bereitstellung von Wasserstoff durch eine Erzeugung in Deutschland wird dabei begrenzt sein und im Wesentlichen durch Importe aus Europa und dem Rest der Welt erfolgen. Transportiert wird der Wasserstoff überwiegend mittels Pipeline in einem transeuropäischen Versorgungsnetz. Dieses Netz kann zu großen Teilen durch die Umstellung von Erdgas-Pipelines aufgebaut werden, die aufgrund der stark reduzierten Erdgasbedarfe für eine Umstellung auf Wasserstoff zur Verfügung stehen. Auch internationale Importe von Wasserstoff aus dem außereuropäischen Ausland werden überwiegend mittels Pipeline-Anbindung von Regionen mit guten Bedingungen für die Erzeugung von Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energien realisiert. Noch weiter entfernte Regionen werden durch Importhubs an europäische Häfen angebunden. Genutzt wird Wasserstoff in allen Endverbrauchssektoren, zur Rückverstromung im Energiesektor und für eine prozessuale bzw. stoffliche Nutzung in der Industrie. Die lokale Verteilung kann zunächst über eine Beimischung zum Erdgasnetz und langfristig durch die Umstellung eines Teiles der Gasverteilnetze zu reinen Wasserstoffnetzen erfolgen.

Die Bedeutung von Methan als Energieträger wird langfristig deutlich zurückgehen. Die verbleibenden Bedarfe werden ausschließlich aus synthetischem und biogenem Methan bedient, sodass fossiles Erdgas vollständig ersetzt wird. Ob und in welchem Umfang es langfristig neben einer Wasserstoff-Netzinfrastruktur einer parallelen Infrastruktur für klimaneutrales Methan bedarf, ist noch offen.

Powerfuels und biogene Energieträger gelten als weitere Bausteine

Ergänzt werden Strom und Wasserstoff durch weitere gasförmige und flüssige Powerfuels (z. B. synthetisches Kerosin oder synthetisches Mineralöl) und biogene Energieträger. Die auf der Basis von grünem Wasserstoff hergestellten Powerfuels werden dabei überwiegend aus entfernten Weltregionen mit guten Standortbedingungen und ausreichenden Flächen für erneuerbare Energien importiert. Hierfür sind die notwendigen Vertriebs- und Transportstrukturen aufzubauen, wo möglich durch Umstellung bestehender Transportstrukturen für Mineralöle. Eingesetzt werden die Powerfuels als Energieträger sowie als Grundstoffe vorwiegend im Verkehrs- und Industriesektor.

Deutschland bleibt auch langfristig auf Energieimporte angewiesen

Auch wenn der Stromsektor wesentlich durch den Aufbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten im Land geprägt ist, wird Deutschland insgesamt auch langfristig von Energieimporten abhängig bleiben. Während der Stromaustauschsaldo im Zielbild recht ausgeglichen ist¹², wird Deutschland zu bestimmten Zeiten deutlich auf Stromimporte aus Europa angewiesen sein. Wasserstoff wird entsprechend der Modellierung generell zu einem großen Anteil aus europäischen Ländern und an Europa angrenzenden Regionen importiert (56 Prozent der Wasserstoffimporte werden aus der EU, Großbritannien, Norwegen oder der Schweiz stammen, weitere 20 Prozent aus Osteuropa). Powerfuels werden dagegen kaum in Deutschland und Europa produziert, sondern im Wesentlichen über den internationalen Handel aus verschiedenen Regionen der Erde importiert.

Für die weitere Energiewende wird es nun entscheidend sein, dass parallel zur weiteren Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im Stromsektor auch die fossilen gasförmigen und flüssigen Energieträger schrittweise durch klimaneutrale Alternativen ersetzt werden. Hierfür ist eine unmittelbar wirksame Beschleunigung der Entwicklung der erforderlichen Energieinfrastrukturen notwendig und Strategien für eine dauerhafte Gewährleistung der Versorgungssicherheit.

¹² Trotz eines am Ende des Jahres fast ausgeglichenen Saldos wird der grenzüberschreitende Stromaustausch deutlich zunehmen.

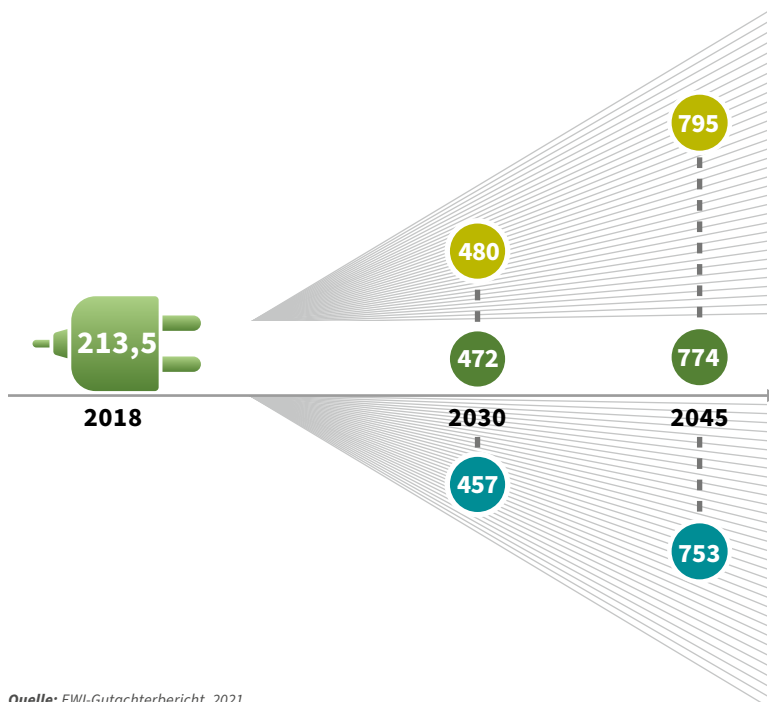
9.1 Eine hohe Ausbaugeschwindigkeit der EE-Stromerzeugung sicherstellen

Für die Erreichung der Klimaziele bis 2030 ist eine unmittelbar wirksame Beschleunigung des Ausbaus der erneuerbaren Energien für den Stromsektor notwendig. In der Simulation werden bis 2030 die installierten Kapazitäten für Windenergie an Land und PV-Aufdach gegenüber 2019 verdoppelt, die Kapazitäten für PV-Freiflächen und Windenergie auf See sogar vervierfacht. Dies entspricht einem jährlichen Nettozubau von etwa 3,5 GW Windenergie an Land, je 4 GW PV-Aufdach und PV-Freifläche sowie knapp 1,5 GW Wind auf See. Die aktuellen Ausbauziele

des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) spiegeln diesen Ausbaubedarf bei Weitem nicht wider. Lediglich für Wind auf See sind die politischen Ziele aus dem Windenergie-auf-See-Gesetz nahezu im Einklang mit den hier ermittelten Zahlen. Auch die zuletzt vorgenommenen Korrekturen der Stromverbrauchsprognosen der Bundesregierung auf ca. 655 TWh in 2030¹³ werden durch die Modellierungsergebnisse mit einem Brutto-Stromverbrauch von 698 TWh übertroffen.

Abb. 9.4 Indikator „Stromerzeugung (Erneuerbare Energien)“

Angaben in TWh



Hoch

Die höhere Stromerzeugung basiert auf höherer Nachfrage (in Summe +5 % (2030) und +7 % (2045) gegenüber dem Hauptszenario KN100). Konkret ist die Erzeugung auf Basis von Biomethan höher als im Hauptszenario, ebenso die auf Basis von Onshore Wind.

Der Indikator zeigt die Variation der Erzeugung auf Basis erneuerbarer Energien in den verschiedenen Pfadausprägungen. Angegeben sind jeweils der minimale und der maximale Wert. Die Unterschiede sind im Wesentlichen durch die Nachfrage getrieben.

Niedrig

In Folge einer geringeren Stromnachfrage kommt es zu geringerer EE-Stromerzeugung (+3 % bzw. 4 %), vor allem der Erzeugung auf Basis von Onshore Windkraft.

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

¹³ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2021b.

Ausreichend Flächen bereitstellen

Um das erforderliche Ausbautempo von erneuerbaren Energien erreichen zu können, genügt es nicht, einfach die Ausbaupfade gesetzlich zu erhöhen. Es ist insbesondere entscheidend, in

Neben der Erhöhung der gesetzlichen Ausbauziele für erneuerbare Energien werden klare Flächenziele für die Bundesländer benötigt. Die Prüfkriterien für die Genehmigungsverfahren sollten reduziert werden.

den Planungsverfahren ausreichend Flächen auszuweisen. Dazu gehört, dass die Beschränkung der Flächenkulte über das EEG und der Flächenverfügbarkeit auf Ebene der Bundesländer gelöst wird. Ein Ansatzpunkt ist, dass alle Bundesländer die Flächenkategorie der „benachteiligten Gebiete“ des EEG weitgehend für den PV-Zubau nutzen.

Zu diesen ertragsschwächeren landwirtschaftlichen Flächen – beispielsweise wegen ungünstiger klimatischer Bedingungen, schlechterer Bodenqualität oder steilerer Lagen – zählen in Deutschland immerhin rund 50 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche¹⁴.

Zudem sollten sie eine aktive Strategie zur Hebung von Flächenpotenzialen auf Konversionsflächen verfolgen. Die Nutzung von unter aktuellen Rahmenbedingungen wirtschaftlich attraktiv wirkenden Flächen wie vorbelasteter Konversionsflächen könnte beispielsweise über gesonderte Ausschreibungen erreicht werden. Zudem ermöglicht die Stärkung innovativer Anlagenkonzepte, zum Beispiel durch Anhebung der Ausschreibungsmengen der „Innovationsausschreibungen“ im EEG, die Aktivierung zusätzlicher Flächen für die Energieerzeugung (insbesondere durch die Agrophotovoltaik- und schwimmende PV Anlagen).

Im Hinblick auf die Windenergie an Land sollten die Abstandsregeln für Onshore-Wind vereinheitlicht und durch eine Reduzierung der gesetzlich vorgegebenen Abstände insgesamt mehr Zubau ermöglicht werden. Zudem sollten die Flächenpotenziale in Wäldern für die Windkraftnutzung aktiviert werden. Es sollte zudem ein Flächenziel von 2 Prozent in die Bundesgesetzgebung aufgenommen werden. Diese Maßnahme sollte perspektivisch im Sinne einer gemeinsamen Lastenteilung durch verbindliche Ziele pro Bundesland in Abhängigkeit von erschließbaren Flächen gesetzlich festgeschrieben werden.

Mit Blick auf die derzeit stark diskutierte und teilweise schon auf Landesebene umgesetzte Solarpflicht für Gebäude sollten unterschiedliche Ansätze evaluiert werden und die Einführung in weiteren Bundesländern sollte geprüft werden. So kann der Druck auf die Freifläche gesenkt und gleichzeitig der verbrauchsnahe Zubau in unterschiedlichen Marktsegmenten wie Haushalten

oder der Industrie angereizt werden. Insbesondere Eigentümer von öffentlichen Gebäuden sollten hier ihrer Vorreiterrolle gerecht werden.

Genehmigungsverfahren vereinheitlichen, vereinfachen und beschleunigen

Die Genehmigungsverfahren für EE-Anlagen müssen beschleunigt und vereinfacht werden. Die möglichen Ansätze gelten hierbei in ähnlicher Weise auch für die Genehmigungsverfahren für den Netzausbau. Es sollte geprüft werden, ob die Genehmigungsbehörden mittelfristig zur Prüfung der Anträge innerhalb einer bestimmten Frist gesetzlich verpflichtet werden können, nach deren Ablauf die Genehmigung als erteilt gilt. Zudem sollten lokale Genehmigungsbehörden mit mehr Personal und dem Einsatz digitaler Systeme in die Lage versetzt werden, Projektanträge schneller zu bearbeiten. Gleichzeitig kann so auch der Aufwand aufseiten der Projektierer gesenkt werden. Zudem sollten auch die Prüfkriterien insgesamt nach Möglichkeit reduziert werden – je weniger Prüfkriterien es für die Behörden gibt, desto schneller können die Anträge genehmigt werden.

Zugleich sind Maßnahmen erforderlich, um die Akzeptanz des Ausbaus erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen sowie der zu ihrer Anbindung und Integration erforderlichen Netze zu fördern. Dabei geht es auch darum, ökonomische Vorteile des EE-Zubaus vor Ort über neue Beteiligungsmöglichkeiten und neue Geschäftsmodelle, verbunden mit unmittelbaren wirtschaftlichen Vorteilen, zur Geltung kommen zu lassen.

Ein weiteres wichtiges Aufgabenfeld beim Ausbau der erneuerbaren Energien ist auch eine Überprüfung des Artenschutzes. So sollte zum Beispiel künftig stärker der Artenschutz und weniger der Schutz unmittelbar betroffener Lebewesen als Bemessungsgrundlage für die Genehmigung von konkreten Projekten herangezogen werden.

Marktbasierten Ausbau erneuerbarer Energien stärken und das EEG weiterentwickeln

Neben der Erhöhung der Ausschreibungsvolumina im EEG für bestimmte Technologien und Marktsegmente muss das bestehende Instrumentarium rund um die staatliche Förderung so ergänzt werden, dass die vorhandene Nachfrage nach grünem Strom zu einem zusätzlichen Treiber für den EE-Ausbau wird und so private Investitionen aktivieren kann. Insbesondere Green

¹⁴ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017.

PPAs können Abnehmern wie Unternehmen hier die Möglichkeit bieten, den Umbau zu einer weniger CO₂-intensiven Wertschöpfung zu gestalten und sich gleichzeitig gegen steigende Strompreise abzusichern. Dabei muss der Rechtsrahmen die unterschiedlichen Perspektiven von Unternehmen ausreichend stark reflektieren und sowohl Impulse für Unternehmen mit einem großen Stromverbrauch liefern als auch für Unternehmen die als „energieintensive Unternehmen“ eine Strompreiskompensation erhalten (siehe auch Kapitel 2 „Marktdesign“).

Unternehmen und Industrieverbrauchern sollten ebenso wie Privathaushalten unterschiedliche Technologien und Geschäftsmodelle als Optionen für die Ausgestaltung einer individuellen Strategie zur Erreichung von Treibhausgasneutralität zur Verfügung stehen. Dies stellt neue Anforderungen an die Ausgestaltung des Rechtsrahmens. Das derzeitige Marktdesign reflektiert noch nicht, dass erneuerbare Energien aus Sicht der Wirtschaft zu einem Standortvorteil werden könnten. So könnten Regionen mit hohen Zubaupotenzialen für erneuerbare Energien zukünftig erfolgreicher um Unternehmensansiedlungen werben. Auch könnte auf regionaler Ebene ein Wettbewerb der Kommunen um die Ansiedlung von Erneuerbare-Energien-Erzeugungsanlagen entstehen.

Zusätzlich sollte die Rolle von Prosumern, Energiegemeinschaften und der Bürgerenergie gestärkt werden zur Aktivierung privater Mittel und zur Verbesserung der Akzeptanz der Energiewende durch direkte Teilhabe (dieses Thema wird in Kapitel 4 „Transformation“ ausführlich behandelt).

Mit Blick auf die allgemeine Weiterentwicklung des Systems der Abgaben und Umlagen kann erreicht werden, dass auf erneuerbarem Strom basierende Technologien die Effizienzvorteile gegenüber Technologien basierend auf fossilen Energieträgern besser zur Geltung bringen können und strombasierte EE-Anwendungen und Geschäftsmodelle ihren Weg in den Markt finden.

Auch mit der Neuordnung der Netzentgeltstruktur könnte sichergestellt werden, dass Regionen, die besonders viel erneuerbare Energien erzeugen, bei der Ansiedlung von Unternehmen und der Wertschöpfung nicht benachteiligt werden.

➤ BRANCHENBLICK

Potenziale für EE-Stromerzeugung

Die hier vorgestellten Entwicklungen der installierten Leistung verschiedener Technologien zur Erzeugung von erneuerbarem Strom sind Ergebnis der durch das EWI durchgeführten integrierten Modellierung des Energiesystems zur Deckung der in den Verbrauchssektoren definierten Energiebedarfe unter Berücksichtigung der THG-Minderungsziele sowie der wirtschaftlichen Unterschiede verschiedener Technologien aus Gesamtsystem-sicht. Hierbei wird für alle EE-Stromerzeugungstechnologien im Rahmen der verfügbaren Flächenpotenziale ein erheblicher Anstieg der benötigten Kapazitäten prognostiziert.

Dabei werden im Unterschied zur heutigen Verteilung der installierten Photovoltaik-Erzeugungsleistung zwischen Freiflächen (rund 26 Prozent) und Dachflächenanlagen (rund 74 Prozent) aufgrund geringerer Investitionskosten im Modell zukünftig in Relation vermehrt PV-Freiflächenanlagen zugebaut. Im Rahmen der EWI-Modellierung wird hierbei zwischen 2019 und 2045 für Freiflächenanlagen etwa eine Verzehnfachung der installierten

Leistung erwartet (von 12 auf 123 GW), für Aufdachanlagen dagegen ‚nur‘ eine Vervielfachung (von 34 auf 137 GW). Im Ergebnis wäre die installierte Leistung dieser beiden Standorttypen im Jahr 2045 mit ca. 47 Prozent Freiflächen- und 53 Prozent Dachflächenanlagen etwa gleichverteilt. Diese Verschiebung der Standorttyp-Anteile könnte durch neue Einsatzbereiche für Photovoltaikanlagen in der Fläche beispielsweise durch Agri- und Verkehrswege-PV sowie Schwimmende PV unterstützt werden.

Gleichzeitig ist nach Auffassung einiger Projektpartner unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und bauphysikalischer Gegebenheiten (bspw. Verschattung, Dachausrichtung etc.) in der praktischen Umsetzung auch ein deutlich stärkerer Ausbau von PV-Dachflächenanlagen denkbar und zielführend, als in dem aus heutiger Sicht insgesamt ambitionierten Szenario KN100 dargestellt. Diese weitergehende Potentialerwartung könnte bereits in der zweiten Hälfte der 20er-Jahre, vor allem in der Zeit nach

2035 zum Tragen kommen. Im Rahmen der Modellierung des Gebäudesektors wurde daher eine ergänzende Modellrechnung vorgenommen, bei der die Flächenpotenziale für Aufdachanlagen deutlich stärker ausgenutzt werden. Hierbei könnte allein für PV-Aufdachanlagen bis 2045 eine installierte Erzeugungsleistung von ca. 180 GW erreicht werden. Gebäude könnten damit eine zunehmend aktive Rolle im Energiesystem einnehmen und signifikant zur EE-Stromerzeugung beitragen; die für PV geeigneten Dachflächen (für 2015 rund 849 km² auf Wohn- und 757 km² auf Nichtwohngebäuden¹⁵) würden dabei zu rund zwei Dritteln ausgeschöpft.

Ein stärkerer Zubau der PV-Stromerzeugung an Gebäuden wird auch durch das im Rahmen der dena-Leitstudie von Fraunhofer ISE erstellte Kurzgutachten „Innovative Energietechnologien“ gestützt. Aufgrund erwarteter Kostensenkungen können im Zeitraum ab 2030 bauwerksintegrierte Lösungen auch bislang nichtgenutzte Flächenpotenziale wirtschaftlich erschließbar machen. Eine fortschreitende Automatisierung der Produktion kann die spezifischen Kosten auch im Bereich kundenspezifischer Module für bauwerkintegrierte Anlagen schnell sinken lassen. Weitere Kostenreduktionen wären durch Vorfertigung für den Einsatz im Rahmen von seriellen Sanierungen denkbar. Das Kurzgutachten geht dabei sowohl für Fassaden- als auch Dach-integrierte PV-Anlagen von einem starken Zubau aus: Allein bei dachintegrierten Anlagen wird hier ein jährlicher Zubau von 6 GW im Jahr 2030 für möglich gesehen, der bis 2050 auf rund 8,5 GW/a ansteigen kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Politik das Segment regulatorisch und forschungspolitisch weiter unterstützt.

Hiermit wären mehrere Vorteile verbunden: Durch die stärker verbrauchsnahe Stromerzeugung kann ein Beitrag zur Verringerung der Netzbelastung geleistet werden. PV-Anlagen an Gebäuden können die unmittelbare Teilhabe von mehr Bürgerinnen und Bürgern stärken und hierdurch zu einer Erhöhung der Akzeptanz der Energiewende führen. Zudem kann und sollte die Integration in die Gebäudehülle (Dach oder Fassade) Synergien mit anderen Sanierungs- bzw. Verbesserungsmaßnahmen ermöglichen.

Die Entwicklung beider Standortvarianten hängt letztendlich maßgeblich von der künftigen Gestaltung der politischen Rahmenbedingungen ab. Es entstehen bei entsprechend günstiger Regulierung vielfache Optionen, direktelektrische Technologien wie Wärmepumpen, Batteriespeicher und Ladeinfrastruktur zu integrieren, regionale Märkte und Energiegemeinschaften zu bilden sowie PV-Mieterstrommodelle zu stärken. Im Zuge der

forcierten Nutzung der E-Mobilität und der stärkeren Nutzung von Wärmepumpen im Neubau sowie im Bestand, wird sich die Nachfrage nach PV-Aufdachanlagen im Laufe dieses Jahrzehnts, insbesondere aber ab 2030 intensivieren. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass Geschäftsmodelle wie Peer-to-peer Handel oder Energy Sharing diese Nachfrage verstärken werden. In diesem Zusammenhang sollte eine einfache lokale Verwendung des Stromes sichergestellt und geregelt werden. PV-Stromerzeugung an Gebäuden hat zudem bereits aus heutiger Perspektive für die Nutzerinnen und Nutzer bei Eigenstromnutzung den wirtschaftlichen Vorteil von vermiedenem Strombezug aus dem Netz (bei privaten Verbrauchern rund 30 Cent/kWh). Diese Impulse wirken sich sowohl bei privaten Anlagen als auch im Segment der gewerblichen und industriellen Eigenversorgung aus. Die hieraus entstehenden (Kosten-)Vorteile für die einzelnen Akteure werden jedoch in der energiesystemischen Modellierung im Rahmen der dena-Leitstudie nicht berücksichtigt.

Auch im Bereich der Windenergie zeigen die Modellierungsergebnisse einen im Vergleich zur heutigen Situation hohen Zubau bis zum Ende dieses Jahrzehnts (durchschnittlich 4,4 GW/a im Zeitraum bis 2030) und dann aufgrund der Modellierungsmethodik eine Verminderung des Zubaus auf etwa 2 GW pro Jahr. Um diesen hohen Zubau in der laufenden Dekade zu erreichen, müssen rasch die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass sich das Angebot an Projekten signifikant erhöht. Diese Verbesserung der Rahmenbedingungen wird sich jedoch möglicherweise auch auf den Zeitraum nach 2030 auswirken, so dass sich der im Modell ausgewiesene Rückgang des Zubaus ab 2030 auch anders entwickeln kann. Ob dies vor dem Hintergrund auch weiterhin zur Verfügung stehender Flächen und Diskussionen rund um die Akzeptanz von Windenergie so kommen wird, ist aus heutiger Sicht nicht absehbar.

So wie es Risiken bezüglich der tatsächlichen Realisierung des ambitionierten erforderlichen Hochlaufs für Erneuerbare Energien gibt, können in der mittel- bis langfristigen Perspektive durch neue EE-Erzeugungstechnologien und anwendungsbereiche auch Chancen für einen gegenüber dem Szenario KN100 beschleunigten Ausbau der EE-Stromerzeugung entstehen. Daher ist eine kontinuierliche Erfassung von Trends und neuen Erkenntnissen (beispielsweise der tatsächlichen Marktentwicklungen und neuer Veränderungspotentiale durch soziale, technologische und regulative Innovationen, sowie der Erkenntnisse aus Studien wie der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität) sinnvoll, um die Transformationspfade zur Klimaneutralität auf Basis neuer Erkenntnisse fortzuschreiben.

¹⁵ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2018b.

9.2 Bis 2030 leistungsfähige Märkte und Infrastrukturen für Powerfuels aufsetzen

Bisher sind in Deutschland F&E-Projekte und kleinere kommerzielle Anlagen für die Erzeugung und Verwendung von CO₂-armem Wasserstoff und weiteren Powerfuels im Betrieb. Großskalige Projekte sind verschiedentlich angekündigt und in Vorbereitung, erfordern aber noch geeignete Förder- und Rahmenbedingungen. Um die nötige zukünftige Rolle dieser Energieträger für die weitere Energiewende zu ermöglichen, braucht es einen sich sehr schnell beschleunigenden Hochlauf der dafür neu entstehenden Märkte und synchronisiert mit dem Aufbau der nötigen Infrastrukturen. Dies wird insgesamt die Entwicklungsgeschwindigkeit von zum Beispiel Photovoltaik im Zeitraum zwischen 2000 und 2015 übersteigen und erfordert im Vergleich dazu zusätzlich parallel den Aufbau eines eigenen Leitungsnetzes.

Die Entwicklungsphase für synthetische Energieträger mehrgleisig gestalten

Bis 2030 ist der Hochlauf insbesondere von Wasserstoff (66 TWh) mit ersten Anteilen flüssiger Powerfuels (4 TWh) geprägt. Ab den 2030er Jahren steigt dann die Nachfrage nach gasförmigen und flüssigen Powerfuels, die spezifische Vorteile beim international

Die Förderung der Nachfrage nach synthetischen Energieträgern in den Sektoren muss in Summe und mittelfristig planbar den Markthochlauf ermöglichen.

weiträumigen Transport und Handel sowie beim Einsatz u. a. in der Chemie und im Verkehrssektor haben. Das genaue Verhältnis der Marktsegmente für Wasserstoff und seine Derivate ist heute nicht absehbar und von technologischen und marktlichen Entwicklungen abhängig. Die

weitere Rahmensetzung sollte daher grundsätzlich beide Bereiche abdecken, um im Sinne einer robusten Planung künftige Handlungsspielräume offen zu halten. Auch blauer Wasserstoff kann als Übergangslösung und Teil einer mehrgleisigen Strategie in den 2030er Jahren einen effektiven Beitrag zur Deckung der Wasserstoffnachfrage darstellen, wird aber langfristig durch grünen Wasserstoff ersetzt, da blauer Wasserstoff

durch Methan- und CO₂-Emissionen im Prozess und der Vorkette nicht klimaneutral ist. Die Rolle von blauem Wasserstoff in der Übergangsphase kann umso bedeutender sein, je besser sich diese Emissionen im Prozess und in der Vorkette technologisch begrenzen lassen.

Hochlauf der neuen Energiemärkte über deutliche Anreize auf der Nachfrageseite

Aufbauend auf der Nationalen Wasserstoffstrategie muss die Bundesregierung nun sehr schnell konkrete Maßnahmen zur Förderung von Erzeugung und Nutzung ergreifen, um die Wasserstoffwirtschaft Realität werden zu lassen. Für die Marktentwicklung gilt es, das Vertrauen in die zukünftige Verfügbarkeit zu wettbewerbsfähigen Preisen zu schaffen, um jetzt die notwendigen Investitionen in neue Anlagen (z. B. Industrie, wasserstofffähige Gaskraftwerke, Elektrolyseure) auszulösen. Dieses Vertrauen bezieht sich einerseits auf die Verfügbarkeit der notwendigen Mengen, andererseits auch auf die rechtzeitige Entwicklung und verlässliche Anbindung an leistungsfähige Netzinfrastrukturen.

Ein steigender CO₂-Preis wird fossile Energieträger verteuern, aber kurzfristig allein keine ausreichenden Marktsignale senden. Daher werden CCfD ein wichtiges Instrument für Branchen mit langen Planungs- und Investitionszyklen wie die Industrie sein, um sowohl Risiken von CO₂-Preisschwankungen zu reduzieren als auch eine gezielte Technologieförderung zu ermöglichen¹⁶ (siehe auch Kapitel 2 „Marktdesign“). Darüber hinaus sollten auf politischer Ebene weitere Maßnahmen geprüft werden, so etwa die Nutzung von sektoralen Quotensystemen sowie von Instrumenten zur Schaffung von Leitmärkten für grüne Produkte (international und national), um in Summe eine verlässliche Nachfrage für die Marktentwicklung sicherzustellen.

¹⁶ Der Inhaber eines CCfD erhält eine Differenzzahlung gemäß dem Preisunterschied zwischen dem aktuellen CO₂-Preis und einem festgelegten Fixpreis (Strike Price), solange der Fixpreis höher ist. Umgekehrt muss der Inhaber eine Zahlung in Höhe der Differenz leisten, wenn der CO₂-Preis den Fixpreis überschreitet. Ein CCfD basiert auf einem Vertrag mit befristeter Laufzeit zwischen dem Inhaber und einer (in diesem Fall neu zu schaffenden) staatlichen Institution.

Auf der Anbieterseite werden mit Blick auf die Nachteile für die ersten entstehenden Projekte für Elektrolyseure (First Mover Disadvantage) für einen ausreichenden aber begrenzten Zeitraum ergänzende Instrumente für eine Investitionsförderung sowohl für den industriellen Maßstab – wie aktuell über die IPCEI Projekte vorgesehen – als auch für kleinskalige Projekte wichtig, um Technologierisiken und einer tendenziell steilen Lernkurve zu Beginn Rechnung zu tragen.

Um die verlässliche Versorgung mit synthetischen Energieträgern für den Industriesektor sicherzustellen, können sich Marktakteure grundsätzlich über langfristige Lieferverträge absichern, wie sie heute im Gassektor üblich sind. Die Bundesregierung sollte prüfen, ob der Bedarf besteht, die Etablierung von Vertrags- und Handelsbeziehungen in der Anfangsphase zu unterstützen (analog zum Instrument „H₂ Global“ für die Entwicklung internationaler Handelsbeziehungen).

Ein Wasserstoffstartnetz bindet Industrieregionen und internationale Verknüpfungsstellen schnell an und gewährt Verlässlichkeit in der Transformation

Voraussetzung für den erfolgreichen Markthochlauf der Wasserstofftechnologie ist der schnelle Aufbau einer Wasserstoffnetzinfrastruktur. Die Grundlage hierfür sind die Realisierung eines H₂-Startnetzes bis 2030 sowie der Aufbau dezentraler Netzabschnitte entsprechend den lokalen Potenzialen. Die entstehenden Cluster sollen perspektivisch zu einem deutschlandweiten, öffentlich zugänglichen Wasserstoffnetz verbunden werden.

Das H₂-Startnetz ist von zentraler Bedeutung, um der Industrie Planungssicherheit bei der Umstellung auf Wasserstoff als klimaneutralen Energieträger zu geben, da es die kurzfristig verfügbaren Energiemengen determiniert und die Regionen benennt, in denen Wasserstoff leitungsbasiert verfügbar sein wird. Um ein Startnetz schnell und kostengünstig aufzubauen, soll es hauptsächlich durch Umstellungen aus freiwerdenden Gasleitungskapazitäten entstehen und an den von der Industrie gemeldeten Bedarfen sowie an den Anlandepunkten für Wasserstoffimporte ausgerichtet werden. Es sollte ein Konzept für einen fairen Umgang mit den Anschlussrisiken in der Aufbauphase entwickelt werden.

Konzepte zur Realisierung eines H₂-Startnetzes wurden bereits von den nationalen und europäischen Fernleitungsnetzbetreibern vorgestellt. Darauf sollte die Politik aufsetzen und den Regulierer beauftragen, unter Einbezug der Akteure eine verbindliche Vorgabe zu definieren.

Den europäischen und globalen Markt stimulieren: eng flankierte Startprojekte und Etablierung von Standards

Die Nachfrage nach Wasserstoff und seinen Derivaten in Deutschland kann mittel- bis langfristig im Wesentlichen nur über Importe aus dem europäischen und außereuropäischen Ausland gedeckt werden. In den Szenarios der dena-Leitstudie werden gasförmige Powerfuels mittelfristig durch Importe aus Europa bereitgestellt. Langfristig werden auch internationale Importe wichtiger. Im Bereich von Wasserstoff werden hier zunächst Importregionen in den Fokus rücken, die mittels Pipeline angebunden werden können oder bereits angebunden sind, wie beispielsweise Osteuropa und Nordafrika. Insbesondere im Bereich weiterer gasförmiger und flüssiger Powerfuels kommen aufgrund der geringeren Kosten für einen weiträumigen Transport auch entferntere Regionen wie Südamerika, Australien und der Mittlere Osten in Betracht, sodass die Simulationsergebnisse hier keine europäische Erzeugung vorsehen. Für eine rechtzeitige und ausreichende Verfügbarkeit dieser Energieträger ist die zügige Entwicklung von europäischen und globalen Märkten die Voraussetzung.

Deutschland kann und sollte diese Entwicklung in enger europäischer Kooperation vorantreiben, indem auf politisch-strategischer Ebene die bestehenden Energiekooperationen mit anderen Ländern gezielt weiterentwickelt und Partnerschaften mit potenziellen Lieferländern eingegangen werden, die über besonders günstige Ausgangsbedingungen verfügen. Es sollte eine breite Diversifizierung der Lieferländer bei der Steuerung internationaler Partnerschaften angestrebt werden, um Lieferisiken zu reduzieren und Abhängigkeiten gering zu halten. Planungen zur Weiterentwicklung der Energieinfrastruktur (u. a. Netzverknüpfungsstellen und Hafeninfrastrukturen) müssen dabei insgesamt zu dieser Importstrategie passen.

Mit Bürgschaften, Garantien und Kreditmöglichkeiten können neu entstehende internationale Projekte unterstützt werden, um Ausfallrisiken abzusichern und Kapitalkosten zu senken. Darüber hinaus ist es wichtig, auf europäischer Ebene und international auf abgestimmte Zertifizierungsverfahren hinzuwirken, um die Klimawirkung der verschiedenen Energieträger einheitlich zu bewerten und eine Verlagerung von Emissionen zu vermeiden. Die einheitliche Definition ermöglicht langfristig die Etablierung liquider und damit effizienter Märkte. Auch die Ausbildung erster Marktplattformen kann politisch unterstützt werden.

Eine ausführliche Beschreibung dieser Themen findet sich in Kapitel 5 „Internationale Einbettung“. Dort werden auch Aufgaben formuliert.

Abb. 9.5 Indikator „Produktion von Powerfuels (H₂, synth. Methan, PtL) heimisch“

Angaben in TWh

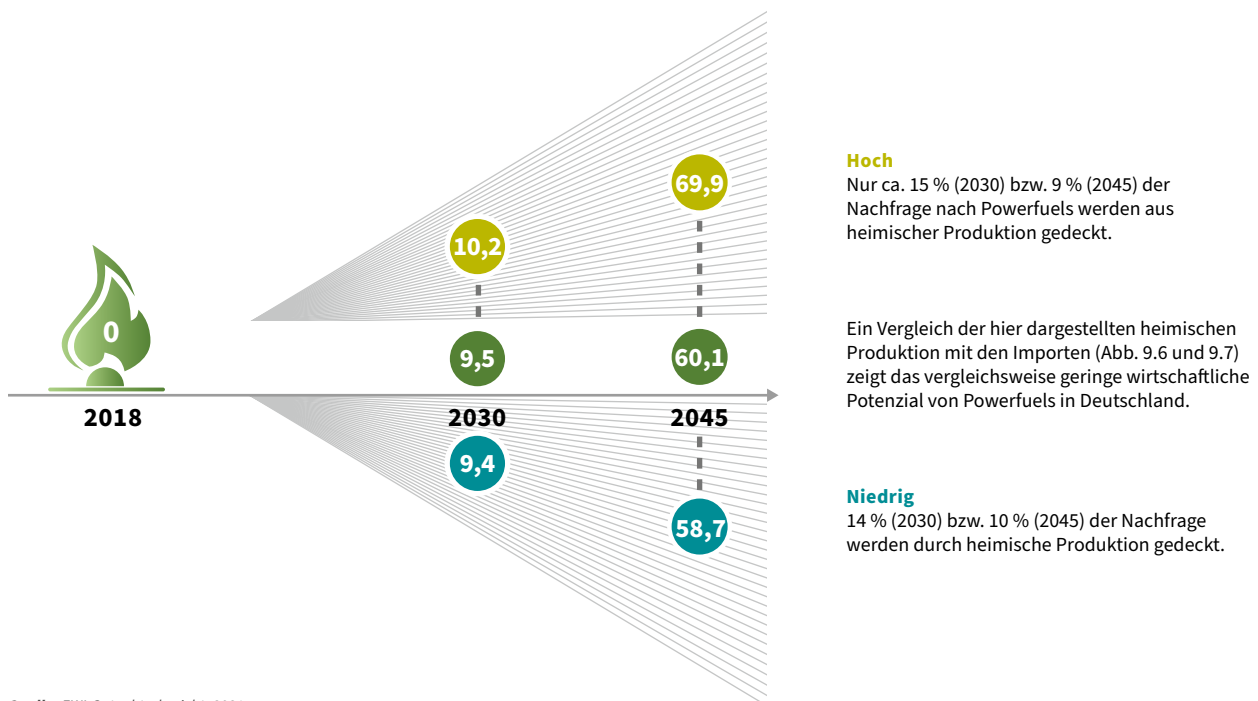
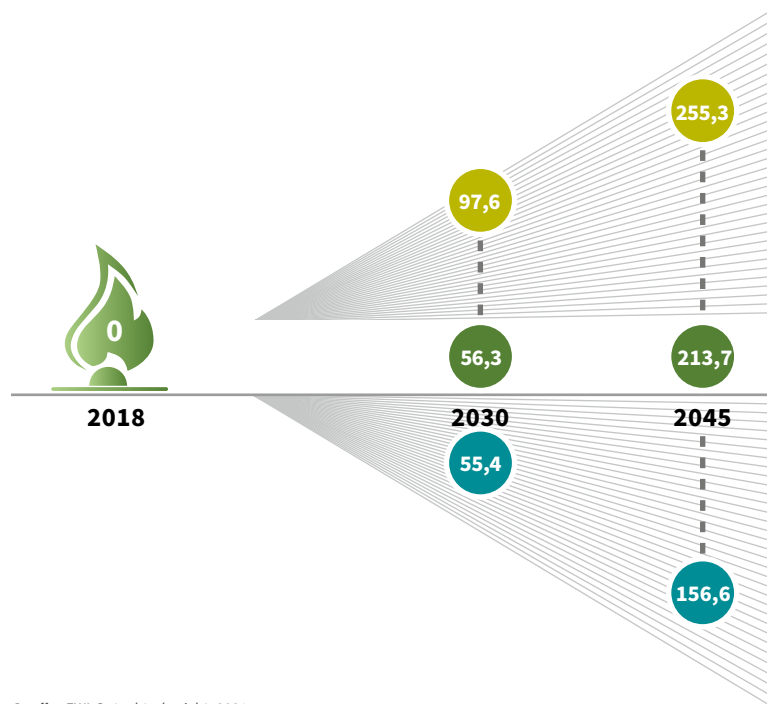


Abb. 9.6 Indikator „Import von Powerfuels (H₂, synth. Methan, PtL) aus Europa“

Angaben in TWh



Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Hoch

Die erheblich höheren Importwerte entsprechen einer höheren Nachfrage, vor allem an flüssigen Powerfuels, aber auch Wasserstoff. Flüssige Powerfuels werden zur Erreichung der Sektorziele im Gebäude- und Verkehrssektor eingesetzt.

Hauptszenario KN100

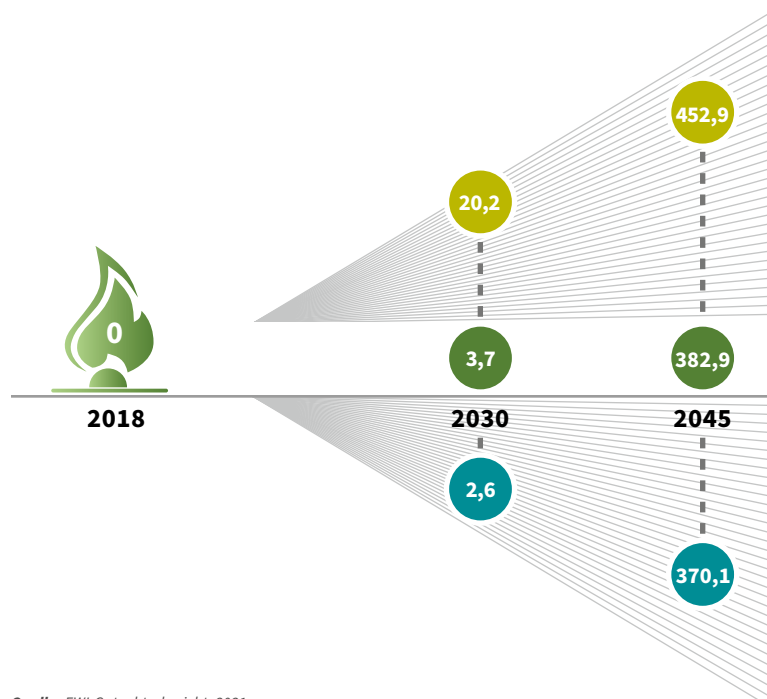
Die Nachfrage nach Powerfuels steigt bereits in 2030 deutlich an und wird in allen Ausprägungen überwiegend durch europäische Importe gedeckt (über 60 % Anteil an der Gesamtnachfrage). Diese nehmen bis 2045 nochmals deutlich zu, spielen dann aber gegenüber den außer-europäischen Importen die kleinere Rolle (unter 40 %).

Niedrig

Die Importwerte für Powerfuels fallen nur begrenzt niedriger aus als im Hauptszenario KN100. Hintergrund ist der Einsatz von Wasserstoff bei der Verstromung in den Elektrifizierungs-Ausprägungen.

Abb. 9.7 Indikator „Import von Powerfuels (H₂, synth. Methan, PtL) von außerhalb Europa“

Angaben in TWh



Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Der Beitrag der Powerfuels-Importe von außerhalb der EU ist 2030 noch vergleichsweise niedrig, steigt aber bis 2045 sehr stark an (von unter 20 % auf über 50 % der Gesamtnachfrage). Dies spiegelt die Begrenzung der Erzeugungs- und Transportkapazitäten der Exportländer wider, die erst nach 2030 ausgebaut werden. Bei diesen Importen spielen vor allem flüssige Powerfuels eine wichtige Rolle, da sie verschifft werden können, während bei Wasserstoff ein Pipeline-Transport unterstellt wird. Flüssige Powerfuels werden dabei vor allem im Verkehr- und Gebäude-Sektor eingesetzt.

Die Unterschiede zwischen den hohen und den niedrigen Ausprägungen sind wie zuvor durch die Nachfrage bestimmt: In der hohen Ausprägung werden verstärkt Powerfuels eingesetzt, in der niedrigen stärker elektrifiziert.

Potenziale synthetischer flüssiger Energieträger

Bei einer rein modellgetriebenen Betrachtung werden im Szenario KN100 aus Gesamtsystemsicht bis 2030 voraussichtlich rund 4 TWh synthetische flüssige Energieträger (Power-to-Liquid, PtL) eingesetzt. Hierbei berücksichtigt das Modell unter Einhaltung der THG-Minderungsziele und Zugrundelegung der bestehenden Rahmenbedingungen verschiedene Erzeugungs- bzw. Bereitstellungspfade zur Deckung der bottom-up ermittelten Endenergiebedarfe.

Aus heutiger Sicht werden auch in einem klimaneutralen Energie- und Wirtschaftssystem weiterhin große Mengen Kohlenwasserstoffe als Energieträger (z. B. Kerosin) und Rohstoff (z. B. Methanol, Ethylen oder Propen) benötigt. In Ergänzung zu biogenen Energieträgern ist daher der Hochlauf der Erzeugungstechnologien und -anlagen für Powerfuels – durch Strom und CO₂ aus erneuerbaren Quellen erzeugte gasförmige und flüssige Energieträger und Rohstoffe – notwendige Voraussetzung zur Erreichung der nationalen und internationalen Klimaziele. Kohlenwasserstoffe oder auch Ammoniak sind zudem kostengünstig über weite Entfernungen transportierbar und langfristig speicherbar, so dass diese global verteilt erzeugt und auf globalen Märkten gehandelt werden können und damit trotz Effizienzverlusten bei der Herstellung einen systemischen Vorteil haben. Länder mit großen Flächenpotenzialen und hohem Angebot an Solar-, Wind- und Wasserkraft können damit zur kostengünstigen Deckung des europäischen und deutschen Energie- und Rohstoffbedarfs beitragen und von positiven Beschäftigungs- und Wohlfahrtseffekten profitieren. Für Deutschland bieten sich industriepolitische Chancen als Lieferant der benötigten Erzeugungs- und Umwandlungstechnologien sowie in der Projektentwicklung und dem Anlagenbau.

Die Bundesregierung hat zur Umsetzung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie II (RED II) der EU im Rahmen der nationalen THG-Minderungsquote für Kraftstoffe vorgegeben, dass dem in Deutschland abgesetzten Kerosin synthetisch erzeugtes PtL-Kerosin beizumischen ist und unterstützt den hierzu geplanten Markthochlauf (0,5 Prozent PtL-Kerosin ab 2026, 1 Prozent ab 2028, 2 Prozent ab 2030) über Förderprogramme. Nach Hochrechnung der deutschen Luftfahrtbranche entspricht diese Beimischung im Jahr 2030 einem Kraftstoffbedarf von rund 200.000 Tonnen PtL-Kerosin (rund 2,4 TWh). Die im Szenario KN100 ausgewiesenen PtL-Mengen (4 TWh) erfüllen die PtL-Mindestquote und stellen darüber hinaus synthetischen PtL-Dieselmotorkraftstoff für den Individual- und Schwerlastverkehr zur Verfügung.

Nach Auffassung einiger Projektpartner ist bei synthetischen Flüssigkraftstoffen ein schnellerer Hochlauf über die im ambitionierten Szenario KN100 ausgewiesenen PtL-Mengen hinaus möglich. So entstünden derzeit global große Projekte zur Erzeugung von Powerfuels, beispielsweise das von Siemens, Porsche und weiteren Partnern begonnene Projekt „Haru Oni“ in Chile, in dem nach zwei Ausbaustufen ab 2026 jährlich etwa 4 TWh PtL-Kraftstoffe hergestellt werden sollen. Eine global schnellere Verfügbarkeit von Powerfuels könne durch die Einsetzbarkeit in einer Vielzahl von Anwendungen in allen Sektoren (Verkehr, Gebäude, Industrie) weitere Erfüllungsoptionen zur beschleunigten Erreichung der Klimaziele schaffen. Powerfuels könnten zudem eine Option zur Erfüllung der THG-Minderungsziele sein, wenn die weitere Elektrifizierung und/oder die Erhöhung der Energieeffizienz bis 2030 nicht ausreichend schnell voranschreiten. Im Sinne einer robusten Planung sei daher ein frühzeitiger Aufbau von Projekten und internationalen Partnerschaften zur Bereitstellung von synthetischen Energieträgern und Rohstoffen wichtig.

Die Untersuchungen im Rahmen der dena-Leitstudie zeigen, dass bei langsamerer Umstellung auf direktelektrische Anwendungen und schwächeren Fortschritten bei der Verbesserung der Energieeffizienz zur Erreichung der Klimaziele signifikant höhere Mengen emissionsneutral erzeugter gasförmiger und flüssiger Kraft- und Brennstoffe benötigt werden. In der „More Molecules“-Pfadausprägung würden im Jahr 2030 zusätzliche 68 TWh flüssiger Powerfuels gegenüber dem KN100-Szenario benötigt, insbesondere im Verkehrs- und Gebäudesektor. Über die Realisierung größerer Mengen emissionsneutral erzeugter Kraft- und Brennstoffe wird derzeit in der energiepolitischen Debatte intensiv diskutiert (beispielsweise über die Gesamteffizienz und die großen benötigten Mengen von erneuerbarem Strom und CO₂). Die heutigen in der Modellierung zugrunde gelegten Rahmenbedingungen bieten keine ausreichenden Anreize für einen Markthochlauf von Powerfuels. Klar ist aber: Sollten größere Mengen zur Verfügung stehen, könnten sie einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten.

9.3 Energieinfrastruktur: Netze ertüchtigen und ausbauen, System integrieren

Der Übergang des Energieversorgungssystems zu klimaneutralen Energieträgern und die dafür erforderliche Weiterentwicklung der Energieinfrastrukturen sind eine Herausforderung für die Energiewende, die durch die weitere Beschleunigung an Dringlichkeit gewinnt.

Integrierte Strategien, Planungen und Regulierung für die Energieinfrastrukturen auf europäischer, nationaler und lokaler Ebene sicherstellen

Zur Erreichung der Ziele müssen Planungsgrundlagen und -prozesse sowie die Regulierung weiterentwickelt werden, um die Geschwindigkeit der notwendigen Systemtransformation zu ermöglichen. Insbesondere muss eine gute Koordination der Entwicklung der Energieversorgungssysteme für Strom, Gas, Wasserstoff und Wärme untereinander erreicht werden, um insgesamt die Kongruenz der Infrastrukturen sicherzustellen und eine Optimierung im Gesamtsystem zu erreichen.

Wie in Kapitel 2 „Marktdesign“ dargestellt, sollte deshalb mit dem Systementwicklungsplan ein strategisches Planungsinstrument auf Systemebene eingeführt werden als integrierte und optimierte Basis für die detaillierten Netzentwicklungspläne für die Strom-, Gas- und Wasserstoffnetze. Neben der Vorgabe eines einheitlichen Rahmens für die verschiedenen Infrastrukturplanungsprozesse durch den Systementwicklungsplan sind auch Anpassungen an den Prozessen der Netzentwicklungspläne (NEP) für einen integrierten Ansatz sinnvoll. Die Infrastrukturbetreiber sollten verpflichtet werden, sich bezüglich der Annahmen, die mehrere Infrastrukturen betreffen, abzustimmen (z. B. Netzanschlusspunkte von Elektrolyseuren). Damit dies gelingt, ist es erforderlich, dass die NEP-Prozesse nicht mehr zeitlich versetzt, sondern synchron ablaufen und in den Szenarien gleiche Zieljahre betrachten. Der Abgleich mit der europäischen Ebene erfolgt weiterhin über die TYNDP.

Komplementär zu der Transportnetzplanung ist es wichtig, auch auf regionaler und kommunaler Ebene mithilfe langfristig ausgerichteter Energieleitplanungen integrierte Strategien für die leitungsgebundene Energieversorgung auf den untergeordneten Netzebenen einschließlich der Wärmeversorgung zu gestalten. Die detaillierte Netzplanung erfolgt dann weiterhin durch die Netzbetreiber, auf Grundlage der übergeordneten integrierten Strategien.

Auch die Regulierung von Energieinfrastrukturen sollte mit Blick auf die Transformation und eine integrierte Optimierung weiterentwickelt werden, indem Sektorkopplung begünstigt wird und Maßnahmen über den Mindestausbau hinaus bewilligt werden können, wenn diese im Laufe der Zeit wirtschaftlich und technisch sinnvoller sind als Alternativen, die nur auf das Zieljahr der Netzplanung abstellen. Eine vorausschauende Planung und entsprechende Investitionsanreize sind erforderlich, um die Sicherheit der Versorgung während der Transition zu gewährleisten.

Stromnetze beschleunigt ausbauen und Übergangsphasen betrieblich gut absichern

Die Entscheidungen zum zukünftigen Rahmen von Erzeugung und Last im Stromsektor sind mit Blick auf den erforderlichen Bedarf nach Ausbau und für weitergehende Möglichkeiten zum Betrieb der Stromnetze ausgesprochen dringlich. Der Ausbau von erneuerbaren Energien, die Aktivierung von Flexibilität und der Einsatz neuer strombasierter Anwendungen wie Wärmepumpen und Elektromobilität haben unmittelbare Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf. Die Modellierung zeigt, dass die bisher für 2035 geplanten Netzausbaumaßnahmen für das Übertragungsnetz aus dem Netzentwicklungsplan aufgestockt werden müssen und schon bis 2030 umgesetzt sein müssten, um ein weitgehend engpassfreies Netz bereitzustellen. Angesichts der Herausforderungen beim Ausbau des Stromübertragungsnetzes im letzten Jahrzehnt wird dies nur schwer umsetzbar sein.

Der zusätzliche Ausbau erneuerbarer Energien erfordert eine signifikante Beschleunigung des Stromnetzausbaus.

Damit die Infrastruktur nicht zum Flaschenhals für das Erreichen der Energiewendeziele wird, muss der Netzausbau signifikant beschleunigt werden, andernfalls droht eine Gefährdung der sicheren Versorgung bzw. eine Verfehlung der klimapolitischen Ziele. Dafür müssen auf politischer Ebene substanziell weitergehende Möglichkeiten zur Beschleunigung der Planungs- und Genehmigungsverfahren geprüft werden, wie eine Fokussierung der Beteiligungsmöglichkeiten sowie empfindlichere Fragen, welche die Verringerung von Einspruchsmöglichkeiten oder den Arten- und Umweltschutz betreffen. Ergänzende Möglichkeiten bestehen in der Bündelung der Kompetenzen bei der Bundesnetzagentur (BNetzA) als zentraler Genehmigungsbehörde für alle Verfahrensarten, mit entsprechender personeller Ausstattung.

In jedem Fall werden Netzengpässe und damit das Erfordernis von Redispatch und weiteren betrieblichen Maßnahmen für eine sichere Systemführung in den nächsten Jahren deutlich zunehmen. Es muss sichergestellt werden, dass hierfür trotz des absehbaren Ausscheidens fossiler Kraftwerke ausreichend steuerbare Kapazitäten bereitstehen. Gegebenenfalls muss entsprechend dem gesetzlichen Rahmen der heutigen Netzreserve die Abschaltung von weiteren Kraftwerken an kritischen Stellen innerhalb des Übertragungsnetzes durch die Bundesnetzagentur verzögert werden. Gleichwohl erhöht der Befund die Dringlichkeit, das Vermögen der bestehenden Kapazitätsmechanismen zu überprüfen (siehe Abschnitt 9.4).

Mit der Verzögerung des Netzausbaus und dem erforderlichen Redispatch wird die Ausschöpfung der installierten erneuerbaren Energien in vielen Stunden begrenzt. Damit wird die Energiegewende tendenziell verteuert und die Treibhausgasbilanz verschlechtert sich. Dies muss dann gegebenenfalls durch andere Maßnahmen kompensiert werden.

Neben dem notwendigen Netzausbau sollten weitere Maßnahmen zur verbesserten Nutzung bestehender und zukünftiger Netze vorangebracht werden. Hierzu zählen eine Ausweitung des witterungsabhängigen Freileitungsbetriebs, die beschleunigte Umsetzung von Maßnahmen zur Lastflusssteuerung und die Einführung kurativer Netzbetriebsführung. Auch hier gilt es, genehmigungsrechtliche Hindernisse, die beispielsweise durch neue Stromgrenzwerte auf bestehenden Leitungen entstehen können, abzubauen.

Auch die Verteilnetze stehen vor großen Herausforderungen. Sowohl der rasche Zubau neuer Lasten wie Wärmepumpen als auch die Netzintegration dezentraler erneuerbarer Energien erfordern in den nächsten Jahren eine sehr hohe Rate an Netzausbau, gerade in den städtischen Verteilnetzen, die noch steigt, wenn die bereits lange diskutierten Optionen zur netzorientierten Steuerung von flexiblen Lasten nicht politisch ermöglicht werden. Es sollte geprüft werden, wie die kleineren städtischen Verteilnetzbetreiber bei der Umsetzung ihrer Planungs- und Umsetzungsprozesse unterstützt werden können und inwieweit eine ausreichende Zahl von Fachkräften und Fachfirmen für die Umsetzung zur Verfügung steht. In den Städten gilt es zu prüfen, wie die Bauarbeiten zur Weiterentwicklung der verschiedenen Energieinfrastrukturen koordiniert und gebündelt werden können.

Potenziale für netz- und systemdienliche Flexibilität aktivieren

Neben der Entwicklung des Netzes ist die Aktivierung nachfrageseitiger Flexibilitätspotenziale ein wichtiger Baustein für die Weiterentwicklung des Stromsystems zur Integration erneuerbarer Energien. Ein zentraler Enabler zur Aktivierung von Flexibilität ist die Digitalisierung des Stromsystems, die weiter forciert und insbesondere in den unteren Netzebenen beschleunigt werden sollte. Dabei ist es notwendig, Hürden bei der Anreizregulierung und Netzentgeltsystematik abzubauen, um gezielte Anreize für die Aktivierung von Flexibilitätsoptionen, wie einem systemdienlichen, flexiblen Verhalten der Verbraucherinnen und Verbraucher zu setzen.

Die verschiedenen, zum Teil seit Jahren existierenden Vorschläge und Optionen (z. B. Dynamisierung der Netzentgelte, Output-orientierte Regulierung) sollten von der Politik dringlich in der nächsten Legislaturperiode aufgegriffen, sortiert und zu einem stimmigen Gesamtkonzept verdichtet werden, das dann umgesetzt wird. Zur Aktivierung der Flexibilität sind über die Beseitigung von Hürden hinaus gleichzeitig gesetzliche Rahmenseetzungen erforderlich, die eine langfristige Nutzung von verbraucherseitigen Flexibilitäten auf den unterster Netzebene ermöglichen und anreizen (Umsetzung des Artikels § 14a EnWG). Darüber hinaus sollte – u. a. auch auf Basis der durchgeführten Sinteg-Projekte – die Einführung von Flexibilitätsmärkten geprüft werden, um größere lastseitige Flexibilitäten (z. B. industrielle Lasten und Speicher) auf höheren Netzebenen netz- bzw. systemdienlich zu aktivieren.

Lokale und dezentrale Systemlösungen etablieren

Im Zuge der Transformation hin zu einem klimaneutralen Energiesystem spielen dezentral optimierte Lösungen auf regionaler und lokaler Ebene eine wesentliche Rolle, zum Beispiel bei der Ausgestaltung der Energieversorgung von Quartieren. Sie können lokal optimierte Lösungen für eine klimaneutrale Energieversorgung bereitstellen und Akzeptanz durch Verankerung in der Region schaffen. Steigende Flexibilitätspotenziale, die sektorübergreifende Planung und der sektorübergreifende Betrieb von Infrastrukturen und damit verbunden eine Digitalisierung durch den Roll-out von Mess- und Steuertechnik sowie die Anwendung intelligenter (teil-)autonomer Steuerungssysteme sind dabei die Grundsteine für die Schaffung lokaler und dezentraler Systemlösungen. Lösungskonzepte sind vielfältig und sollten durch das kontinuierliche Bekanntmachen von Leuchtturm-Projekten und guten Beispielen kontinuierlich in die Breite getragen werden.

Von staatlicher Seite sollten dezentrale Systemlösungen durch die Schaffung eines stimmigen rechtlichen und regulatorischen Rahmens befördert werden, der gekennzeichnet ist durch möglichst technologie- und lösungsoffene Märkte, die Möglichkeit zur Realisierung lokaler Flexibilitätsmärkte sowie Anreize zur Realisierung von sektorübergreifenden Lösungen.

Die Wasserstoffinfrastruktur in enger Kopplung mit der Transformation der Gasnetzinfrastruktur aufbauen und entwickeln

Die zeitnahe Realisierung eines H₂-Starttransportnetzes (siehe oben) vorrangig durch Umstellung freiwerdender Gasnetzkapazitäten ist ein erster wesentlicher Schritt zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur. Um das Startnetz bedarfsgerecht weiterzuentwickeln, ist analog zu den Netzentwicklungsplanungsprozessen für Strom und Gas ein Planungsprozess für Wasserstoff zu etablieren. Im Sinne einer integrierten Infrastrukturplanung sollte mittelfristig eine Verschmelzung – mindestens aber eine deutliche Kopplung – dieses Prozesses mit dem NEP Gas geprüft werden, um die Optionen Umstellung und Neubau effizient abwägen zu können. Gleichzeitig ist es wichtig, diesen Prozess so zu gestalten, dass sich auch neue Akteure in die Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur einbringen können.

Aus heutiger Sicht lassen sich das Zielbild und die langfristige Struktur der Leitungsinfrastruktur für gasförmige Energieträger in Deutschland noch nicht ausreichend sicher beschreiben. Es sind noch weitere Studien wie zum Beispiel die zurzeit geplante „Studie zu Pfadoptionen der Dekarbonisierung des Wärmemarktes“ des Nationalen Wasserstoffrates sowie die sukzessive Auswertung von Erkenntnissen aus den ersten Schritten in den neuen Märkten wichtig.

Für das bestehende Gastransportnetz gilt es daher, im Zusammenspiel zwischen SEP (Systementwicklungsplan), NEP Gas und NEP H₂ fortlaufend die langfristige Perspektive zu klären und weiterzuentwickeln sowie für die jeweiligen Netzabschnitte selektiv die Umstellung zu einem H₂-Netz oder den Weiterbetrieb als Methanetz in Anbetracht von bottom-up ermittelten Bedarfen und von den Klimazielen ableitenden Randbedingungen zu beschließen.

Auch auf Ebene der Gasverteilnetze muss eine Umstellung auf Wasserstoff selektiv geprüft werden. Der kommunalen Energieleitplanung wird hier als zentralem, Orientierung gebenden Instrument eine wichtige Rolle zukommen, um unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten und in Kongruenz mit dem überlagerten Energiesystem die optimale, klimaneutrale Deckung des Energiebedarfs aus leitungsgebundenen Infrastrukturen und nicht leitungsgebundenen Energieträgern zu ermitteln. Unter dem Gesichtspunkt einer kostengünstigen und schnellen Umsetzung sowie der Verfügbarkeit des entsprechenden Energieträgers sollten hierbei alle möglichen Optionen der Versorgung über Strom, Wärmenetze, Wasserstoff und weitere klimaneutrale Energieträger bis hin zu dezentralen Lösungen in Erwägung gezogen werden. Um das Instrument der kommunalen Energieleitplanung für diesen Zweck erfolgreich in der Breite zur Anwendung zu bringen, sollten Erfahrungsaustausche zwischen Kommunen organisiert und gegebenenfalls gezielt Prozesse, Methoden und Tools weiterentwickelt werden.

Eine besondere Herausforderung wird im Zuge von Veränderungen der Verteilnetzinfrastrukturen die Koordination mit den Veränderungserfordernissen bei den angeschlossenen Einzelgebäuden u. a. mit Blick auf eine möglichst frühzeitige Ausrichtung und Berücksichtigung bei geplanten Sanierungsmaßnahmen oder zum Beispiel die Nutzung von leicht für einen Wasserstoff-einsatz adaptierbarer Heizungstechnik.

Die bestehenden Gasinfrastrukturen und deren Vorwärtskompatibilität für eine Nutzung mit klimaneutralen Gasen sind ein wichtiges Asset zur Realisierung der Energiewende. Perspektivisch werden sich auch einzelne Stilllegungen nicht ausschließen lassen. Eine vorschnelle Stilllegung von Netzabschnitten wäre aber kontraproduktiv und würde unnötig Lösungsoptionen verbauen. Mit Umstellung und Stilllegungen verbundene recht-

Der Aufbau des Wasserstoffnetzes muss schnell erfolgen. Das Startnetz sollte durch Umstellung bestehender Leitungen durch die Ferngasnetzbetreiber realisiert werden

liche Fragen (z. B. Versorgung von wenigen verbleibenden Abnehmern) sind aber komplex und sollten daher zeitnah adressiert und erörtert werden.

Die Regulierung der neuen Wasserstoffinfrastruktur sollte langfristig entsprechend der

gegenwärtigen Regulierung der Erdgasnetze ausgerichtet sein und eine perspektivische Zusammenführung sollte geprüft werden. Auf dem Weg dahin werden regulatorische und marktliche Ansätze benötigt.

Das H₂-Startnetz soll unter der Aufsicht der BNetzA für die angestrebte Umstellung von Gasleitungen durch die Ferngasnetzbetreiber umgesetzt und betrieben werden. Hierbei muss zu Beginn die Geschwindigkeit beim Aufbau im Vordergrund stehen. Dies erfordert auch einen nachhaltigen Finanzierungsrahmen.

Im Rahmen unternehmerischer Initiativen sollten weiterhin Dritte die Möglichkeit haben, zur Kundenversorgung neue Wasserstoffleitungen aufzubauen. Es sollte darüber hinaus die Möglichkeit geprüft werden, dass über das Startnetz und Umstellungen hinausgehende Erweiterungsinvestitionen in das Ferngasnetz, z. B. für Randgebiete des Netzes nach dem Ermessen der BNetzA im Rahmen von Ausschreibungsverfahren an Dritte vergeben werden können. Dabei darf die gesamtsystemische Effizienz nicht aus den Augen verloren werden. In den Konzessionen muss die langfristige Integration in das Wasserstoffnetz festgeschrieben werden.

Um den Aufbau der für den Wasserstoffimport notwendigen Infrastruktur zu gewährleisten, sind gezielte bi- und multilaterale Kooperationen innerhalb und außerhalb der EU erforderlich, insbesondere zum Pipeline-Aufbau. Auch die Transportinfrastrukturen für weitere gasförmige und flüssige Energieträger via Lkw, Bahn und Schiff (inklusive der Anlandungsterminals) sowie die Kapazitäten zur Speicherung sind bedarfsgerecht und vorausschauend anzupassen. Dabei ist die Diversität der möglichen Importprodukte zu berücksichtigen, beispielsweise Ammoniak oder Methanol, Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) oder auch andere Kohlenwasserstoffe. Für die deutschen Häfen braucht es eine klare Strategie und Spezialisierung, die lokale und europäische Interessen vereint.

9.4 Versorgungssicherheit ist die Basis für eine erfolgreiche Energiewende

Basis für eine erfolgreiche Energiewende ist, dass die Versorgungssicherheit auch in Zukunft jederzeit gewährleistet bleibt. Dies bedeutet, dass zu jeder Stunde im Jahr und zu jedem Zeitpunkt der Transformation ein ausreichendes Angebot an Energieträgern zur Deckung der Nachfrage vorliegt. Entscheidend hierfür sind schlüssige Konzepte, die die bedarfsgerechte Lieferung der benötigten klimaneutralen Energieträger sicherstellen, seien es erneuerbarer Strom, klimaneutraler Wasserstoff oder weiterverarbeitete Powerfuels.

Hinzu kommt, dass aufgrund des anziehenden CO₂-Preises im EU-ETS ein schnellerer Rückgang der Kohleverstromung als entsprechend dem gesetzlich verankerten Kohleausstieg wahrscheinlich erscheint. Entscheidend wird es sein, die verbleibenden regelbaren fossilen Kraftwerkskapazitäten durch klimaneutrale regelbare Leistung zu ergänzen, um auch langfristig die Stromnachfrage, die nicht durch Flexibilisierungsmaßnahmen verschiebbar ist, zu jeder Stunde sicher decken zu können. Langfristig werden diese Anlagen mit verhältnismäßig geringen Volllaststunden betrieben.

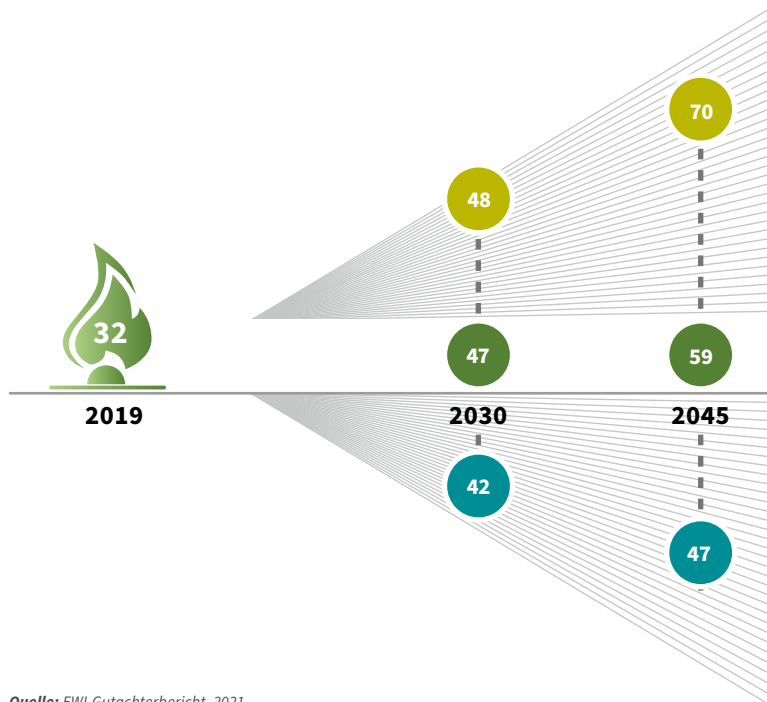
Für das klimaneutrale Energiesystem eine sichere Stromversorgung durch wasserstofffähige Gaskraftwerke und die Aktivierung von Flexibilität ermöglichen

In der Modellierung der dena-Leitstudie wurden einerseits die maximale residuale Stromnachfrage nach Berücksichtigung der verfügbaren Flexibilität und andererseits eine Dunkelflaute¹⁷ als dimensionierend für die gesicherte Leistung betrachtet. Es zeigt sich, dass die Anforderungen für beide Bedingungen in einer ähnlichen Größenordnung liegen und insbesondere bis 2030 zu erheblichen Herausforderungen führen.

¹⁷ Eine „kalte Dunkelflaute“ beschreibt einen andauernden Zeitraum mit geringen Einspeisungen aus erneuerbaren Energien bei gleichzeitig hoher Stromnachfrage und stellt somit eine Extremsituation dar. In der Studie wurden Zeiträume von 2 bis 10 Tagen auf der Basis historischer Wetterdaten analysiert.

Abb. 9.8 Indikator „Regelbare Gas-Kraftwerke (Erdgas, H₂-Kraftwerke)“

Angaben in GW (Kapazität)



Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Hoch

Aufgrund der höheren Stromnachfrage in der Elektrifizierungs-Pfadausprägung steigt die für die gesicherte Leistung relevante Spitzenlast. Der zusätzliche Bedarf wird durch Gaskraftwerke zur Verfügung gestellt.

Der hier gezeigte Indikator dient als Maß für die erforderliche gesicherte Leistung zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Zwar spielen hierfür auch Speicher und weitere Flexibilitäten eine Rolle, in geringerem Maße auch fluktuierende erneuerbare Erzeugungskapazität, doch werden die hier gezeigten Unterschiede wesentlich durch die in der Modellierung unterstellte jederzeitige Lastdeckung bestimmt.

Niedrig

In den Pfadausprägungen mit höherem Powerfuel-Anteil ist die Stromnachfrage aufgrund der geringeren Elektrifizierung geringer. In der Folge werden weniger Gaskraftwerke benötigt.

Es sind kurzfristig große Mengen an Gaskraftwerken zu installieren, die bereits ab 2025 direkt wasserstofffähig oder durch überschaubaren Aufwand umrüstbar sein sollten, zunächst aber noch mit Erdgas betrieben würden¹⁸. Unter der Annahme, dass weiterhin Kohlekraftwerke mit einer Kapazität von 12 GW verfügbar wären (die allerdings mit deutlich reduzierten Volllaststunden betrieben würden), zeigen die Modellierungsergebnisse allein bis 2030 Bedarf für den Aufbau zusätzlicher Gaskraftwerke mit einer Kapazität von 15 GW. Das schließt auch gasbefeuerte dezentrale KWK-Kraftwerke ein, um die Wärmeversorgung der Fernwärmenetze zu ermöglichen. Durch Wärmespeicher kann deren Fahrweise flexibilisiert und eine schnelle Regelbarkeit erreicht werden.

Flankierend können die Bedarfe für regelbare Kraftwerkskapazitäten durch die Nutzung von Flexibilitätsoptionen¹⁹ und Stromimporte reduziert werden. Gelingt es, die Lastflexibilität und die gesicherten Stromimporte über die in der Studie getroffenen Annahmen hinaus zu erhöhen, könnten die notwendigen Kapazitäten regelbarer Kraftwerke entsprechend reduziert werden.

Die aktuellen Markterwartungen lassen jedoch weder den Weiterbetrieb von Kohlekraftwerken mit geringen Volllaststunden wahrscheinlich erscheinen, noch rechtzeitige und ausreichende Investitionen in neue Gaskraftwerke. Daher sollte geprüft werden, die bestehenden Reservemechanismen²⁰ durch ein umfassendes Konzept für eine Systemreserve zu ersetzen und zusätzlich durch einen weitreichenden Kapazitätsmarkt zu ergänzen. Die erforderlichen Kapazitäten müssen mit ausreichend Vorlauf geplant, finanziert und gebaut werden können. Zur Deckung der elektrischen Last zu jedem Zeitpunkt (inklusive Ermöglichung des erforderlichen Redispatch) sollten neben dem Zubau gesicherter Kraftwerksleistung auch die Potenziale lastseitiger Flexibilität und Speicher für die Versorgungssicherheit einbezogen werden.

¹⁸ Nach Aussage der Hersteller werden ab 2025 erdgasbetriebene Kraftwerke verfügbar sein, deren Gasturbinen mit geringem Aufwand auf die Verbrennung von Wasserstoff umgestellt werden können. Der für den Betrieb der Kraftwerke notwendige leitungsgebundene Wasserstoff wird zu diesem Zeitpunkt jedoch bestenfalls punktuell im Nordwesten Deutschlands disponibel sein. Darüber hinaus müssen mittelfristig auch schon heute bestehende Gaskraftwerke mit Wasserstoff-fähigen Turbinen ausgestattet werden.

¹⁹ Flexibilitätsoptionen auf der Nachfrageseite umfassen sowohl das marktbasierte Demand Side Management, das auf Preissignale reagiert, als auch Demand Response Mechanismen, bei denen der Netzbetreiber gegen ein Entgelt in die Nachfrage eingreift.

²⁰ Hierzu zählen Netzreserve, Kapazitätsreserve und Sicherheitsbereitschaft, abschaltbare Lasten und besondere netztechnische Betriebsmittel.

Anforderungen an einen frühzeitigeren Ausstieg aus der Kohleverstromung

In 2020 waren 24 GW Steinkohle- und 20 GW Braunkohle-Kraftwerke im Strommarkt tätig²¹, weitere 4,8 GW Kohlekraftwerke befanden sich in Reserven. Basierend auf den Empfehlungen der sogenannten Kohlekommission regelt das Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVBG) den „Kohleausstieg“: Demnach sind für das Jahr 2030 maximal 17 GW Kohlekraftwerke vorgesehen und im Jahr 2035 noch maximal 6,4 GW; bis 2038 soll die Kohleverstromung komplett aus dem Markt genommen werden.

Gegenüber diesem Ausstiegsplan kann sich durch politische Entscheidungen und/oder die tatsächliche Marktentwicklung ein frühzeitigerer Kohleausstieg ergeben. Dies bringt verschiedene Anforderungen, Bedingungen und Chancen mit sich, die im Folgenden erörtert werden sollen.

Politische Gründe für einen frühzeitigeren Kohleausstieg

Es gibt verschiedene Gründe und aktuelle Trends, die einen frühzeitigeren Kohleausstieg erwarten lassen. So werden vor dem Hintergrund der ambitionierten Klimaziele für 2030 die Forderungen nach einer politischen Entscheidung für einen zeitlich vorgezogenen Kohleausstieg seitens verschiedener Parteien, Umweltorganisationen und der Organisationen der Zivilgesellschaft lauter. Auch die Entwicklung in den Verbrauchssektoren kann zusätzlich auf den Energiesektor wirken: Sollten diese die ambitionierten sektoralen THG-Minderungsziele bis 2030 nicht erreichen können, wird der Druck auf den Energiesektor absehbar steigen und ein frühzeitigerer Kohleausstieg wichtiger werden. Zu beachten ist hierbei, dass ein Vorziehen des Kohleausstiegs nur dann den gewünschten Effekt bei der (gesamteuropäischen) CO₂-Bilanz bringt, wenn dieser mit einem gezielten Abschmelzen der CO₂-Zertifikate im EU-ETS und einem entsprechenden Ausbau erneuerbarer Energien für die wegfallende Energiebereitstellung einhergeht.

CO₂-Preis und Marktentwicklung als Treiber für einen frühzeitigeren Kohleausstieg

Auch ohne neue politische Entscheidungen gerieten die Kohlekraftwerke zuletzt auch marktlich zunehmend unter Druck. Durch den Einbruch der Gas- und Strompreise (u. a. bedingt durch die Nachfrageveränderungen während der Corona-Pandemie) und gleichzeitig steigende CO₂-Preise haben sich Anfang 2020 zeitweise die Gaskraftwerke in der Grenzkosten-basierten Einsatzreihenfolge der Kraftwerke (Merit-Order) vor die Kohlekraftwerke geschoben. Hierdurch konnten Gaskraftwerke ihre Volllaststunden zulasten der Kohleverstromung ausbauen. Mit der sukzessiven Verknappung der CO₂-Zertifikate (u. a. durch die anstehende Überarbeitung des EU ETS im Zuge des EU-Maßnahmenpakets „Fit for 55“) ist perspektivisch von einem weiter ansteigenden CO₂-Preis und damit tendenziell von einer weiteren Verschlechterung der Marktaussichten von Kohlekraftwerken auszugehen.

Auch die für die dena-Leitstudie durchgeführten Modellierungen zeigen für das Jahr 2030 eine gegenüber dem von der Politik vorgesehenen Ausstiegspfad reduzierte installierte Leistung von nur 12 GW für Kohlekraftwerke. Dabei würden diese Kraftwerke in 2030 im Modell mit nur sehr geringen Volllaststunden von durchschnittlich rund 1.300 Stunden betrieben. Für einen wirtschaftlichen Betrieb von Kohlekraftwerken im Markt sind tendenziell höhere Volllaststunden nötig, so dass zumindest für einen Teil dieser noch benötigten Kohlekraftwerkskapazitäten die weitergehende Vorhaltung für Knappheitssituationen im Rahmen einer Reserve zu erwarten wäre. Braunkohlekraftwerke kommen dabei für eine kurzfristig einsetzbare Reserve aufgrund des systemischen Zusammenhangs und den damit verbundenen zu hohen Vorhaltekosten nicht in Frage.

²¹ Bundesnetzagentur (BNetzA), 2021.

Technische Grenzen einer weitreichenden Vorhaltung von Kohlekraftwerken in Reserven

Die Vorhaltung von Kohlekraftwerkskapazitäten in einer Reserve oder mit sehr wenigen Volllaststunden im Markt hat spezifische Herausforderungen und Grenzen. Kohlekraftwerke benötigen aus technischen Gründen für einen Kaltstart mehrere Tage und stehen im Bedarfsfall also erst innerhalb einiger Tage zur Verfügung. Hinzu kommt, dass die Vorhaltung eines Braunkohlekraftwerkes in der „kalten Reserve“ zusätzlich die Vorhaltung des zugehörigen Tagebaus und damit hohe Kosten bedeuten würde. Eine Vorhaltung für einen komplett stillgelegten Kraftwerksstandort ist betriebstechnisch und ökonomisch nur schwer realisierbar. Auch ein Betrieb von Kohlekraftwerken in einem niedrigen Teillastbereich ist aus technischen Gründen nur eingeschränkt möglich. Dies wäre zudem durch den schlechteren Teillast-Wirkungsgrad mit überproportional hohen CO₂-Emissionen behaftet. Es ist wichtig, diese verschiedenen technischen und betrieblichen Herausforderungen zu prüfen und zu adressieren, um den Lösungsraum für die Übergangsphase zu erweitern. Insgesamt ist aber eine Entnahme großer Kapazitäten von Kohlekraftwerken aus dem Strommarkt und deren Vorhaltung als Reserve als unrealistisch anzusehen.

Auswirkungen auf Systemebene für Energiebilanz, Versorgungssicherheit und Netzstabilität

Um einen frühzeitigeren Kohleausstieg umsetzen zu können, sind die Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass sowohl die durch Kohlekraftwerke erbrachte Erzeugungsleistung als auch die bereitgestellten technischen Leistungen für einen sicheren Netzbetrieb durch Alternativen ersetzt werden können.

Auf der Erzeugungsseite müssen bei einem frühzeitigeren Kohleausstieg, die durch Kohlekraftwerke erzeugten **eingespeisten Strommengen** durch alternative Erzeuger generiert bzw. aus dem europäischen Verbundnetz eingeführt werden. Für eine deutliche Treibhausgasemissionsreduktion bedeutet dies, dass bis 2030 über die bereits ambitionierten Hochlaufkurven der bestehenden Szenarios hinaus weitere erneuerbare Energien zugebaut werden müssten.

Darüber hinaus muss die durch die am Netz befindlichen Kohlekraftwerke bereitgestellte **gesicherte Leistung** ersetzt werden, um die residuale Stromnachfrage auch zukünftig zu jedem Zeitpunkt verlässlich decken zu können. Lösungsbeiträge hierzu könnten dabei grundsätzlich eine Ausweitung von gesicherten Stromimporten, eine weitergehende Lastflexibilität und die Nutzung von Speicherlösungen sowie neue regelbare Kraftwerke auf der Basis von Erdgas – mit der perspektivischen Umstellung auf Wasserstoff – leisten.

Versorgungssicherheit ist im europäischen Verbundnetz grenzüberschreitend zu bewerten und zu gewährleisten. Allerdings sind deutlich weitergehende kurz- und mittelfristig als gesichert zu betrachtende Beiträge aus dem Ausland für Extremsituationen, die über die Annahmen der heutigen Methoden zur Ermittlung der Erzeugungsadäquanz hinausgehen, politisch tendenziell unrealistisch und kaum zu beziffern.

Eine Ausweitung der Lastflexibilität reduziert den Bedarf für gesicherte Erzeugungsleistung und im Rahmen der Szenarios der dena-Leitstudie wird bereits ein deutlicher Beitrag durch Lastmanagement angenommen. Rahmenbedingungen und Konzepte zur Lastflexibilisierung sind in Deutschland bisher aber nur begrenzt entwickelt und müssen in den nächsten Jahren aktiv im Markt etabliert werden.

Als neue regelbare Kraftwerke wird in der dena-Leitstudie bereits ein Zubau für Gaskraftwerke bis 2030 in Höhe von 15 GW angenommen. Bei einem frühzeitigeren Kohleausstieg wird dieser Ausbaubedarf weiter steigen.

Neben der Stromerzeugung und dem Vorhalten von gesicherter Leistung erbringen Kohlekraftwerke aber auch noch verschiedene **Beiträge für einen sicheren Betrieb der Stromnetze**. Dadurch ergeben sich zu berücksichtigende Randbedingungen an den frühzeitigeren Ausstieg, Anforderungen an die nötigen Alternativen sowie Bedarf an flankierenden Maßnahmen.

Durch die Bereitstellung von Redispatchpotenzial leisten Kohlekraftwerke heute Abhilfe bei temporären Engpässen im Stromnetz, indem Erzeugung vor dem Engpass reduziert wird und nach dem Engpass erhöht wird. Mit Blick auf die bisherigen Verzögerungen beim Ausbau der Stromübertragungsnetze und den durch die Zielverschärfung zu erwartenden noch weitergehenden Netzausbaubedarf wird sich der Redispatchbedarf gerade im Übergangszeitraum 2030 nochmal deutlich erhöhen. Daher muss dies bei den Entscheidungen über die Stilllegung bzw. Überführung von Kraftwerkskapazitäten in Reserven berücksichtigt werden.

Zusätzlich sollten regionale Allokationsanreize (z. B. entsprechende Ausgestaltung neuer Mechanismen für die Bereitstellung gesicherter Leistung oder marktliche Mechanismen für regionale Systemdienstleistungen) eingeführt werden, um zu einer netzdienlichen Verortung der Erzeugungsleistung aus Gesamtsystemperspektive beizutragen.

Darüber hinaus tragen Kohlekraftwerke heute zu den Systemdienstleistungen Spannungshaltung und Frequenzhaltung bei und leisten durch ihre synchrone Anbindung wichtige Beiträge zur Stabilität der Stromnetze. Für diese technischen Fähigkeiten der Kohlekraftwerke gibt es Alternativen in Form von Netzbetriebsmitteln (z. B. Phasenschieber, Kompensationsanlagen, HGÜs) und Anlagen von Netznutzern (z. B. Kraftwerke mit alternativen Brennstoffen, erneuerbare Energien, Speicher, etc.). Die heute verfügbaren Anlagen sind aber in Summe noch nicht in der Lage Kohlekraftwerke vollumfänglich zu ersetzen und müssten entsprechend schneller ausgebaut bzw. noch weitergehend zur Erbringung der notwendigen technischen Leistungen befähigt werden.

Auswirkungen auf lokaler Ebene: Gewährleistung der Wärmebereitstellung durch alternative Wärmequellen und Flexibilisierung

Ein Teil der Kohlekraftwerke stellt heute neben Strom auch Wärme für Wärmenetze und für die Industrie zur Verfügung. Auf lokaler Ebene ergibt sich daher als wichtige Randbedingung für eine Reduzierung der Volllaststunden oder eine frühzeitigere Stilllegung von Anlagen, die **Wärmebereitstellung** über alternative Wege sicherzustellen. Auch hierfür stehen grundsätzlich verschiedene Lösungen zur Verfügung, beispielsweise der Einsatz von Gas-/H₂-betriebenen Anlagen, Solar- und Geothermie, industrielle Abwärme, Biomasse und Stromanwendungen (direktelektrisch oder als Wärmepumpe) voran zu bringen. Der Einsatz von Wärmespeichern kann zudem den wärmegeführten Betrieb der KWK-Anlagen entkoppeln und Flexibilität ermöglichen. Die Möglichkeiten und Anreize für die Diversifizierung der Wärmequellen und die Umstellung der Brennstoffe auf emissionsarme Alternativen sind hierfür weiter zu verbessern. Bei dem Ersatz auf Gas-KWK sollte eine zukünftige Umstellung auf Wasserstoff, soweit technisch möglich, vorbereitet werden.

Erfordernis weitergehender und vorgezogener Ersatzinvestitionen

Insgesamt ergibt sich mit einem frühzeitigeren Kohleausstieg die Erfordernis vorgezogener und weitergehender Ersatzinvestitionen unter Berücksichtigung der dargelegten Anforderungen. Gleichzeitig bestehen für die Investitionen in Gaskraftwerke unter den heutigen Markt- und Rahmenbedingungen große Unsicherheiten auf Seiten der Energieversorger. Deshalb gibt es bisher nur überschaubare konkrete Investitionsentscheidungen.

Die notwendigen Planungs- und Errichtungsdauern für neue Gaskraftwerke betragen je nach Kraftwerksart und Situation etwa vier bis sieben Jahren²². Daher ist es mit Blick auf den Übergang bis 2030 sehr zeitkritisch, dass die Planungen für Ersatzkapazitäten sofort angestoßen werden. Hinreichend häufige und hohe Preisspitzen zur Refinanzierung von Gaskraftwerken sind heute nicht kalkulierbar bzw. führen zu hohen Risikoauflagen. Daher sollten die zukünftig erwartbaren Marktimpulse durch ein politisches Signal in Form eines bis 2030 nötigen und angestrebten Zielvolumens ergänzt sowie ein weitergehender Kapazitätsmechanismus geprüft werden. Dabei gilt es, bei der Ausgestaltung eines Kapazitätsmechanismus die genauen Auswirkungen auf den Markt sorgfältig zu untersuchen.

Eine weitere Herausforderung dabei besteht darin, dass die Berücksichtigung der zukünftigen Wasserstofffähigkeit neuer Gaskraftwerke zwar heute bereits anlagenseitig technisch eingeplant werden kann, jedoch eine Reihe von Entwicklungen und Rahmenbedingungen für das einzelne Kraftwerkprojekt heute nicht absehbar und kalkulierbar ist und somit ein deutliches Hemmnis für zu treffende Investitionsentscheidungen darstellt. So besteht beispielsweise Unsicherheit, wann spezifische Kraftwerksstandorte an die Netzinfrastruktur für Wasserstoff angeschlossen werden. Zudem ist unsicher, zu welchen Preisen Wasserstoff verfügbar sein wird und wie sich im Übergangszeitraum die Wettbewerbssituation gegenüber Alternativen wie Erdgas darstellen wird.

²² Offenen Gasturbinen (OCGT) lassen sich etwas schneller erreichen als geschlossenen Gasturbinen (CCGT) oder Gas und Dampfkraftwerke (GuD).

Umfassende Prüfung und Aktivierung von flankierenden Maßnahmen

Neben den oben dargelegten zentralen Handlungsfeldern und Alternativen für frühzeitiger wegfallende Kohlekapazitäten im Markt und im System gibt es eine Reihe von technischen Lösungen und Konzepten, die in Teilbereichen die nötige Sicherheit stärken und wichtige Flankierungen bieten können. Dies trägt zu einem Umfeld bei, in dem auf die Kohlekraftwerke verzichtet werden kann. Gemeint sind etwa die Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts zur Aktivierung von Lastflexibilität in den Bereichen Industrie und Gewerbe, das sowohl die nötigen Rahmenbedingungen aber auch Ansätze zur Marktaktivierung umfasst (z. B. Informations- und Motivationskampagnen). Aber auch die Prüfung von Optionen und Maßnahmen im Bereich Netzstabilität, wie zum Beispiel die weitergehende Stärkung der Kooperation zwischen den Netzebenen für die Spannungshaltung sowie die weitere Entwicklung und Evaluierung netzbildender Umrichter für den Einsatz im Stromsystem.

Beschleunigte Transformation in Kohleregionen

Nicht zuletzt müssen für einen frühzeitigeren Kohleausstieg die im Rahmen der Kohlekommission angeregten und durch das KVBG und die zugehörigen Vereinbarungen mit den Kraftwerksbetreibern getroffenen Maßnahmen für einen nachhaltigen und sozialverträglichen Strukturwandel in den Kohlerevieren angepasst werden. Neben der gezielten Ansiedelung zukunftsfähiger Modelle industrieller Wertschöpfung und der Renaturierung der Kohleabbaugebieten betrifft dies insbesondere auch die Unterstützung für die vom Kohleausstieg bedrohten Beschäftigten. Zeichnet sich politisch getrieben oder durch die Marktentwicklungen induziert ein frühzeitigerer Kohleausstieg ab, so muss geprüft werden, inwieweit die bisher geplanten Maßnahmen und getroffenen Vereinbarungen entsprechend der neuen Situation ausreichend greifen oder justiert werden müssen. Es sollte geprüft werden, ob gegebenenfalls weitergehende Maßnahmen erforderlich sind, um den dann beschleunigten Strukturwandel für die betroffenen Regionen und die Beschäftigten wirksam abfedern zu können.

Enge politische Begleitung des Prozesses erforderlich

Wie dargelegt, ist ein gegenüber den bisherigen Ausstiegsplänen und auch den in der dena-Leitstudie untersuchten Pfaden frühzeitigerer Kohleausstieg möglich und auch wahrscheinlich. Unabhängig davon, ob ein früherer Kohleausstieg politisch oder durch die Marktentwicklungen getrieben ist, bedarf es im Weiteren einer sehr engen politischen Begleitung des Veränderungsprozesses unter Einbindung der verschiedenen betroffenen Stakeholder und mit einer frühzeitigen Adressierung und aktiven Nachverfolgung der hier dargelegten zentralen und flankierenden Handlungsfelder.

Systemsicherheit und Netzstabilität bei hohen Anteilen von EE im Stromsystem gewährleisten

Neben der Verfügbarkeit der Energieträger und der gesicherten Leistung sind die Leistungsfähigkeit der Infrastrukturen und der sichere Systembetrieb wichtige Elemente der Versorgungssicherheit. Hierzu sind ausreichende technische Fähigkeiten der Anlagen und ein ausreichendes Angebot an Erbringern für Systemdienstleistungen zu gewährleisten. Darüber hinaus erfordert die Systemstabilität langfristig eine vorausschauende Definition und Anreizung von neuen Vorleistungen für die Stabilität des Stromnetzes wie beispielsweise dynamische Blindleistung.

Zusätzliche Herausforderungen für die Systemsicherheit ergeben sich auch durch die geplante Höherauslastung bestehender und neuer Netzkapazitäten sowie durch die wegfallende Momentanreserve konventioneller Kraftwerke. Ersteres führt das System näher an seine Stabilitätsgrenzen, während Letzteres die Trägheit des Systems reduziert und damit die Widerstandsfähigkeit gegen Ungleichgewichte zwischen Last und Erzeugung verringert. Mit Blick auf die Höherauslastung des Stromnetzes ist zu prüfen, inwiefern neue Ansätze wie die kurative Netzbetriebsführung zusätzlich abgesichert werden müssen. Die heute durch die konventionellen Kraftwerke bereitgestellte Systemträgheit und weitere Beiträge zur Stärkung der Netzstabilität können perspektivisch auch durch sogenannte spannungsgeführte Umrichter bereitgestellt werden, sodass man Umrichter in HGÜ-Anlagen (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung), Batteriespeichern oder EE-Anlagen für die Erbringung nutzen könnte. Eine Formulierung von Systemanforderungen bezüglich der Momentanreserve befindet sich bereits in der Ausarbeitung durch ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) und sollte zügig in technische Anforderungen für Anlagen überführt werden.

Sicherheitskonzepte für die Energieinfrastrukturen mit Blick auf digitale Möglichkeiten und Herausforderungen der Cybersecurity weiterentwickeln

Ein weiterer Aspekt der Versorgungssicherheit betrifft die zunehmende Digitalisierung des Energiesektors. Sie ist zur Steuerung der Anlagen und zur Aktivierung von Flexibilitätspotenzialen notwendig, der sukzessiv weitreichendere Einsatz der Digitalisierung bedarf aber der Komplementierung durch neue Sicherheitskonzepte. Weltweit haben in der jüngeren Vergangenheit breit angelegte Cyberangriffe auf Energieversorger und andere

Branchen den Handlungsbedarf deutlich gemacht. Durch die zunehmende und notwendige Digitalisierung des Stromsystems entstehen wichtige Chancen und Potenziale in Bezug auf eine höhere Auslastung und höhere Effizienzen, aber auch neue Risiken, die die Systemsicherheit des Stromnetzes gefährden können. Das betrifft neben Cyberangriffen auch die möglichen Auswirkungen von Softwarefehlern oder Kompatibilitätsproblemen verschiedener verteilter Regelungsmechanismen. Dementsprechend ist eine Erweiterung des Monitorings der Systemsicherheit um Kennzahlen zu IT-Sicherheit und -Zuverlässigkeit zu prüfen, um eine entsprechende Resilienz des Stromsystems gegenüber solchen Gefährdungen sicherzustellen. Da die letztendliche Form und Ausprägung der Digitalisierung im Stromsystem heute nicht abzusehen ist und wegen der schnellen Innovationszyklen auch nicht abgesehen werden kann, gilt es, das Monitoring fortwährend zu aktualisieren.

Transformations- und Versorgungssicherheit für die neuen Energiemärkte gewährleisten

Im Zuge der Einführung von neuen Energieträgern wie klimaneutralem Wasserstoff und weiteren Powerfuels müssen diese zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit und zur Absicherung von Importrisiken in einer strategischen Reserve, nach dem Vorbild der Ölreserve, in ausreichender Menge vorgehalten werden. Dabei sollte Deutschland sein Vorgehen eng mit seinen europäischen Partnern abstimmen. Wie heute der Öl- und Gashandel, wird in Zukunft der Handel mit klimaneutralen Energieträgern durch gemeinsame strategische Reserven und Beistandsabkommen abgesichert werden müssen. Es ist deshalb anzustreben, die bestehende Energieunion in der EU auf die neuen Energieträger auszuweiten. Im Rahmen der Entwicklung der neuen Energiemärkte sollte die Bundesregierung unter Einbindung der Bundesnetzagentur daher Strategien für die Versorgungssicherheit entwickeln, die auch die besonderen Unsicherheiten in der Aufbauphase adressieren, um für die beteiligten Akteure ausreichende Sicherheit in der Transformation zu gewährleisten. Das Thema wird auch in Kapitel 5 „Internationale Einbettung“ behandelt.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode

Erneuerbare Energien



AUFGABE 59

Rechtsrahmen für erneuerbare Energien im Stromsektor weiterentwickeln

Die Bundesregierung sollte im Rahmen der Novellierung des EEG zügig Anpassungen des Fördermechanismus für erneuerbare Energien auf den Weg bringen. Wesentliche Elemente sind dabei die Anhebung der Ausbauziele, die Erhöhung gesetzlicher Ausbaupfade und die entsprechende Anpassung der Ausschreibungsvolumina (Beibehaltung der Ausschreibungsverfahren). Parallel dazu muss es zu einer Beschleunigung der Ausweisung zur Verfügung stehender Flächen kommen. Auch sollte eine Erleichterung des Genehmigungsrahmens für „Repowering“-Projekte sichergestellt werden.



AUFGABE 60

Private Investitionen in erneuerbare Energien stärken

Sowohl im Neuanlagenbereich als auch im Bereich des Weiterbetriebs von sogenannten Ü20-Anlagen (also EE-Stromerzeugungsanlagen nach Ablauf der zwanzigjährigen EEG-Einspeisevergütung) sollten die Rahmenbedingungen für Investitionen in Anlagen verbessert werden, die ihre Energieerzeugung über Stromlieferverträge (Power Purchase Agreements, PPA) direkt vermarkten. Ziel ist die Einführung einer weiteren stabilen Säule des förderfreien EE-Ausbaus neben dem EEG, um der Nachfrage der Wirtschaft nach grünem Strom zu entsprechen. Dies kann angebotsseitig zum Beispiel über die Erleichterung der Finanzierungsbedingungen für PPAs erfolgen.

Als nachfrageseitige Maßnahme sollten Unternehmen künftig auch für den Bezug von Grünstrom die Strompreiskompensation der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) in Anspruch nehmen können. Mit Blick auf die Schaffung sich selbst tragender Geschäftsmodelle sollten künftig im Grundsatz keine Anschlussförderungen für EEG-Altanlagen mehr geleistet werden. Investoren in PPA sollten Steuervergünstigungen erhalten. Zudem sollte geprüft werden, inwiefern Risiken über marktliche oder staatliche Mechanismen für die Vertragsparteien minimiert werden können.



AUFGABE 61

Mehr Flächen für erneuerbare Energien bereitstellen

In enger Kooperation mit den Landesregierungen sollte die Bundesregierung zur Verbesserung und Beschleunigung der Flächenbereitstellung für Flächen für Wind an Land und PV-Freiflächenanlagen sorgen. Dafür gilt es die vergütungsfähigen Flächenkategorien zu liberalisieren und die Entscheidungsbefugnisse für die Ausweisung von Flächen in den Händen der Gemeinden und Bundesländer zu stärken. Es ist darüber hinaus zu prüfen, inwieweit verbindliche Ziele für die Bereitstellung von Flächen für die erneuerbare Stromerzeugung auf Basis der Klimaziele bundesweit definiert und auf Länder- bis Kommunenebene heruntergebrochen werden können. Aktuell geltende Abstandsregelungen sollten mit Blick auf die erforderlichen Ausbauzahlen überprüft und reduziert werden.



AUFGABE 62

Genehmigungsverfahren für EE-Anlagen vereinfachen

Durch Vereinfachung und Vereinheitlichung der Schritte und Verfahren muss eine Verbesserung und Beschleunigung der Genehmigungsprozesse für Investitionsvorhaben in erneuerbare Energien erreicht werden. Dies kann beispielsweise durch die Vereinfachung und Bündelung der Genehmigungsverfahren bei einer einzigen Behörde mit ausreichender Personaldecke und Digitalisierung der Verwaltungsabläufe geschehen. Ergänzend sollte eine Unterstützung der ausführenden Behörde durch einen Expertenpool

(z. B. zu Naturschutzfragen) erfolgen. Zudem ist rechtlich zu prüfen, ob zur Beschleunigung der Verfahren die Genehmigung (z. B. für einen Windpark) durch die Genehmigungsbehörde als erteilt gelten kann, wenn sie den Antrag nach einer bestimmten Zeitspanne nicht final abgelehnt hat. Das Naturschutzrecht bzw. das Artenschutzrecht sollten so weiterentwickelt werden, dass die dortigen Rechtsvorschriften mit dem EE-Ausbau besser in Einklang gebracht werden können. Eine Neujustierung von Umwelt- und Klimaschutz durch länderübergreifend einheitliche Regelungen und differenzierte Anforderungen bei der naturschutzfachlichen Kompensation bei Projekten mit deutlichem Beitrag zum Klimaschutz kann ebenfalls zur verbesserten Bereitstellung von Flächen beitragen.



AUFGABE 64

Investitionsförderung für die ersten Elektrolyseurprojekte

Die Bundesregierung sollte den Nachteilen für die ersten entstehenden Projekte für Elektrolyseure (First Mover Disadvantage) für einen ausreichenden aber begrenzten Zeitraum eine für Projekte im industriellen Maßstab sowie für kleinskalige Projekte begegnen. Bestehende Förderansätze, wie das IPCEI Hydrogen, sind zu prüfen und gegebenenfalls zu erweitern. Dabei sind die Anforderungen an die öffentlichen Haushalte zu begrenzen.

Märkte für synthetische Energieträger



AUFGABE 63

Steuerung der Nachfrage nach Wasserstoff und klimaneutralen Energieträgern

Die Bundesregierung sollte über ein geeignetes und abgestimmtes Set an Instrumenten unter Berücksichtigung der perspektivischen Bedeutung des Energieträgers im jeweiligen Sektor eine ausreichende Gesamtnachfrage nach klimaneutralen Energieträgern stimulieren. Dazu gehören Leitmärkte für grüne Produkte (z. B. Grünstahlquote), der Einsatz von sektorspezifischen CO₂-Differenzverträgen (CCfD), sowie die Prüfung von Quotenmodellen für bestimmte Sektoren (Wärmesektor, Verkehrssektor). Die Zielgröße für die Gesamtnachfrage nach klimaneutralen Energieträgern sollte sich an der Nationalen Wasserstoffstrategie und perspektivisch an den Ergebnissen des Systementwicklungsplans orientieren.



AUFGABE 65

Forschung und Entwicklung für Wasserstoff und Powerfuels

Für eine schnelle technologische Entwicklung und schnelle Lernkurven sollten das Bundes- und die Landesforschungsprogramme weiter gezielt Forschung und Entwicklung nah an der industriellen Umsetzung fördern, um den Markthochlauf für Wasserstoff und Powerfuels eng zu flankieren. Dies betrifft die Weiterentwicklung der Elektrolyseverfahren und aller Infrastrukturkomponenten sowie der verwendeten Materialien, aber auch alternative Erzeugungspfade wie Methanpyrolyse sowie Technologien, die eine erfolgreiche Kopplung und Transformation der entstehenden Energiemärkte und Energieinfrastrukturen erlauben, zum Beispiel Beimischungs- und Entmischungsverfahren für Wasserstoff, Syntheserouten für höherwertige Kohlenwasserstoffe oder Ammoniakcracker.



AUFGABE 66

Gesetzliche Grundlagen für das Startnetz und den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur schaffen

Die Bundesregierung sollte die gesetzlichen Grundlagen für den Aufbau eines Wasserstoffstartnetzes schaffen. Dieses sollte prioritär durch die Umstellung bestehender Erdgasleitungen entstehen, nach Bedarf ergänzt durch einzelne neu gebaute Leitungen. Der Aufbau des Startnetzes ist mit den Planungen der EU und der Nachbarstaaten für eine europäische Wasserstoffinfrastruktur zu koordinieren.

Die Regulierung der neuen Wasserstoffinfrastruktur sollte langfristig entsprechend der gegenwärtigen Regulierung der Erdgasnetze ausgerichtet sein und eine perspektivische Zusammenführung sollte geprüft werden. Auf dem Weg dahin werden regulatorische und marktliche Ansätze benötigt.

Das H₂-Startnetz soll unter der Aufsicht der BNetzA für die angestrebte Umstellung von Gasleitungen durch die Ferngasnetzbetreiber umgesetzt und betrieben werden. Hierbei muss zu Beginn die Geschwindigkeit beim Aufbau im Vordergrund stehen. Dies erfordert auch einen nachhaltigen Finanzierungsrahmen.

In diesem Zuge sollte auch ein Konzept für einen fairen Umgang mit den Anschlussrisiken in der Aufbauphase des Startnetzes vorgesehen werden. Mit Umstellung und Stilllegungen verbundene rechtliche Fragen (z. B. die Versorgung von wenigen verbleibenden Abnehmern) sind komplex und sollten daher ebenfalls zeitnah adressiert und erörtert werden.

Im Rahmen unternehmerischer Initiativen sollten weiterhin Dritte die Möglichkeit erhalten, zur Kundenversorgung neue Wasserstoffleitungen aufzubauen. Es sollte darüber hinaus die Möglichkeit geprüft werden, dass über das Startnetz und Umstellungen hinausgehende Erweiterungsinvestitionen in das Ferngasnetz, z. B. für Randgebiete des Netzes nach dem Ermessen der BNetzA im Rahmen von Ausschreibungsverfahren an Dritte vergeben werden können. Dabei darf die gesamtsystemische Effizienz nicht aus den Augen verloren werden. In den Konzessionen muss die langfristige Integration in das Wasserstoffnetz festgeschrieben werden.



AUFGABE 67

Das Startnetz für die Wasserstoffinfrastruktur planen und festlegen

Die Bundesregierung sollte die Bundesnetzagentur beauftragen, aufbauend auf den vorliegenden Konzepten der Fernleitungsnetzbetreiber und in Koordination mit einer ersten vorgezogenen Durchführung des Systementwicklungsplans einen Planungsprozess für das Startnetz zeitnah durchzuführen und in politisch verbindliche Vorgaben zu überführen.

Energieinfrastruktur



AUFGABE 68

Beschleunigung der Planungs- und Genehmigungsverfahren für Infrastrukturen prüfen

Die Bundesregierung sollte in enger Abstimmung mit den Bundesländern prüfen, wie die Planungs- und Genehmigungsverfahren für Netzinfrastrukturen (aber auch für Erzeugungsanlagen, Großspeicher oder industrielle Anlagen) über die bereits in der Vergangenheit ergriffenen Maßnahmen hinaus noch einmal substanziell beschleunigt werden können, um eine ausreichende Synchronisierung des Netzausbaus mit den für die beschleunigte Energiewende nötigen Transformationspfaden im Energie- und in den Nachfragesektoren erreichen zu können. Dabei wird es erforderlich sein, die Beteiligungsmöglichkeiten zu fokussieren und auch grundsätzlichere Fragen wie eine Reduzierung der Einspruchsmöglichkeiten zu adressieren sowie den Klimaschutz gegenüber dem Arten- und Umweltschutz neu zu justieren. Auch die Kompetenzverteilung zwischen Bund und Ländern und die Bündelung bei einer zentralen Genehmigungsbehörde sollten in diesem Zuge geprüft werden.



AUFGABE 69

Die Stromnetze höher auslasten

Die Netzbetreiber sollten mit Unterstützung der BNetzA neben dem notwendigen Ausbau der Stromnetze weiterhin die Optionen zur besseren Nutzung der bestehenden Netzkapazitäten zügig vorantreiben: Dazu gehören, soweit noch nicht umgesetzt, u. a. die Lastflusssteuerung, der witterungsabhängige Freileitungsbetrieb und weitergehende kurative Netzbetriebsführungskonzepte.



AUFGABE 70

Auswirkungen des verzögerten Ausbaus der Stromübertragungsnetze berücksichtigen

Der verzögerte Netzausbau wird zumindest in der Übergangsphase Ende der 2020er und Anfang der 2030er Jahre zu deutlichen Netzengpässen und gegenüber heute umfangreicheren Redispatch-Maßnahmen und Abregelungen von EE-Anlagen führen.

Die Bundesregierung sollte bei der weiteren Ausrichtung des Klimaschutzplans die daraus entstehenden Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz im Energiesektor einkalkulieren und den entstehenden Bedarf an Redispatchvolumen für die weitere Entwicklung der steuerbaren Kraftwerksleistung berücksichtigen.



AUFGABE 71

Lastseitige Flexibilität im Stromsektor aktivieren

Zur Aktivierung der lastseitigen Flexibilität sollte die Bundesregierung ein Gesamtkonzept für die Aktivierung lastseitiger Flexibilitätspotenziale für Markt, Netze und das Gesamtsystem entwickeln. Hierbei sollten die vorliegenden Ergebnisse wissenschaftlicher Studien und die Erkenntnisse aus Projekten (z. B. Sinteg und Kopernikus) berücksichtigt werden.

Unter anderem müssen mit Blick auf den Netzausbaubedarf in den Verteilnetzen die Flexibilitätspotenziale neuer steuerbarer Lasten der Sektorenkopplung wie Elektromobilität, Wärmepumpen, Speicher und Elektrolyseure schnellstmöglich nutzbar gemacht werden. Hierzu zählt die überfällige Umsetzung des § 14a EnWG, der durch weitere Instrumente zur Beschaffung von Flexibilität für systemische Zwecke in Abhängigkeit von der Netzanschlussebene ergänzt werden sollte.

Um die Digitalisierung der Stromnetze voranzubringen, sollte die Anreizregulierung dahingehend verändert werden, dass Smart-Grid-Komponenten in der Kostenanerkennung stärker berücksichtigt werden können.

Versorgungssicherheit



AUFGABE 72

Umfassendes Konzept für ausreichend gesicherte Leistung im Stromsektor

Aufgrund des zukünftigen Bedarfs an klimaneutraler, gesicherter Leistung und der hierfür erforderlichen Neuinvestitionen bedarf es einer Überprüfung der Instrumente zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Denn die bestehenden Reservemechanismen können in ihrer gewachsenen Struktur und mit Blick auf die dynamischen Veränderungen durch die Energiewende die Versorgungssicherheit absehbar weder effektiv noch effizient gewährleisten.

Die Bundesregierung sollte daher für die rechtzeitige und ausreichende Sicherstellung gesicherter Leistung prüfen, die bestehenden Reservemechanismen durch ein neues umfassendes Konzept für eine Systemreserve zu ersetzen und zusätzlich durch einen weitreichenderen Kapazitätsmarkt für gesicherte Leistung im Strommarkt zu ergänzen.

Dabei ist mit Blick auf die folgenden Anforderungen zu prüfen, welche Ausgestaltung von Kapazitätsmechanismen kurz- und mittelfristig geeignet ist und ausreichend schnell umgesetzt werden kann:

- Wegen des engen Zeitrahmens bis 2030 gilt es mit Hilfe eines politischen Signals für ein antizipiertes Zielvolumen dem Markt eine bessere Planungssicherheit zu ermöglichen, um genügend Projektvorbereitungen in Gang zu setzen.
- Es muss eine ausreichende Steuerung der räumlichen Allokation der technischen Kapazitäten (ggf. auch über eine marktliche Ausschreibung von Systemdienstleistungen) möglich sein, um die absehbaren Erfordernisse des Redispatch und weitere Netzanforderungen zu adressieren.
- Das politische Zielvolumen an Gesamtkapazität als Orientierungsgröße für den Markt könnte transparent im Zuge des Systementwicklungsplans ermittelt und perspektivisch fortgeschrieben werden.
- Die angereizten Investitionen müssen geeignet sein, um zukünftig die Klimaneutralität der Stromerzeugung insgesamt zu erreichen. Daher sollen neue Gaskraftwerke auf einen Betrieb mit Wasserstoff umgestellt werden können. Der tatsächliche Übergang auf einen Wasserstoffbetrieb muss geeignet mit Blick auf die Verfügbarkeit einer Netzinfrastruktur, ausreichender Mengen von Wasserstoff sowie der Preisentwicklung im Verhältnis zu Erdgas und dem CO₂-Preis koordiniert werden.
- Neben Erzeugungsanlagen sind auch Speicher und Einsenkungspotenziale der Lasten zur Bereitstellung der gesicherten Leistung einzubeziehen.
- Unabhängig von der grundsätzlichen Ausprägung sollte das Konzept möglichst kosteneffizient ausgestaltet werden durch marktliche Elemente (Ausschreibungen) und – für die Kapazitäten, für die eine Teilnahme am Strommarkt möglich ist – eine komplementäre Ergänzung zu den Verdienstmöglichkeiten dort.

Auf EU-Ebene sollte zudem die grenzüberschreitende Versorgungssicherheit weiter gestärkt werden. Hierzu ist die länderübergreifende Bewertung und Bereitstellung gesicherter Leistung, wie bereits mit dem Prozess ERAA (European Resource Adequacy Assessment) angestoßen, kontinuierlich weiterzuentwickeln. Im Rahmen von ENTSO E sollten Regeln für supranationale Beistandsmaßnahmen bei Versorgungsengpässen entwickelt werden.



AUFGABE 73

Gesamtstrategie Systemsicherheit und Netzstabilität umsetzen

Die Transformation im Energiesektor bringt z. B. durch den zunehmenden Einsatz von Leistungselektronik und die Digitalisierung sukzessive neue Fragen und Herausforderungen bei der Systemsicherheit²³ mit sich. Um diesen Herausforderungen begegnen zu können, sollte die Bundesregierung die im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 bereits vorgesehene „Gesamtstrategie Systemsicherheit und Netzstabilität, Digitalisierung und IT-Sicherheit der netzgebundenen Stromversorgung“ schnellstmöglich erstellen und Vorschläge für Regulierungsvorgaben ableiten.

Für eine vorausschauende Identifizierung und Adressierung kommender Herausforderungen ist ein kontinuierliches Monitoring der verschiedenen Aspekte der Systemsicherheit zu etablieren, durch das neben dem definierten Fokus (z. B. Momentanreserve) auch neue Herausforderungen in einem digitalisierten Energiesystem identifiziert. Nur so können mit ausreichend Vorlaufzeit geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

²³ Unter der Systemsicherheit versteht man den sicheren und zuverlässigen Betrieb des Systems im Rahmen der zulässigen Grenzwerte für Spannung und Frequenz.



AUFGABE 74

Ein Konzept für die Transformations- und Versorgungssicherheit der neuen Energiemärkte erstellen

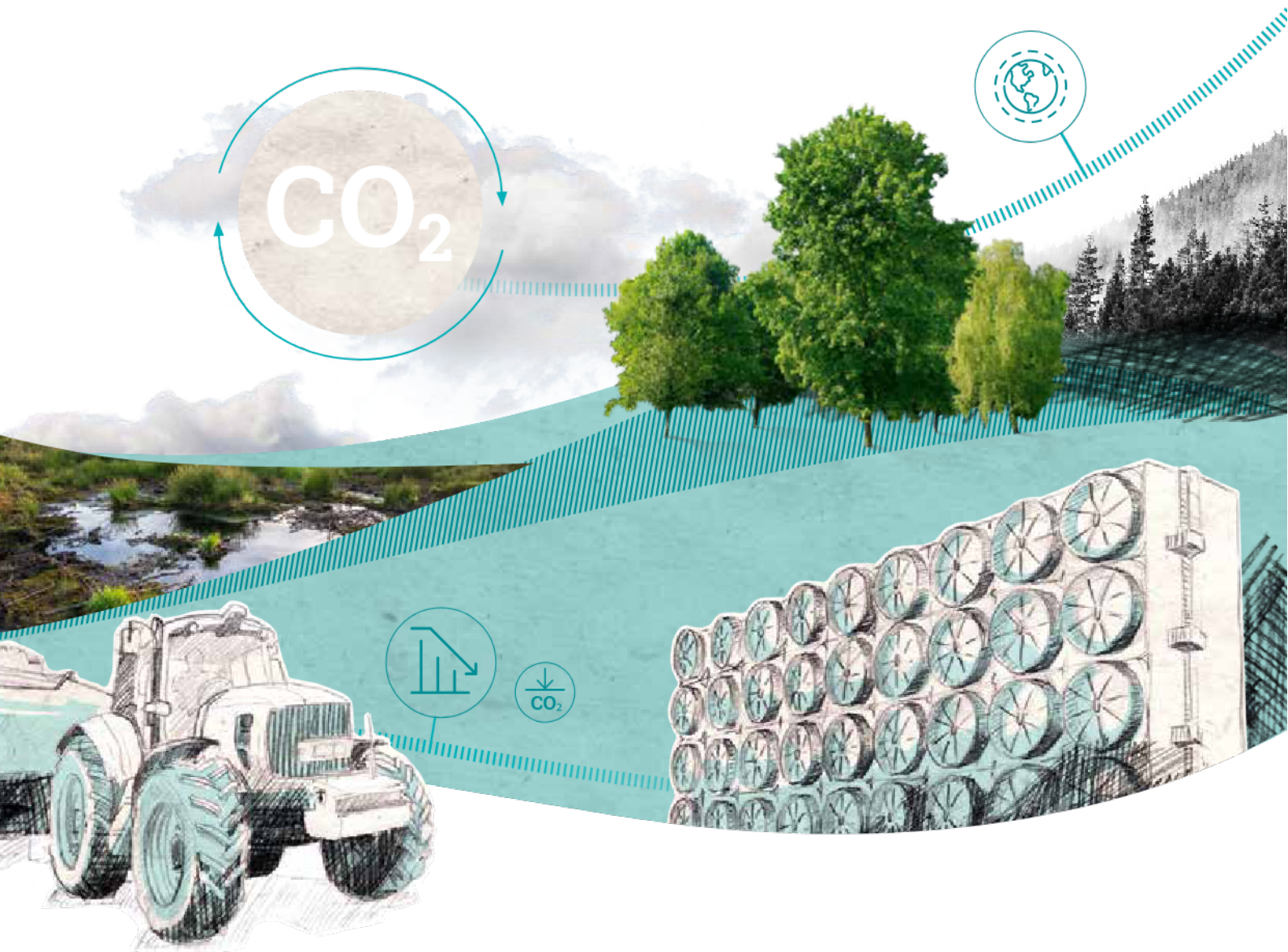
Im Rahmen der Entwicklung der neuen Energiemärkte für klimaneutralen Wasserstoff und weitere gasförmige und flüssige Energieträger und Grundstoffe sollte die Bundesregierung unter Einbindung der Bundesnetzagentur und der beteiligten Stakeholder sowie in Koordination mit den europäischen Nachbarn daher geeignete Strategien für die dauerhafte Versorgungssicherheit entwickeln, aber auch Konzepte, um die besonderen Unsicherheiten in der Aufbauphase zu adressieren und für die beteiligten Akteure ausreichende Sicherheit in der Transformation zu gewährleisten.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- ▶ **Einführung einer integrierten kommunalen Energieleitplanung voranbringen**
(Kapitel 2 „Marktdesign“)
- ▶ **Einen Systementwicklungsplan für eine integrierte Infrastrukturplanung gesetzlich einführen**
(Kapitel 2 „Marktdesign“)
- ▶ **Eine Integrierte Finanzierungsplanung für die Energiewende entwickeln**
(Kapitel 2 „Marktdesign“)
- ▶ **Regulierung von Energieinfrastrukturen mit dem Ziel einer sektorübergreifenden Optimierung weiterentwickeln** (Kapitel 2 „Marktdesign“)

10 Natürliche Ökosysteme und technische Senken

Welche Bedeutung haben natürliche Ökosysteme und technische Senken zur Erreichung der Netto-Null?



Neben THG-Minderungen der Verbrauchssektoren sind für Klimaneutralität Maßnahmen in Landwirtschaft und LULUCF sowie der Aufbau technischer Senken notwendig

Das Klimaschutzgesetz 2021 sieht für Deutschland die Erreichung der Treibhausgasneutralität 2045 sowie eine netto-negative Bilanz nach 2045 vor. Dafür müssen sich 2045 die THG-Senken mit den verbleibenden Emissionen die Waage halten, und diese nach 2045 sogar übertreffen.

Drei verschiedene Elemente sind für diesen Pfad neben den Residualemissionen in den vier vorausgehend betrachteten Sektoren besonders zentral:

1. Die **Transformation in der Landwirtschaft**, die sowohl maßgebliche Residualemissionen aufweisen wird als auch die Flächenverfügbarkeit für Senken bestimmt
2. **Natürliche Senken**, das heißt Negativemissionen aus natürlichen Ökosystemen innerhalb des Sektors Landnutzung, Landnutzungsveränderung und Forstwirtschaft (Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF)
3. **Technische Senken**, das heißt technische Abscheidung von CO₂ aus Punktquellen oder der Atmosphäre

Da die Landwirtschaft eng mit dem LULUCF-Sektor verwoben ist und auf EU-Ebene ab 2030 mit diesem gemeinsam bilanziert werden soll, werden in diesem Kapitel sowohl Landwirtschaft als auch LULUCF dargestellt. Der Landwirtschaftssektor wird in der dena-Leitstudie jedoch nicht explizit modelliert.

Der LULUCF-Sektor kann als THG-Quelle oder Senke wirken

Mehr als die Hälfte aller globalen anthropogenen Emissionen werden von terrestrischen und marinen Ökosystemen als **natürliche Senken** aufgenommen.¹ Als natürliche Kohlenstoffsinken werden Reservoirs bezeichnet, die über einen Zeitraum hinweg Kohlenstoff aus der Atmosphäre ziehen (z. B. über Photosynthese) und dann in chemischen Verbindungen speichern. Zu den natürlichen Kohlenstoffsinken gehören Ökosysteme wie Wälder, Feuchtgebiete und Grünland, darüber hinaus auch marine Seegraswiesen und Salzmarschen. Zusätzlich kann in Kohlenstoffspeichern wie Holzprodukten die Senkenwirkung für einen gewissen Zeitraum verlängert werden.²

Im Jahr 2018 stellten die natürlichen Ökosysteme in Deutschland eine Netto-Senke von rund 18 Millionen Tonnen CO₂ dar. Der Sektor leistet damit einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz.

In Wäldern wurden dabei große Mengen Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre gebunden (THG-Wirkung 58 Millionen Tonnen CO₂) und zusätzlich in langlebigen Holzprodukten (-6 Mio. t CO₂) eingespeichert. Dabei spielen für die CO₂-Speicherung im Wald sowohl die ober- und unterirdische Biomasse als auch der Waldboden eine wichtige Rolle. Dagegen entstanden Emissionen auf Ackerland (THG-Emissionen +17 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent), Grünland (+18 Mio. t CO₂ä), Siedlungen (+5 Mio. t CO₂ä) und Feuchtgebieten (+5 Mio. t CO₂ä).^{3,4}

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021.

² Öko-Institut-Kurzgutachten, 2021.

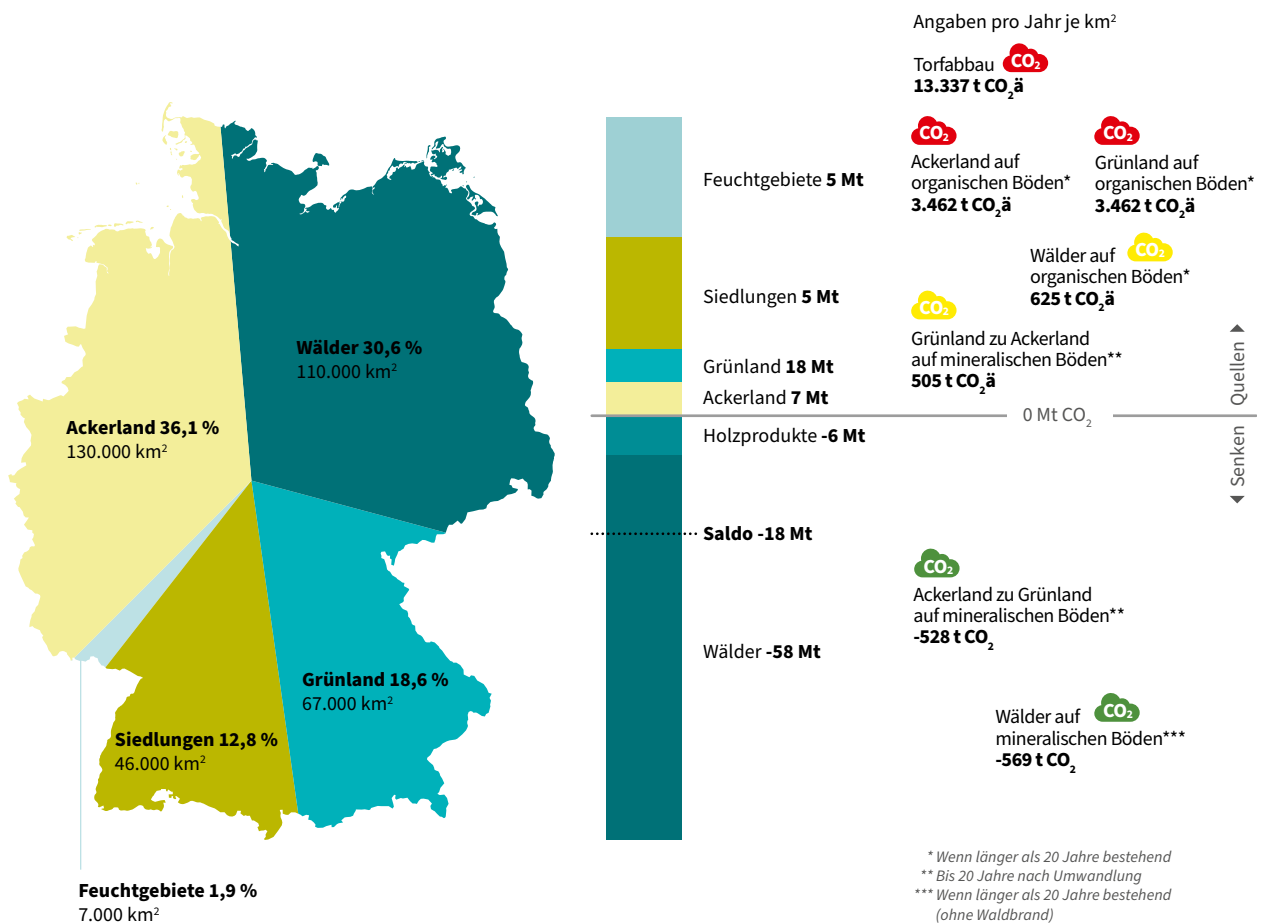
³ Umweltbundesamt (UBA), 2021c.

⁴ Im Rahmen der THG-Berichterstattung erfolgen regelmäßig methodische Verbesserungen, die zu Unterschieden in den Ergebnissen führen. Der ausstehende Projektionsbericht der Bundesregierung bezieht sich auf die THG-Berichterstattung aus dem Jahr 2020. Um im LULUCF-Sektor mit dieser wichtigen Referenz vergleichbar zu sein, wurde die LULUCF-Modellierung auf Basis der THG-Berichterstattung aus dem Jahr 2020 berechnet. Die hier genannten Zahlen beziehen sich dagegen in Übereinstimmung mit der Zahlenbasis in den Sektoren auf die aktuellste THG-Berichterstattung aus 2021.

Diese Emissionen und Senken werden unter „**Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft**“ (**Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF**) zusammengefasst bilanziert. Unter den Sektor LULUCF fallen die Flächen der Landnutzungskategorien Wälder (11 Mio. Hektar) inklusive dem Kohlenstoffspeicher der Holzprodukte sowie Ackerland (13 Mio. ha), Grünland (6,7 Mio. ha), Feuchtgebiete

(0,7 Mio. ha) und Siedlungen (4,6 Mio. ha).⁵ Abbildung 10.1 zeigt neben diesen Landnutzungskategorien, ihren Emissionen und Senkenwirkungen auch beispielhaft die relative Wirkung bestimmter Landnutzungsformen bezogen auf die Fläche. Dabei wird etwa die hervorgehobene Rolle von organischen Böden im Sektor LULUCF deutlich.

Abb. 10.1 Landnutzungskategorien in Deutschland und ihre absoluten CO₂-Emissionen sowie relative CO₂-Emissionen bestimmter Landnutzungsformen im Jahr 2018



Quelle: Umweltbundesamt (UBA), 2021c; Öko-Institut-Kurzgutachten, 2021.

⁵ Umweltbundesamt (UBA), 2021c.

Landwirtschaft in Schlüsselrolle für Netto-Null

Die deutsche Landwirtschaft beschäftigt ca. 608.000 Menschen, sichert damit die Ernährung der Bevölkerung und erwirtschaftet dadurch Güter im Wert von rund 58 Milliarden Euro. Knapp die Hälfte der Fläche Deutschlands befindet sich in landwirtschaftlicher Nutzung. Von dieser Fläche wiederum wird mehr als die Hälfte zu Futterzwecken für die mehr als 200 Millionen Nutztiere verwendet.^{6,7} Etwa ein Drittel der Gesamtproduktion der deutschen Landwirtschaft wird exportiert. Damit ist Deutschland der drittgrößte Exporteur sowie gleichzeitig auch der weltweit drittgrößte Importeur von Agrarprodukten.⁸

2019 wurden auf ca. 14 Prozent der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche (2,3 Mio. ha) Energiepflanzen angebaut. Oftmals entscheidet sich marktbedingt erst nach dem Erntezeitpunkt, ob die angebauten Agrarprodukte für energetische Zwecke verwendet werden. Die deutsche Landwirtschaft trägt damit auch zur Bereitstellung von erneuerbaren Energien bei. Neben nachwachsenden Rohstoffen werden vor allem Abfall- und Reststoffe zur Bioenergieerzeugung genutzt. Im Jahr 2020 konnte der Endenergieverbrauch in Deutschland daher zu 10 Prozent (243 TWh) durch Bioenergie gedeckt werden, wodurch gegenüber der Verwendung fossiler Energieträger Emissionen in Höhe von etwa 70 Millionen Tonnen CO₂ vermieden werden konnten. Besonders in den Sektoren Strom und Wärme spielt die Bioenergie unter den erneuerbaren Energiequellen eine wichtige Rolle und trägt damit maßgeblich zur Erreichung der Klimaziele bei.⁹

Eine **Schlüsselrolle bei der Transformation zur Klimaneutralität** nimmt der Landwirtschaftssektor jedoch auch als großer Treibhausgas-Emittent ein. Im Jahr 2020 lagen die Emissionen aus dem Landwirtschaftssektor bei 60,4 Millionen Tonnen CO₂ä (entspricht 8,2 Prozent der gesamten THG-Emissionen in Deutschland). Die Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft bestehen vor allem aus Methanemissionen aus der Tierhaltung und Gärprozessen (50,1 Prozent) sowie Lachgasemissionen aus dem Abbau von Stickstoffdüngern (45,6 Prozent).¹⁰

Zwischen dem Bereich LULUCF und der Landwirtschaft bestehen enge Wechselwirkungen. Die Entwässerung von kohlenstoffreichen organischen Böden erfolgt primär für die landwirtschaftliche Nutzung und den Siedlungsbau. Die von der Landwirtschaft in Anspruch genommenen Flächen sind grundsätzlich nicht nutzbar für die Wiederaufforstung.¹¹ Es ist daher naheliegend, dass nach den Plänen der EU-Kommission ab 2030 die Bilanzierung des LULUCF-Sektors auf EU-Ebene

in die des Agrarsektors integriert wird. Der neue „Landsektor“

Landwirtschaft und LULUCF werden in der EU zukünftig voraussichtlich gemeinsam bilanziert als „Landsektor“ (Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU).

muss demnach EU-weit ab 2035 eine THG-neutrale Bilanz aufweisen. Auch beim Weltklimarat (IPCC) und in der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) werden diese beiden Bereiche unter dem Kürzel AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use) zusammengefasst.

AFOLU wiederum hat u. a. durch die Bereitstellung von Bioenergie enge Wechselwirkungen mit den anderen Sektoren (siehe unten).

Technische Senken ergänzen Maßnahmen von Landwirtschaft und LULUCF

Für AFOLU bestehen heute bereits politische Zielsetzungen. Bis zum Jahr 2030 sollen die Emissionen des Landwirtschaftssektors nach dem Entwurf des novellierten Klimaschutzgesetzes auf 56 Millionen Tonnen CO₂ä sinken. Maßnahmen zur Reduktion der THG-Emissionen umfassen nach dem Klimaschutzprogramm 2030 u. a. Änderungen in der Düngegesetzgebung zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz und der Reduktion der Lachgasemissionen, den Ausbau des Ökolandbaus und die Erhöhung der Energieeffizienz. Für 2045 muss der Landwirtschaftssektor dazu beitragen, dass verbleibende Emissionen so niedrig sind, dass sie durch Negativemissionen ausgeglichen werden können. Die Landwirtschaft der Zukunft wird weniger Emissionen durch Viehhaltung verursachen, da sich Ernährungsgewohnheiten hin zu einem stärker vegetarischen Konsum verschieben.

Erstmals bestehen im aktuellen KSG auch konkrete THG-Ziele für LULUCF. Der Sektor soll laut Gesetzgebung im Jahr 2045 Negativemissionen in Höhe von 40 Millionen Tonnen CO₂ä als Senke erbringen und damit einen wesentlichen Beitrag zur deutschen THG-Neutralität leisten.

Die Transformation der Landwirtschaft und der Erhalt und Aufbau natürlicher Kohlenstoffsenken werden jedoch für ein robustes klimaneutrales System nicht ausreichen. Daher müssen Optionen zur CO₂-Abscheidung und technische Senken ebenfalls Bestandteil des „Zielbilds“ sein, wofür aber noch keine Verankerung in klimapolitischen Zielen und Maßnahmen besteht.

⁶ Industrieverband Agrar, 2021.

⁷ Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2018.

⁸ Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2018.

⁹ Umweltbundesamt (UBA), 2021d.

¹⁰ Umweltbundesamt (UBA), 2021b.

¹¹ Bei innovativen Ansätzen der Agroforstwirtschaft werden Ackerbau oder Tierhaltung und Forstwirtschaft teilweise kombiniert.

Carbon-Capture-Technologien dienen dazu, CO₂ aus Luftströmen abzuscheiden. Der so aufgefangene Kohlenstoff kann entweder weiterverwendet (Carbon Capture and Utilization, CCU) oder geologisch gespeichert werden (Carbon Capture and Sequestration, CCS). Gemeinsam werden diese Technologien als CCU/S bezeichnet. Dabei kann CO₂ entweder an Punktquellen (also aus den stark CO₂-haltigen Abgasströmen von z. B. Industrieanlagen oder Müllverbrennungsanlagen) oder direkt aus der Atmosphäre (Direct Air Capture, DAC) abgeschieden werden.

Möglichkeiten für CCU/S nehmen in der dena-Leitstudie eine zunehmend wichtige Rolle ein. Das spätestens 2045 treibhausgasneutrale Deutschland ist darauf angewiesen, eine gewisse Menge unvermeidbarer Emissionen auch auf technische Art abzuscheiden und zusätzlich Negativemissionen zu erzielen. Eine Möglichkeit zur Erzielung von Negativemissionen ist CCS aus Biomasse (Bioenergy Carbon Capture and Storage, BECCS).

Durch Photosynthese wird CO₂ aus der Atmosphäre entnommen und durch Pflanzenwachstum in Biomasse gespeichert. Bei der energetischen Nutzung von Biomasse durch Verbrennung wird das entstehende CO₂ abgeschieden und dauerhaft sequestriert.

Die **Bedeutung technischer Maßnahmen zur CO₂-Entnahme in Ergänzung zu den Maßnahmen im Bereich AFOLU** wird erstens durch die Anfälligkeit natürlicher Systeme (z. B. Wälder) für die Auswirkungen des Klimawandels und daher die Unsicherheit über ihren tatsächlichen Beitrag unterstrichen. Zweitens werden aus heutiger Sicht auch im Jahr 2045 noch sehr schwer oder nicht vermeidbare Restemissionen bestehen. Und drittens besteht die Notwendigkeit, auch über 2045 hinaus zu denken und für einen deutlichen Beitrag zum Pariser Klimaabkommen auch stärker netto-negative Emissionen zu erzielen. Bereits im Klimaschutzgesetz ist die Notwendigkeit von Negativemissionen nach 2045 verankert.

Die Aufgabe: Residualemissionen verringern und die Kapazitäten zur Erzielung von Negativemissionen aufbauen

Zur Erreichung der Netto-Null 2045 müssen natürliche und technische Senken Negativemissionen in Höhe von jährlich mindestens 70 Millionen Tonnen CO₂ erbringen

Sowohl im Industrie- als auch im Landwirtschaftssektor wird es zukünftig noch schwer oder nicht vermeidbare Emissionen geben. Durch konkrete Maßnahmen im LULUCF-Sektor muss daher gemeinsam mit technischen Senken sichergestellt werden, dass THG-Neutralität erreicht wird.

In der Industrie verbleiben ohne den Einsatz von CCU/S im Jahr 2045 rund 38 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent, davon rund 26 Millionen Tonnen äußerst schwer vermeidbare Prozessemissionen, insbesondere aus der Zement- und der Chemieindustrie. Diese Emissionen lassen sich teilweise durch CCU/S abscheiden. Gemäß dem Szenario KN100 wird die technische CO₂-Abscheidung in der Industrie bereits 2030 einen Beitrag

zur Erreichung der THG-Minderungsziele leisten (3 Mio. t CO₂), bis 2045 werden in der Industrie und der Energiewirtschaft schon 34 Millionen Tonnen CO₂/a abgeschieden (24 Mio. t CO₂ in geologische Speicherung und 10 Mio. t CO₂ in Nutzung).

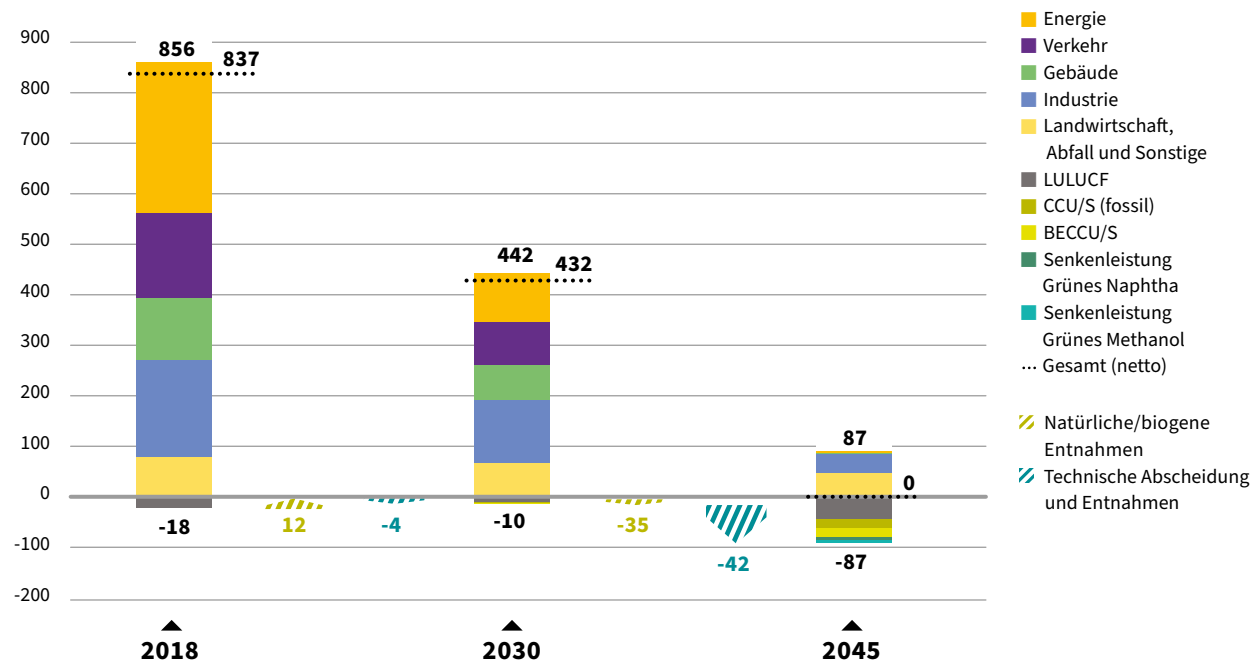
Die Landwirtschaft wird im Rahmen der dena-Leitstudie nicht modelliert. Ein modellexogener Pfad in Anlehnung an das Szenario „Klimaneutrales Deutschland“ von Prognos et al.¹² resultiert in Restemissionen von rund 41 Millionen Tonnen CO₂ä und liegt damit nah an den neuen KSG-Zielen. Eine weitere Minderung dieser hauptsächlich aus der Tierhaltung und Düngung resultierenden Emissionen ist vor allem durch eine Reduktion der Fleischproduktion möglich.

Sowohl die Transformation in der Industrie als auch die Ziele für den Landwirtschaftssektor sind äußerst ambitioniert und nur durch eine große Kraftanstrengung erreichbar. Jedoch verbleiben trotz des Einsatzes von CCU/S noch bis zu 70 Millionen Tonnen CO₂ä kaum vermeidbarer Emissionen. In allen im Rahmen der dena-Leitstudie vorgenommenen Modellierungen sind zur Erreichung der Netto-Null dabei Negativemissionen aus LULUCF und weitere technischen Senken notwendig.

¹² Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, 2020.

Abb. 10.2 THG-Emissionen und Senken bis 2045

Angaben in Mt CO₂ä



Prozessemissionen sowie energetische Emissionen (ohne CCU/S und Negativemissionen; in Industrie Prozess und energetische Emissionen) Mt CO ₂ ä	2018	2030	2045
Energie	308	104	4
Verkehr	164	85	0
Gebäude	122	67	2
Industrie	190	123	38
Landwirtschaft, Abfall und Sonstige	73	63	42
Gesamt (brutto)	856	442	87
LULUCF	-18	-6	-41
Technische Senken (CCU/S + NETS)			
CCU/S (fossil)	0	-2	-17
BECCU/S	0	-1	-17
Senkenleistung Grünes Naptha (inkl. 25% Abschlag)	0	0	-7
Senkenleistung Grünes Methanol (inkl. 25% Abschlag)	0	-1	-5
Summe Technische Senken (CCU/S + NETS)	0	-4	-46
Gesamt (netto)	837	432	0

Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021; Umweltbundesamt (UBA), 2020c; Öko-Institut-Kurzgutachten, 2021.

In der Modellierung stellen sich die THG-Entwicklung des Szenarios KN100 und der Hochlauf der Senkenleistung von 2020 bis 2045 folgendermaßen dar:

Die Emissionen im Jahr 2018 werden durch Senken im LULUCF-Sektor um 18 Millionen Tonnen CO₂ä gemildert. Neben der Transformation in den übrigen Sektoren beginnt bis 2030 auch der Einsatz technischer Senken. Die Gesamtmenge von technischen und natürlichen Senken reduziert sich allerdings durch einen sinkenden Beitrag des LULUCF-Sektors.

Die im Jahr 2045 verbleibenden schwer vermeidbaren Emissionen aus den einzelnen Sektoren und der Landwirtschaft in Höhe von 87 Millionen Tonnen CO₂ä werden zunehmend durch CCU/S in der Industrie und Energiewirtschaft vermindert. Die dann noch verbleibenden Restemissionen in Höhe von 70 Millionen Tonnen CO₂ä müssen durch Negativemissionen natürlicher und technischer Art ausgeglichen werden.

LULUCF kann in 2045 Negativemissionen von rund 41 Millionen Tonnen CO₂ beitragen. Weitere Senkenleistungen in Höhe von 17 Millionen Tonnen CO₂ werden über BECCU/S und 12 Millionen Tonnen CO₂ durch die Verwendung von grünem Naphtha und grünem Methanol erreicht (siehe 10.3).

Nach 2045 werden Netto-Negativemissionen erzielt durch eine weitere Reduktion der Residualemissionen und einen Aufbau der Senken sowohl technischer als auch natürlicher Art. Von 2045 bis 2050 tragen besonders zusätzliche Effizienzgewinne und die Substitution verbleibender fossiler Energieträger in der Chemieindustrie dazu bei, dass die neutrale zu einer negativen Bilanz wird.

Erreicht wird das sektorspezifische Ziel für LULUCF in der Modellierung durch eine starke Reduktion der Quellen im LULUCF-Sektor auf der einen Seite und die Erhöhung der Senken auf der anderen Seite. Auf der emissionsreduzierenden Seite wurden insbesondere Potenziale landwirtschaftlich genutzter Flächen auf organischen Böden genutzt. Außerdem wird die Neuinanspruchnahme für Siedlungen reduziert und der Torfabbau eingestellt. Die Senkenleistung wird u. a. durch eine extensivierte Waldbewirtschaftung erhöht. Zusätzliche Senken werden durch Aufforstung geschaffen. Darüber hinaus werden durch Kurzumtriebsplantagen (KUP), welche die Holzentnahme aus dem Wald entlasten, weitere Senkenleistungen generiert.

EIN BREITES SPEKTRUM AN MÖGLICHKEITEN FÜR NEGATIVEMISSIONEN



Neben den für die dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität verwendeten Technologien und Praktiken der CO₂-Entnahme stehen auch weitere Möglichkeiten zur Verfügung, deren Potenziale für Klimaneutralität benötigt werden könnten. Diese sind die beschleunigte Verwitterung (enhanced weathering), Anreicherung von Kohlenstoff der Böden, die Verwendung von Pflanzenkohle (Herstellung durch Pyrolyse, biochar, PyCCS) oder auch die Kohlenstoffbindung in Ozean- und Küstenökosystemen (blue carbon). In all diesen und einigen weiteren Feldern besteht hoher Forschungsbedarf. Keine Option für Negativemissionen sollte frühzeitig ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Modellierung wurden diese jedoch nicht bzw. nur implizit (Anreicherung von Kohlenstoff in der Modellierung des LULUCF-Sektors) berücksichtigt. Für eine Darstellung der Optionen sowie ihrer Potenziale und Auswirkungen bietet sich ein Blick in spezialisierte Publikationen an.¹³

Starke Wechselwirkungen zwischen den Handlungsfeld-clustern sowie mit anderen Sektoren

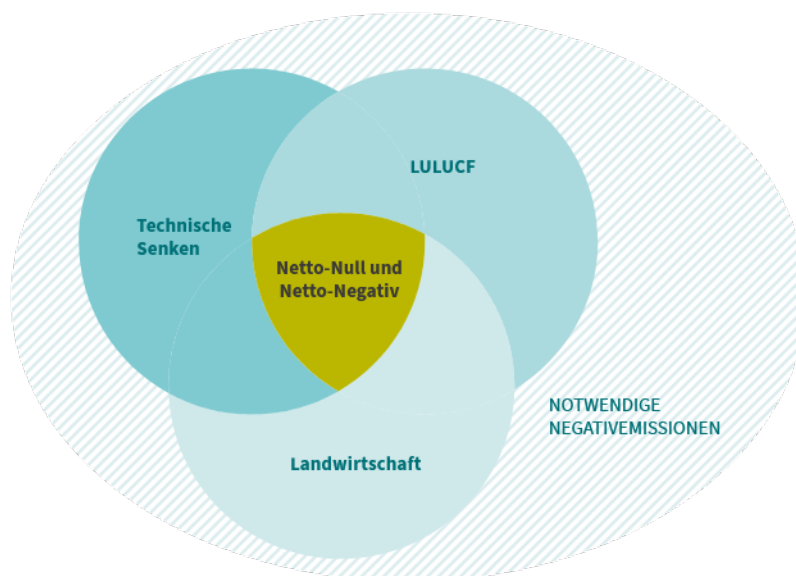
Wie oben bereits skizziert, hängen die drei Handlungsfelder Landwirtschaft, natürliche Senken (LULUCF) und technische Senken eng zusammen. Dabei sind die Maßnahmen in einem Handlungsfeld (z. B. die Erhöhung der natürlichen Senken durch Wiederaufforstung) abhängig von Veränderungen in einem anderen Handlungsfeld (z. B. der Verringerung der Viehbestände und dadurch frei werdende Flächen der Futtermittelproduktion für die Wiederaufforstung). Zudem hat jede Anpassung in einem Handlungsfeld gleichzeitig Auswirkungen auf das andere Handlungsfeld (z. B. durch weniger Holzentnahme aus Wäldern für eine hohe natürliche Senkenleistung sinkt verfügbare Biomasse für negative Emissionen durch BECCS). Die Verfügbarkeit energietisch genutzter Biomasse wiederum hat auch Auswirkungen auf die Transformation in den weiteren Sektoren.

Darüber hinaus sind diese Handlungsfelder eingebettet in die von außen beeinflusste Notwendigkeit für Negativemissionen. Diese werden maßgeblich davon beeinflusst, wie viel Senkenleistung zur Erreichung der Netto-Null benötigt wird (also die Höhe der Residualemissionen der Verbrauchssektoren). Zudem unterwirft die zu deckende Nachfrage an Biomasse als Energieträger und Rohstoff den Gestaltungsmöglichkeiten in den Bereichen LULUCF, Landwirtschaft und technische Senken gewissen Restriktionen.

Die Notwendigkeit von Negativemissionen kann sich zur Erfüllung internationaler Verpflichtungen und zur weiteren Beschleunigung der Transformation zusätzlich erhöhen. In den 1,5-°C-Szenarien des IPCC müssen im Laufe des 21. Jahrhunderts weltweit im Durchschnitt 730 Milliarden Tonnen CO₂ aktiv aus der Atmosphäre entnommen werden.¹⁴ Beginnt die Staatengemeinschaft erst 2050 mit der CO₂-Entnahme, entspräche das rund 15 Milliarden Tonnen CO₂ jährlicher Negativemissionen bzw. fast die Hälfte des aktuellen CO₂-Ausstoßes. Negativemissionen werden beispielsweise zur Umkehr eines „Overshoot“ von Emissionen benötigt, wie der IPCC in seinen Szenarien zeigt.

¹³ Mix et al., 2018.

¹⁴ Bellamy & Geden, 2019.



10.1 Minderung der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft

Der Anteil des Landwirtschaftssektors (und damit auch der Methanemissionen) an den Gesamtemissionen wird über die Zeit ansteigen, da die Emissionen in diesem Sektor im Wesentlichen aus Tierhaltung und Düngung resultieren und daher nur teilweise durch technische Maßnahmen minderbar sind. Veränderungen des Konsumverhaltens sind nur allmählich zu bewirken.

Zu den **technischen Minderungsmaßnahmen** zählt beispielsweise, die Vergärung von Wirtschaftsdüngern wie Gülle oder Mist zu erhöhen und die Lagerung durch bauliche Maßnahmen zur Reduzierung gasförmiger Stickstoffverluste zu verbessern, vermehrt emissionsarme Ausbringungstechnologien einzusetzen (Zeitpunkt und Technik) sowie die Effizienz der Stickstoffnutzung zu erhöhen.

Auf der Seite der **landwirtschaftlichen Produktion** werden in der dena-Leitstudie Treibhausgasminderungen u. a. durch den Umbau und die Reduktion der Tierbestände (angenommener Rückgang um 30 Prozent bis 2045) erreicht. Durch den reduzierten Konsum an tierischen Produkten steigt der Konsum von pflanzlichen und synthetischen Ersatzprodukten entsprechend.

Eine Reduktion des Konsums tierischer Produkte steht dabei in starker Abhängigkeit von der gesellschaftlichen Transformation und der Änderung des Verbraucherverhaltens, da die Nachfrage nach Fleisch bzw. tierischen Produkten ansonsten schlichtweg durch Import befriedigt würde. Darüber hinaus wird ein großer Teil der Fleischproduktion in Deutschland auch für Exporte ins außereuropäische Ausland genutzt.

Zudem ist die Landwirtschaft für das Ziel der Klimaneutralität deshalb so wichtig, weil sie über die benötigten Flächen für die Futtermittelproduktion auch die Flächenverfügbarkeit für natürliche und technische Senken beeinflusst. Da mehr als die Hälfte

Die Landwirtschaft hat eine wichtige Doppelfunktion auf dem Weg zur Klimaneutralität: als THG-Quelle sowie als Bereitsteller von Biomasse.

der landwirtschaftlichen Flächen für den Anbau von Futterpflanzen verwendet werden¹⁵, ist eine Reduktion der Viehbestände über eine Konsumumstellung oder einen verringerten Export ein zentraler Hebel, um Flächen für den Ausbau natürlicher und technischer Senken zu gewinnen.

Der Landwirtschaftssektor ist damit eine zentrale Stellschraube für die Erreichung der Klimaneutralität in doppelter Rolle: Als THG-Emittent und als Ermöglicher von Negativemissionen.

¹⁵ Umweltbundesamt (UBA), 2021b.

10.2 Sicherung und Erhöhung der CO₂-Aufnahme

„Natürliche Senken“ bezeichnen die Kohlenstoffaufnahme und -speicherung durch natürliche Ökosysteme. Eine negative Bilanz zwischen Aufnahme und Emissionen im LULUCF-Sektor wird dann als natürliche Negativemissionen verbucht. Diese werden erzielt, wenn die jährliche CO₂-Entnahme durch natürliche Ökosysteme größer ist als die Emissionen etwa durch eine Änderung der Landnutzung.

Der starken CO₂-Entnahmewirkung der Wälder (rund -58 Millionen Tonnen CO₂ in 2018) stehen Emissionen aus der Landnutzung entgegen, etwa aus landwirtschaftlich genutzten Böden, insbesondere durch die land- und forstwirtschaftliche Nutzung entwässerter organischer Böden.

Die Senkenleistung des LULUCF-Sektors ist jedoch gefährdet. Risiken bestehen insbesondere durch die **Änderung der Landnutzung** (z. B. durch die Ausbreitung von Siedlungsflächen) sowie durch **klimatische Veränderungen und eine Zunahme von Stresssituationen** (etwa Dürre und dadurch verursachte Waldbrände). Bei einem starken Rückgang der Waldsenke, zum Beispiel durch ein vermehrtes Absterben von Bäumen, könnte sich der LULUCF-Sektor sogar zur Netto-Quelle entwickeln.¹⁶

Das Ziel sollte es daher sein, **Kohlenstoffvorräte** in bereits resilienten Wäldern zu erhalten und zu erhöhen sowie durch gezielte Waldbewirtschaftung (z. B. Waldumbau) die Klimaresilienz von Wäldern zu stärken. Die Resilienz der Wälder wird insbesondere durch eine naturnahe und standortgerechte Zusammensetzung der Baumarten erhöht. Eine graduelle Erhöhung des Anteils von Laub- und Mischwäldern würde auf dieses Ziel einzahlen.

Durch **(Wieder-)Aufforstung sowie gezielte Waldbewirtschaftung** mit extensiverer Nutzung (also insbesondere durch eine reduzierte Ernteintensität) kann der Kohlenstoffspeicher im Wald erhöht werden. Hierbei gilt es insbesondere, standortgerechte Laubbäume zu schonen, die vor allem für die energetische Nutzung oder für die Nutzung in kurzlebigen Holzprodukten wie Zellstoff gefällt würden. Durch eine Erweiterung der Waldfläche kann CO₂ aus der Atmosphäre in wachsende oberirdische und unterirdische Biomasse der Waldbestände und im Waldboden gespeichert werden. Pro Hektar Waldfläche kann hier eine jährliche Bindung von 7,3 Millionen Tonnen CO₂ erzielt werden. In der Modellierung der dena-Leitstudie wird das WEHAM-Naturschutzpräferenzszenario¹⁷ als Basis verwendet. Durch eine zusätzliche Extensivierung der Waldbewirtschaftung kann zusammen mit der Aufforstung die Senkenleistung des LULUCF-Sektors bis 2045 um 14 Millionen Tonnen CO₂ erhöht werden.

Darüber hinaus können durch diese Maßnahmen wichtige Ziele des Biodiversitätsschutzes erreicht werden (siehe EU-Biodiversitätsschutzstrategie). Eine intensiviertere Waldbewirtschaftung mit größerer Verfügbarkeit von (fester) Biomasse würde zu einer reduzierten Waldsenke führen, könnte aber die Bedeutung von BECCS erhöhen.

Zudem könnte eine langfristige Kohlenstoffspeicherung auch durch die vorrangige Verwendung des geernteten Holzes für **langlebige Holzprodukte** erzielt werden. Gerade auch ein Umbau des Waldbestands unter erhöhtem Einschlag von Nadelhölzern hat hier in den kommenden Jahrzehnten großes Potenzial für die Holzverfügbarkeit.

Die genaue Bilanzierung der Speicherung von CO₂ in langlebigen Holzprodukten ist komplex. Die Wirksamkeit und nachhaltige Anwendung von Holzprodukten etwa in der Bauwirtschaft ist abhängig von vielen Faktoren und bedarf sorgfältiger Bewertung (siehe Infobox).

Die Erhaltung des Kohlenstoffs in organischen Böden durch Schutz und Wiederherstellung von Feuchtgebieten (z. B. Moore) ist eine der effektivsten Klimaschutzmaßnahmen. Die Wiedervernässung organischer Böden hat ein spezifisches Potenzial zur Minderung von über 20 Tonnen CO₂ je Hektar und Jahr. Emissionen aus den für die landwirtschaftliche Nutzung entwässerten organischen Böden können durch ein Anheben des Wasserspiegels stark reduziert werden. Steigt der Wasserspiegel so weit, dass sich Moore regenerieren können, wird auf lange Sicht sogar zusätzlicher Kohlenstoff gebunden.

Durch die Reduktion und **Einstellung des Torfabbaus bis 2040** sowie eine **ambitionierte Wiedervernässung** kann die LULUCF-

Feuchtgebiete und organische Böden spielen eine herausgehobene Rolle. Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen von organischen Böden sind besonders effektiv.

Senke um bis zu 16 Millionen Tonnen CO₂ gestärkt werden. Hierzu müssen rund 1,9 Prozent der deutschen Landesfläche wiedervernässt werden; geeignet sind hierfür Acker- und Grünlandflächen. Wiedervernässung findet auf organischen Böden statt. Diese machen weniger als 10 Pro-

zent der deutschen Acker- und Grünlandflächen aus. Bis 2045 müssen von diesen organischen Böden rund 52 Prozent wiedervernässt werden. Eine Nutzung der Flächen ist anschließend durch eine extensive Weidenutzung oder durch den Anbau von

¹⁶ Öko-Institut-Kurzgutachten, 2021.

¹⁷ Oehmichen, et al., 2018.

Paludikulturen (z. B. Rohrkolben, Schilfrohren und Torfmoosen) zur Erzeugung von Biomasse für die energetische oder stoffliche Nutzung möglich.¹⁸

Die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts in organischen Böden erfordert in der Modellierung der dena-Leitstudie darüber hinaus die Vorgabe, dass keine weiteren organischen Böden zu Ackerland umgewandelt werden sowie die Überführung von nicht-vernässtem Ackerland auf organischen Böden zu Grünland.

Daneben gibt es weitere Maßnahmen und Handlungsfelder, um die Senkenleistung des LULUCF-Sektors zu bewahren und auszubauen. Hierzu gehören beispielsweise die **Erhöhung des Kohlenstoffgehalts in landwirtschaftlich genutzten Mineralböden** durch die Ausweitung der Agroforstwirtschaft (bis 2045 Aufbau einer Senkenleistung von bis zu 10 Millionen Tonnen CO₂ ä pro Jahr) und die Vermeidung des Umbruchs von Grünland auf mineralischen Böden.



ORGANISCHE MATERIALIEN ALS KOHLENSTOFFSPEICHER

Viel und zu Teilen auch kontrovers diskutiert wird aktuell das mögliche Potenzial und die Bedeutung von nachwachsenden Rohstoffen, insbesondere Holz als Kohlenstoffspeicher etwa in langlebigen Holzprodukten oder in der Bauwirtschaft. Hierzu bedarf es noch weiterer Forschung und insbesondere Untersuchungen zu den regionalen Potenzialen und Einsatzmöglichkeiten.

Holz ist neben anderen organischen Materialien ein wertvoller CO₂-Speicher und kann dies über Jahrhunderte bleiben, wenn der Werkstoff richtig eingesetzt wird. So bindet ein Kubikmeter Holz während des Wachstums je nach Holzsorte ca. eine Tonne CO₂ aus der Atmosphäre, welches – abzüglich von Ernteverlusten und anderen Verlusten in der Prozesskette in Höhe von ca. 20 Prozent – langfristig im Feststoff gebunden werden kann.

Gleichzeitig ist der energetische Aufwand der Verarbeitung von Holz im Vergleich zu anderen Materialien sehr gering. Der Einsatz von Holz hat daher das Potenzial, durch Substitution anderer Materialien erhebliche Mengen Energie und THG-Emissionen zu vermeiden (Substitutionseffekt). Bei der Bewertung dieses Potentials muss jedoch unabhängig vom gewählten Material die THG-Bilanz über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Gleichzeitig sind die fortschreitende Dekarbonisierung sowie materialspezifische Effekte wie beispielsweise die dauerhafte Einbindung von CO₂ in Beton (Rekarbonatisierung) zu berücksichtigen.

Holz ist zudem ein sogenannter „Kreislaufwerkstoff“, der bei richtiger Nutzung (Kaskadennutzung) mehrfach weiterverwendet werden kann (z.B. Bauholz > Holzwerkstoff > energetische Nutzung). Der Kohlenstoff bleibt während dieses Nutzungskreislaufs solange gebunden bis das Holz nach der stofflichen Nutzung einer thermischen Verwertung zugeführt werden kann, eventuell sogar mit CO₂-Abscheidung (BECCS). Ausschlaggebend ist ein korrekter Einsatz des Werkstoffs unter Berücksichtigung der Kreislaufnutzung. Die langfristige CO₂-Speicherung im Holz durch die Kaskadennutzung in Kombination mit dem Substitutionseffekt kann somit für die Klimastabilisierung einen doppelten Nutzen erbringen.

Eine entscheidende Rolle für das Potenzial der Holznutzung spielt dabei die nachhaltige Sicherstellung der erforderlichen Ressourcen. Diese kann etwa durch eine Nachweispflicht im Bausektor gestützt werden.

Auch andere organische Materialien wie Stroh, Bambus, Algen, Pilze oder weitere biobasierte Stoffe, die ebenso als Kohlenstoffspeicher dienen können, werden derzeit für einen intensiveren Einsatz untersucht. Ihre Relevanz etwa für das künftige Bauen ist allerdings noch weitgehend offen.

Für die Verwendung von Holz und anderen organischen Materialien in der Bauwirtschaft müssen gleichzeitig die bauphysikalischen und technischen Eigenschaften, etwa auch Brandschutzeigenschaften weiter untersucht werden.

Die durch Prof. Hans Joachim Schellnhuber gemeinsam mit einem breiten Akteurskreis ausgerichtete Initiative „Bauhaus der Erde“ wirbt für die Rolle von organischen Materialien als wichtige CO₂-Senke und als Substitut für klimaschädliche emissionsintensive Baumaterialien. Das „Bauhaus der Erde“ soll Vorbildwirkung entfalten und eine Bauwende einleiten.

¹⁸ Öko-Institut-Kurzgutachten, 2021.

Zentrale Herausforderungen natürlicher Senken sind die Permanenz und Bilanzierung

Eine entscheidende Frage bei der Beurteilung von Negativemissionen ist die Einschätzung zur **Permanenz der Kohlenstoffspeicherung**. Bei fortschreitendem Klimawandel geraten besonders die natürlichen CO₂-Senken durch häufigere Extremwetterereignisse und Störungen unter Druck, die Senkenleistung kann also nicht garantiert werden. Infolge der Dürrejahre 2018 bis 2020 in Verbindung mit Sturmereignissen und Borkenkäferbefall muss eine Fläche von 277.000 Hektar (mehr als die Fläche des Saarlands) wiederbewaldet werden.¹⁹

Diese Effekte sind in dem verwendeten WEHAM-Naturschutzpräferenzszenario²⁰ mit Startjahr 2013 allerdings noch nicht berücksichtigt. Aufgrund von Annahmen zur Bewirtschaftungsintensität und einem vermehrten Einschlag von Nadelholz als Waldumbaumaßnahme kann die Abnahme der Waldsenke von knapp 60 Millionen Tonnen CO₂ auf etwas mehr als 20 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr 2020 aber in einer Größenordnung liegen, die den Effekten der Extremjahre entspricht.

Die Bilanzierung von Emissionen und Senken aus dem LULUCF-Bereich ist aufgrund der Datenlage und der Komplexität des Monitorings überaus schwierig und fehleranfällig. Szenarien zur Entwicklung der Waldsenke beispielsweise beziehen sich auf eine alle zehn Jahre stattfindende Waldinventur sowie Zwischeninventuren, die nach 5 Jahren mit einer reduzierten Stichprobenzahl erfolgen.

In der dena-Leitstudie wurde daher auch reflektiert, wie weit die natürlichen Senken zur Erreichung des gesamtsystemischen Ziels „THG-Neutralität“ berücksichtigt werden können. Entsprechend den Vorgaben für die übrigen im KSG mit spezifischen Minderungszielen versehenen Sektoren wurde in der gesamtsystemischen Modellierung auch für den LULUCF-Sektor angenommen, dass dieser die KSG-Zielvorgaben im Jahr 2045 erreichen wird und damit einen erheblichen Beitrag zur Erreichung der Netto-Null leistet.

Zusätzlich wurde jedoch im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht, in welchem Maße die technischen Maßnahmen (beispielsweise die Entnahme von atmosphärischem CO₂ durch Direct Air Capture) verstärkt werden müssten, um die Klimaziele zu erreichen, sollte die Minderungsleistung aus dem LULUCF-Sektor nicht den KSG-Zielen entsprechen (siehe Abschnitt 10.3).

10.3 Aufbau eines klimaneutralen Kohlenstoffkreislaufs

„Technische Senken“ beschreiben unterschiedliche Optionen der CO₂-Abscheidung und ihre Negativemissionswirkung. Im Wesentlichen sind dies CCU/S-Technologien. Im separaten Gutachterbericht der Prognos AG finden sich ausführliche Beschreibungen der technischen Ansätze²¹:

- CO₂-Filterung/**Entnahme aus der Atmosphäre** (DAC) bzw. **Abscheidung aus Punktquellen** mit gegenüber der Atmosphäre erhöhter CO₂-Konzentration (z. B. Industrieanlagen, Müllverbrennungsanlagen, Kraftwerke)
- Notwendige **Prozesse und Infrastrukturen zum Transport** des abgeschiedenen bzw. aufgefangenen Kohlenstoffs vom Entnahmeort zum Ort der weitergehenden Nutzung oder dauerhaften Endlagerung

- **Weiterverwendung** in langlebigen Produkten oder Stoffen (Carbon Capture and Utilization, CCU) oder dauerhafte **geologische Speicherung** (Carbon Capture and Storage, CCS)

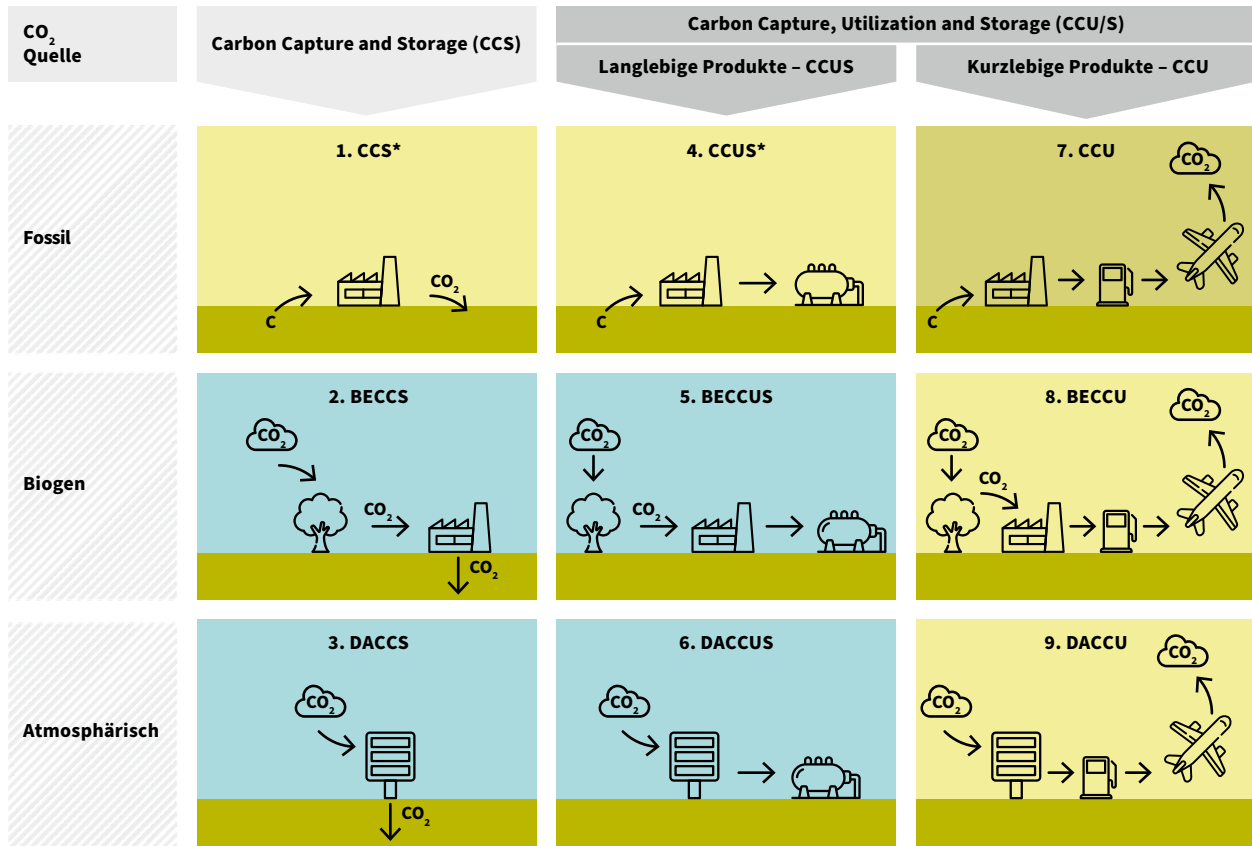
Carbon-Capture-Technologien können sowohl zur Vermeidung von Emissionen als auch für Negativemissionen eingesetzt werden. Ob es sich um netto-negative Emissionen (Senken), um neutrale Emissionen oder um Netto-Emissionen handelt, hängt von der Herkunft des CO₂ (biogen, atmosphärisch oder fossil) und der Bindungsdauer (kurzlebig oder langlebig) ab. Nur durch die Abscheidung biogenen oder atmosphärischen Kohlenstoffs und die anschließende langfristige Speicherung in geologischen Stätten, die Nutzung in langlebigen Produkten oder die Nutzung in Produkten, die selbst in einen Kreislauf überführt werden, können Negativemissionen erreicht werden.

¹⁹ Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2020.

²⁰ Oehmichen, et al., 2018.

²¹ Prognos-Kurzgutachten, 2021.

Abb. 10.3 Senkenwirkung von CCU/S-Prozessen



Annahme: Strom- und Wärmebedarf stammt aus erneuerbaren Energien.

■ Netto-negative CO₂-Emissionen ■ Neutrale CO₂-Emissionen ■ Netto-CO₂-Emissionen

* Bei einer Abscheidungsrate von 90 % gehen 10 % in die Atmosphäre als netto CO₂-Emission

Quelle: Prognos-Kurzgutachten, 2021.

CO₂-Abscheidung aus Punktquellen in Industrie und Energiewirtschaft

Die CO₂-Abscheidung an Punktquellen dient dazu, Prozessemissionen oder energetische Emissionen abzuscheiden, und wird für ein klimaneutrales System unerlässlich sein.

Die Industriebereiche Eisen und Stahl, Zement und Kalk sowie die Grundstoffchemie sind in der Regel gut für die CO₂-Abscheidung geeignet. Durch die hohe CO₂-Konzentration im Abgasstrom von Industrieprozessen (bis zu 30 Prozent) im Vergleich zur sehr niedrigen CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (0,04 Prozent) ist ein hoher Abscheidungsgrad (> 90 Prozent) bei sehr viel geringerem Energieverbrauch als bei Direct Air Capture erreichbar. Bei der Abscheidung von Prozessemissionen in der Industrie werden Emissionen nur vermieden und nicht etwa negative Emissionen erzielt.

Bei der Abscheidung von CO₂-Emissionen aus der energetischen Nutzung biogener Energieträger (BECCS) können **negative Emissionen in der Industrie und Energiewirtschaft** erzielt werden. BECCS vereint damit den Vorteil einer relativ effizienten Abscheidung aus einem CO₂-reichen Abgasstrom, der Produktion von Strom und Wärme und dem Erzielen von Negativemissionen. Der Nachteil sind hohe Biomassebedarfe, durch die große Flächen beansprucht werden.

Die Verwendung von Biomasse ist auch für Hochtemperaturprozesse gut geeignet, daher bietet sich der **Einsatz von BECCS in der Industrie** an. Industriestandorte sind in der Regel logistisch gut angeschlossen, um die Versorgung mit Biomasse als Energieträger gewährleisten zu können. Günstig gelegene Industriestandorte bzw. Industriecluster könnten zudem auch durch eine Pipeline-Anbindung für den CO₂-Transport angeschlossen werden. Ein Cluster für CO₂-Abscheidung an Industrieanlagen und die Wiederverwendung des CO₂ in anderen räumlich nahe gelegenen Industrien könnten auch dezentrale Lösungen attraktiv erscheinen lassen.

Zur Erreichung der KSG-Ziele des Industriesektors ist in der dena-Leitstudie bereits für das Jahr 2030 die Notwendigkeit von CO₂-Abscheidung erforderlich. Im Jahr 2045 werden die verbleibenden Emissionen der Industrie (38 Millionen Tonnen CO₂ ä) durch CCU/S um 15 Millionen Tonnen verringert. Es werden insbesondere Prozessemissionen (etwa in der Zementproduktion) abgeschieden. BECCU/S durch den Einsatz biogener Energieträger führt zu Negativemissionen von 7 Millionen Tonnen CO₂ in der

Technische CO₂-Abscheidung wird bereits ab 2030 zur Vermeidung von Prozessemissionen benötigt. Bei Biomasseeinsatz werden hierbei sogar Negativemissionen erzielt.

Industrie im Jahr 2045. Auch in der Fernwärme und in Müllverbrennungsanlagen (MVA) erfolgt ab 2040 der Einsatz von CCU/S und BECCU/S (7 Mio. t CO₂ in 2040 bzw. 12 Mio. t CO₂ in 2050).

Im Jahr 2045 müssen **mindestens 24 Millionen Tonnen CO₂ abgeschieden und geologisch gespeichert** werden, weitere 10 Millionen Tonnen werden in die Nutzung überführt (CCU, siehe unten). Insgesamt können im Jahr 2045 in der Industrie und der Energiewirtschaft über BECCU/S Negativemissionen in Höhe von 17 Millionen Tonnen CO₂ erzielt werden.

Die CO₂-Abscheidung in Müllverbrennungsanlagen ist Grundlage dafür, dass etwa in Kunststoffen gebundener Kohlenstoff aus ursprünglich atmosphärischen Quellen (biogen oder technisch gebunden) zum Großteil als Senke bilanziert werden kann (siehe unten). In einem klimaneutralen System sollten alle Müllverbrennungsanlagen mit CCS-Anlagen ausgestattet sein. Dies eröffnet die Frage nach der Effizienz einer stärkeren Zentralisierung der Müllverbrennung, die aber in Widerspruch mit der Notwendigkeit von Dezentralität zur Wärmeerzeugung stehen kann.

CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre

Die CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre durch Direct Air Capture (DAC) weist technische Parallelen zur technischen Abscheidung aus Punktquellen auf. Allerdings ist die CO₂-Konzentration hierbei mit etwa 420 ppm (parts per million) (= 0,0420 Prozent) deutlich geringer, wodurch der Energieaufwand zur CO₂-Filterung bzw. -Auswaschung aus dem Luftstrom deutlich höher ist. Erläuterungen zu unterschiedlichen Verfahren von DAC finden sich im Gutachten von Prognos.²²

Der Vorteil von DAC ist, dass die energieintensiven Anlagen dort gebaut werden können, wo die benötigten Mengen erneuerbarer Energien (Strom und Wärme) sehr kostengünstig zur Verfügung stehen und/oder wo besonders vorteilhafte Bedingungen für den Abtransport des aufgefangenen Kohlenstoffs bzw. für die dauerhafte Speicherung bestehen (beispielsweise an Orten, an denen direkt eine Verpressung in leergeförderte Öl- oder Gaslagerstätten oder in für die Karbonmineralisierung geeignete Schichten erfolgen kann). Die Hürden für den Einsatz von DAC liegen neben dem Energieaufwand insbesondere darin, dass sich die Technologie noch im Anfangsstadium befindet und sehr hohe Kosten aufweist.

Im Hauptszenario KN100 werden durch den großen Beitrag von LULUCF sowie den Import von synthetischen Energieträgern keine DAC-Anlagen im Inland benötigt. Für die Herstellung der in der dena-Leitstudie importierten Powerfuels werden allerdings mehr als 60 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr benötigt, die hauptsächlich durch DAC erbracht werden. Laut Einschätzung der IEA beträgt die aktuelle weltweite DAC-Kapazität etwa 0,01 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr.²³

Berücksichtigt man jedoch die Unsicherheit bzw. die mögliche Instabilität der Senkenleistung von LULUCF, würden auch im Inland relevante Mengen von DAC benötigt, um die benötigten Negativemissionen von insgesamt 70 Millionen Tonnen CO₂ zu erreichen. In einer Sensitivität, in welcher der LULUCF-Sektor nur eine Senkenleistung in Höhe von 20 Millionen Tonnen CO₂ erreicht, müssten über Direct Air Capture ca. 16 Mio. t CO₂ abgeschieden und geologisch gespeichert werden. Die verbleibenden notwendigen Negativemissionen in Höhe von 3,6 Millionen Tonnen CO₂ werden durch BECCS erzielt (siehe Abbildung 10.4).

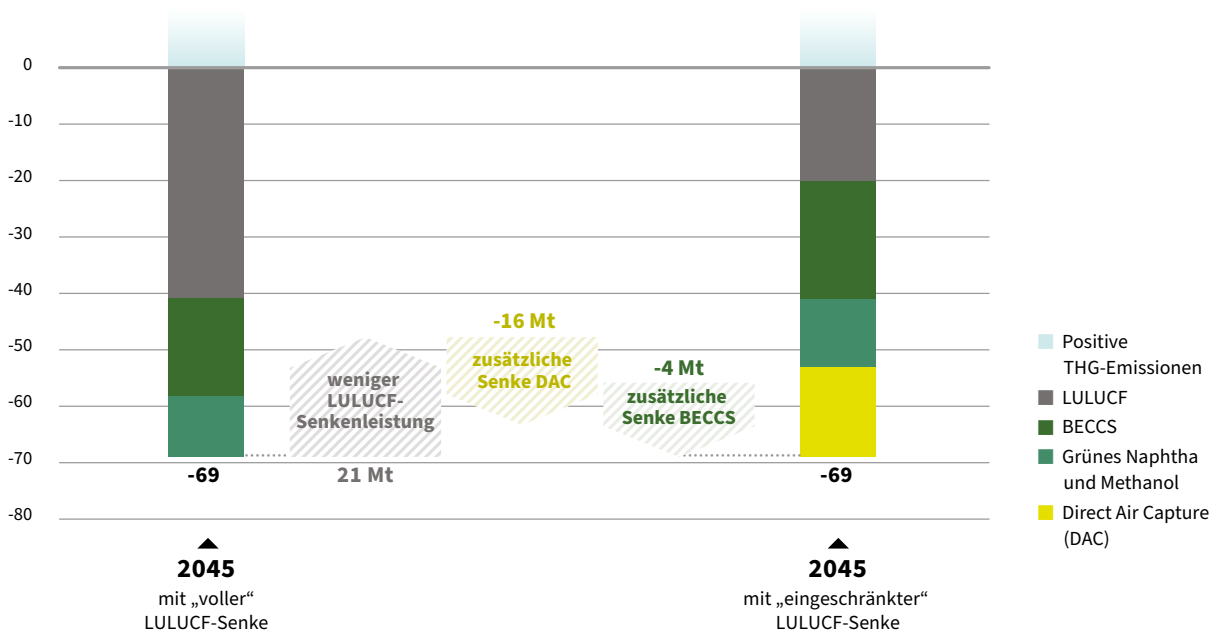
Die daraus entstehende zusätzliche Stromnachfrage von 16 TWh würde zur Hälfte durch Importe gedeckt. Die gesamte deutsche Nettostromnachfrage steigt durch die Zunahme der technischen Senken um 2 Prozent.

²² Prognos-Kurzgutachten, 2021.

²³ International Energy Agency (IEA), 2020.

Abb. 10.4 Geringere Senkenleistung von LULUCF führt zu höherem Bedarf von BECCS und Notwendigkeit von DAC

Angaben in Mt CO₂ä



Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

CO₂ als Rohstoff für einen klimaneutralen Kohlenstoffkreislauf

Auch wenn die energetische Nutzung fossiler Energieträger bis 2045 weitgehend beendet werden wird, basiert die (organische) Chemie jedoch weiterhin auf Kohlenstoff als Rohstoff, das heute fast ausschließlich aus fossilen (petrochemischen) Quellen stammt. Ein klimaneutrales Energie- und Wirtschaftssystem kann daher nicht „dekarbonisiert“ sein. Es muss jedoch gelingen, die heutigen laufend stattfindenden Emissionen fossilen Kohlenstoffs (unter Nutzung der Atmosphäre als Deponie) in einen **klimaneutralen Kohlenstoffkreislauf** zu überführen.

Heute werden global rund 450 Millionen Tonnen Kohlenstoff pro Jahr in Chemikalien und Polymeren gebunden. Zu 85 Prozent stammen sie aus fossilen Ressourcen, zu 10 Prozent aus Biomasse und nur zu 5 Prozent aus Recycling. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Nachfrage nach gebundenem Kohlenstoff bis 2050 auf etwa 1 Milliarde Tonnen pro Jahr mehr als verdoppeln könnte.²⁴ Allein in Deutschland werden jährlich 12 Millionen Tonnen der wichtigsten Basischemikalien hergestellt, was der Kohlenstoffmenge von rund 38 Millionen Tonnen CO₂ entspricht.

Für eine Kohlenstoff-Kreislaufwirtschaft wird Kohlenstoff weiterhin als Rohstoff besonders für die chemische Industrie von Bedeutung sein. Dieser könnte erneuerbar aus verschiedenen Quellen stammen. Das benötigte CO₂ kann aus technischer Abscheidung, aus erneuerbaren biogenen Quellen (Biomasse/ Biogas) oder aus stofflichem Recycling kommen. Die Verwendung regional verfügbarer Kohlenstoffträger bzw. -quellen könnte dabei Transportbedarfe reduzieren.

Durch **Bindung von biogenem oder atmosphärischem CO₂ in langlebigen Produkten** (etwa der Bauindustrie) mit möglichst hohen Quoten von Wiederverwendung und Kaskadennutzung können erhebliche Negativemissionen erzielt und es kann gleichzeitig Wertschöpfung generiert werden. Wenn die heute in Deutschland produzierten Kunststoffe langfristig genutzt werden (z. B. als Konstruktionsmaterial, als Dämmstoffe bzw. in einer Kreislaufnutzung) und/oder das CO₂ am Ende der Lebensdauer endgelagert wird, könnten relevante Mengen an Negativemissionen erreicht werden.

²⁴ Nova-Institute, 2021.

Neben Produkten und Werkstoffen, in denen der eingebrachte Kohlenstoff langfristig gebunden ist, werden auch **kohlenstoffhaltige Energieträger und Rohstoffe** benötigt, bei deren Verwendung die entstehenden CO₂-Emissionen aus heutiger Sicht nicht aufgefangen werden können, beispielsweise im Flugverkehr sowie in der Seeschifffahrt. Der hierfür benötigte Kohlenstoff muss langfristig ebenfalls erneuerbar aus DAC, Biomasse oder stofflichem Recycling (von zuvor per DAC oder aus Biomasse hergestellten Kunststoffprodukten) erfolgen. Für den Hochlauf könnte auch die Abscheidung von Prozessemissionen

an Punktquellen eine relevante CO₂-Quelle darstellen, wenn diese vom EU ETS oder einem äquivalenten System abgedeckt ist. Hierdurch darf jedoch keine Verlängerung der Nutzung fossiler Energieträger motiviert werden.

Die zentrale Herausforderung jeder auf CO₂ basierenden Anwendung ist die Frage der Energiequelle für den Prozess. Dies ist relevant, da CO₂ äußerst reaktionsträge und energiearm ist. Zunehmendes Einsatzpotenzial geht daher einher mit zunehmendem Energieaufwand.

CO₂-INFRASTRUKTUREN



Ein klimaneutrales Energiesystem wird neben Strom-, Gas- und H₂-Infrastrukturen, auch eine Infrastruktur für CO₂ benötigen. Sowohl für den Transport zur geologischen Speicherung als auch für die Weiterverwendung des CO₂ als Rohstoff werden Transportmöglichkeiten gebraucht. Als Transportoptionen kommen Lkw, Zug, Schiff und Pipeline infrage. Lkw und Zug sind nur für geringe Mengen und Distanzen geeignet, während Schiff und Pipeline auch für größere Mengen und Distanzen genutzt werden können. Eine genaue Analyse zu den verschiedenen Transportoptionen findet sich im Gutachten der Prognos AG.

Allgemein besteht beim Pipeline-Transport bei hohen Kapazitäten ein Kostenvorteil, während der Transport über Lkw und die Schiene eine kurzfristig einfache Möglichkeit zum CO₂-Transport bietet, solange noch keine ausreichende Infrastruktur ausgebaut ist.

Es ist daher naheliegend, dass insbesondere die großen Industriestandorte, in denen CO₂ als (Prozess-)Emissionen anfallen, sowie diejenigen, die auch CO₂ als Ausgangsprodukt benötigen, langfristig über eine Pipeline-Infrastruktur angebunden sind. Diese wird bei zunehmenden Mengen des CO₂-Transports zu einer Endlagerung etwa in der norwegischen Nordsee wirtschaftlich.

Die Planung und die Entwicklung eines möglichen CO₂-Pipeline-Netzes sollten in enger Abstimmung mit der Entwicklung von Gas- und Wasserstoffnetzen stehen. Mittels einer sektorübergreifenden Infrastrukturplanung wie dem Systementwicklungsplan (siehe Kapitel 2 „Marktdesign“) ließen sich hier Synergien heben. Die Planung einer CO₂-Infrastruktur sollte auch europäisch koordiniert sein, um Industriecenter oder DAC-Anlagen mit geeigneten Speicherstätten in Europa effizient zu verbinden. Hierfür ist auch ein regulatorischer Rahmen für den grenzüberschreitenden Transport von CO₂ erforderlich.



CCU FÜR SYNTHETISCHE ENERGIETRÄGER

Für kohlenstoffbasierte synthetische Energieträger wird CO₂ benötigt. Dabei ist zu beachten, dass synthetische Energieträger nur dann langfristig klimaneutral sind, wenn das verwendete CO₂ a) aus DAC-Anlagen oder b) aus BECCU (Bioenergy Carbon Capture and Utilization (also unter Verwendung von Biomasse) stammt.

Der Markt für Powerfuels könnte gerade für den Markthochlauf von CCU/S-Technologien eine Chance sein. Der Aufbau von DAC-Anlagen für Powerfuels könnte die notwendige Wertschöpfung schaffen und Skaleneffekte anreizen. Ein schneller Hochlauf von DAC auf internationaler Ebene ist zudem Grundvoraussetzung dafür, dass die notwendigen Mengen Powerfuels (etwa PTL für den Luftverkehr) rechtzeitig zur Verfügung stehen. DAC benötigt jedoch hohe thermische und elektrische Energiebedarfe und unterliegt in seiner Verwendung zumindest theoretischen Potenzialgrenzen, die von der Verfügbarkeit von grünem Strom und den dafür benötigten Flächen limitiert sind.

Die Verwendung von DAC für Powerfuels kann damit langfristig auch in Konkurrenz zu Negativemissionen stehen, die durch die DAC-Anlagen mit anschließender geologischer Speicherung (DACCS) ebenfalls erreicht werden können.

Negativemissionen über grünes Naphtha und grünes Methanol

Im Szenario KN100 trägt die Verwendung von grünem Naphtha und grünem Methanol als Rohstoff für die Chemieindustrie zu Negativemissionen in 2045 in Höhe von insgesamt 12 Millionen Tonnen CO₂ bei.

Diese Kohlenstoffverbindungen werden aus erneuerbarem CO₂ und grünem Wasserstoff gewonnen, wobei Naphtha hauptsächlich aus dem Ausland importiert wird, wozu DAC die präferierte CO₂-Quelle ist. Grünes Methanol wird ungefähr zur Hälfte in Deutschland mit BECCU produziert eingesetzt (für Methanol). Ohne die Möglichkeit der Importe bestünde in Deutschland ein höherer Bedarf für CCU oder DAC-Anlagen für die Gewinnung des CO₂ aber auch von Wasserstoff. Die aus Naphtha und Methanol entstehenden Produkte (hauptsächlich Kunststoffe) speichern das CO₂ über unterschiedlich lange Zeiträume.

Wichtig für die Bilanzierung als Negativemission ist die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus auch nach der Nutzungsphase. Es wird angenommen, dass der Kohlenstoffkreislauf weitgehend geschlossen ist. Dies setzt voraus, dass resultierende Produkte am Ende ihres Lebenszyklus entweder in ein Recycling überführt werden oder bei der thermischen Verwertung (Verbrennung in einer Müllverbrennungsanlage) über CCS das CO₂ wieder abgeschieden wird. Die imperfekten Abscheideraten (in der dena-Leitstudie werden 90 Prozent angenommen) müssen bei

der Berechnung der Senkenleistung mitgedacht werden. Die End-of-Life-Emissionen exportierter plastikhaltiger Produkte müssen im Verwendungsland bilanziert werden. Darüber hinaus wird bei der Verwendung von grünem Naphtha und Methanol als Senkenoption ein Sicherheitsabschlag auf die Senkenleistung angenommen, um Unsicherheiten bei Import und Export, im Lebenszyklus und bei der Ausstattung der Müllverbrennungsanlagen zu berücksichtigen.

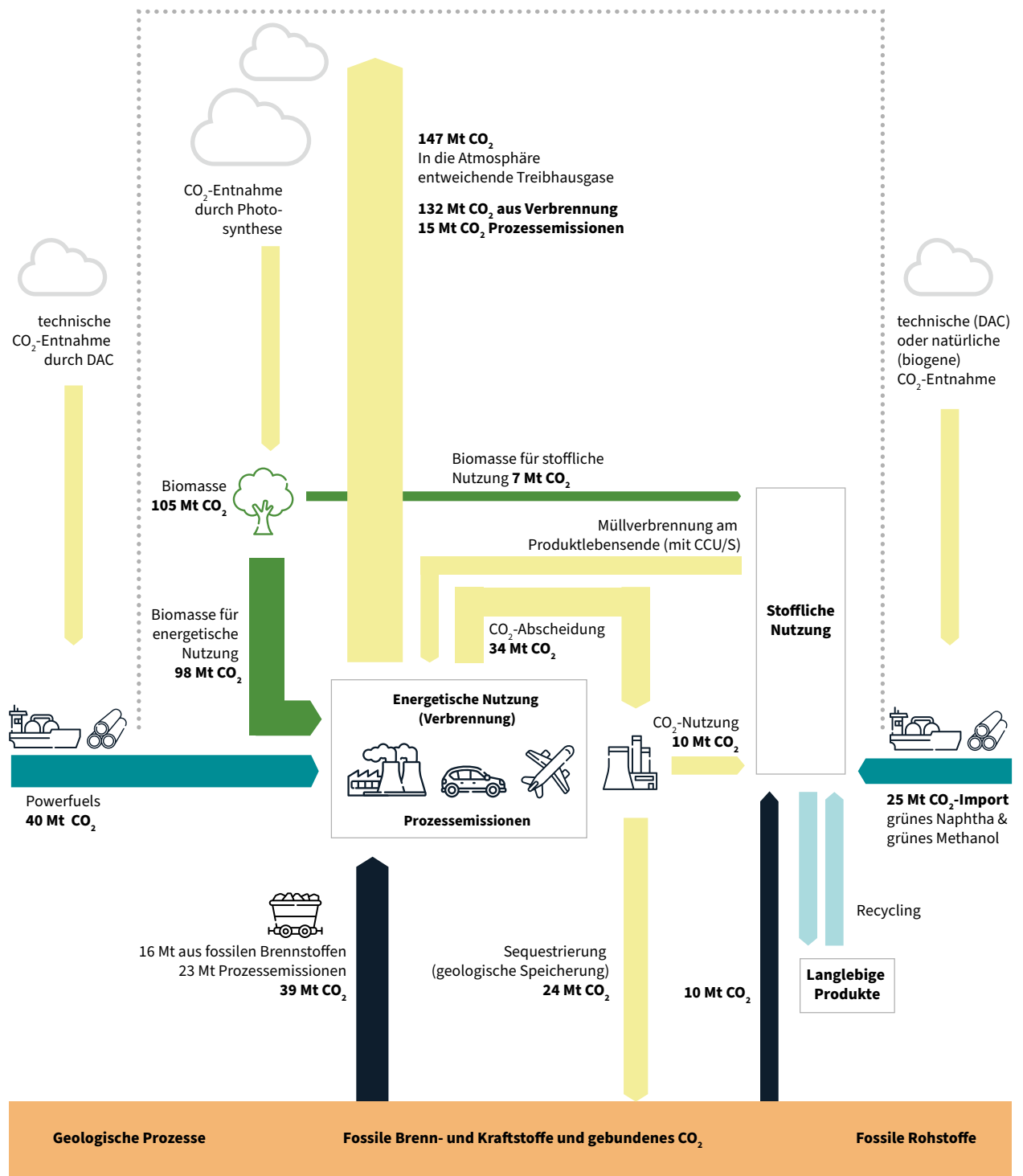
Abbildung 10.5 illustriert den CO₂-Kreislauf des klimaneutralen Deutschland 2045, wie er sich aus den Ergebnissen der dena-Leitstudie ergibt. Die Pfeile repräsentieren Kohlenstoffmengen umgerechnet in CO₂. Schwarze Pfeile indizieren fossilen Kohlenstoff während grüne Pfeile für Biomasse stehen.

Die absoluten Mengen von CO₂ sind im Vergleich zum heutigen System sehr viel niedriger, so wurden alleine 2018 über 700 Millionen Tonnen CO₂ in die Atmosphäre emittiert, größtenteils aus fossilen Rohstoffen. Der CO₂-Kreislauf beinhaltet auch den Import erneuerbar erzeugter kohlenwasserstoffbasierten Energieträgern und Rohstoffen (Powerfuels, grünes Naphtha und grünes Methanol) aus dem Ausland, welche dort unter Nutzung von atmosphärischem CO₂ erzeugt worden sind.

Die Emissionen aus der Landwirtschaft, der LULUCF-Sektor sowie weitere Treibhausgase sind nicht Teil dieser Darstellung. Daher ist Deutschland im Zielbild trotz des negativen CO₂-Kreislaufes insgesamt „nur“ THG-neutral.²⁵

²⁵ Kleine Abweichungen sind zudem aufgrund Rundungen nicht ausgeschlossen.

Abb. 10.5 Der CO₂-Kreislauf des klimaneutralen Deutschlands 2045



Quelle: EWI-Gutachterbericht, 2021.

Geologische Speicherung von CO₂

Neben der Weiterverwendung von CO₂ in Produkten muss ein gewisser Teil des abgeschiedenen Kohlenstoffs dauerhaft gespeichert werden, um kontinuierlich Negativemissionen zu erreichen.

Hierfür sind verschiedene Optionen denkbar. Die geologische Speicherung bzw. Sequestrierung (CCS, bei biogenen Rohstoffen auch BECCS) beschreibt das unterirdische Einlagern von CO₂ in geeigneten Gesteinsformationen, beispielsweise in salinen Aquiferen, in erschöpften Öl- und Gasfeldern oder durch Mineralisierung in situ (siehe Infobox). Aktuell wird der größte Anteil von CCS jedoch im Rahmen von „Enhanced Oil Recovery“ zur Erdölförderung benutzt.²⁶

In Deutschland eignen sich besonders geologische Formationen im Norddeutschen Becken und Lagerstätten in der Nordsee für die CO₂-Speicherung. Insgesamt nimmt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Deutschland eine potenzielle Speicherkapazität von über 16 Milliarden Tonnen CO₂ an.²⁷ In Deutschland gibt das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) als Umsetzung der Richtlinie 2009/31/EG den Rechtsrahmen für eine mögliche CO₂-Speicherung vor. Mit einer Länder-

klausel wurden den Bundesländern umfangreiche Kompetenzen zur Entscheidung über die Anwendung von CCS auf ihrem Landesgebiet eingeräumt.²⁸ Sie wird, auch aufgrund von seinerzeit starken Vorbehalten in der Bevölkerung und von Verbänden gegenüber CCS, sehr restriktiv gehandhabt, sodass von vielen Akteuren aktuell kein Spielraum für die geologische Speicherung in Deutschland gesehen wird.

CCS-Projekte zielen aus diesen Gründen aktuell meist auf geologische Speicherstätten im Ausland ab. Allein in der Nordsee existieren Speicherkapazitäten von mehr als 200 Milliarden Tonnen CO₂. Insgesamt gibt es in Europa aktuell 22 laufende bzw. geplante großskalige CCS-Projekte.²⁹

In der dena-Leitstudie werden erste Mengen CO₂ bereits bis 2030 abgeschieden und geologisch gespeichert. Bis 2045 erhöht sich die Menge von BECCS und CCS auf 24 Millionen Tonnen CO₂/a. Kumuliert wird bis 2050 eine Menge von 460 Millionen Tonnen CO₂ abgeschieden und 320 Mt CO₂ eingespeichert. Je weniger Senkenleistung durch den LULUCF-Sektor erreicht wird oder je stärker Deutschland in seiner internationalen Verantwortung nach 2045 auch Netto-Negativemissionen erzielen will, desto wichtiger wird die Rolle der langfristigen CO₂-Sequestrierung.

IN-SITU-MINERALISIERUNG

Bei einer Mineralisierung in situ wird das zuvor abgeschiedene CO₂ in Wasser gelöst und mit hohem Druck in dafür geeignete, reaktive Gesteinsschichten (v. a. Basalt) injiziert. Das CO₂ mineralisiert innerhalb von wenigen Jahren zu Gestein und bleibt der Atmosphäre permanent entzogen.

Das Projekt Carbfix in Island ist das weltweit erste Projekt mit diesem Ansatz. Gemeinsam mit dem Unternehmen Climeworks will Carbfix nach ersten Erfolgen ab 2030 jährlich 3 Millionen Tonnen CO₂ verpressen und speichern.

Im September 2021 ging im Rahmen dieses Projekts die Anlage „Orca“ in Betrieb. Mit einer CO₂-Abscheidung von jährlich 4.000 Tonnen ist sie die bisher größte DAC-Anlage weltweit.



²⁶ Loria & Bright, 2021.

²⁷ Prognos-Kurztgutachten, 2021.

²⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), kein Datum.

²⁹ Prognos-Kurztgutachten, 2021.



AKZEPTANZ FÜR CCS

Während der Beitrag natürlicher Senken zum Klimaschutz breite Zustimmung findet, war bezüglich der Rolle technischer CO₂-Senken in Verbindung mit CCS im politischen und gesellschaftlichen Diskurs kein Konsens zu erzielen. CCS wurde dabei oft als Wegbereiter einer möglichen Verlängerung der fossilen Kohleverstromung gesehen und daher von breiten Bevölkerungsschichten klar abgelehnt. Zudem führen auch Sorgen vor möglichen gesundheitlichen Risiken durch Leckagen zu Vorbehalten gegenüber der Speicherung von CO₂ in Deutschland.

Aktuelle Studien (inklusive der hier vorliegenden dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität) machen deutlich, dass zur Erreichung von Klimaneutralität alle Optionen sowohl der direkten THG-Minderung als auch der Abscheidung und langfristigen Speicherung von CO₂ benötigt werden. Hierfür sollte ein Stakeholder-Diskurs über die Notwendigkeit von CCS geführt werden.

Zudem sollte sehr offen zu den verschiedenen Möglichkeiten von CCU/S und BECCU/S kommuniziert werden. Hierbei sind insbesondere folgende vier Aspekte wichtig:

1. Die Notwendigkeit von Negativemissionen muss deutlich kommuniziert werden. Nach der Debatte über Klimaneutralität sollte eine Debatte über Netto-Negativ folgen.
2. Es sollte klar festgelegt werden, dass der Einsatz von CCS nicht zur Verlängerung fossiler Energieerzeugung dient, sondern für den Ausgleich unvermeidbarer Emissionen sowie über BECCS zur Erzielung von Negativemissionen dient. Hierfür ist zentral, dass die Vermeidung von Emissionen und die Abscheidung getrennt betrachtet werden. CCS darf nicht dazu dienen, den Emissionsminderungsdruck in den Sektoren zu senken. Gleichzeitig sollten CCS Kapazitäten jedoch parallel aufgebaut werden. Erreicht werden könnte dies u. a. durch ein separates Entnahme- und Minderungsziel.
3. Die Frage der CO₂-Speicherung in Deutschland (insbesondere an Land) muss differenzierter betrachtet und ggf. neu diskutiert werden. Welche Risiken bestehen? Welche Lagerstätten kommen in Frage? Wenn CO₂-Speicherung in Deutschland ausgeschlossen wird, müssen internationale Kooperationen stärker in Betracht gezogen werden.

10.4 Sicherstellung der notwendigen Negativemissionen für Klimaneutralität

Eine ganzheitliche „Integrierte Senkenstrategie“ für Negativemissionen ist nötig

Für einen glaubhaften Weg zur Klimaneutralität in Deutschland bedarf es einer „Integrierten Senkenstrategie“ in Deutschland und der EU. Diese sollte alle natürlichen und technischen Senken umfassen. Die Senkenstrategie ergänzt damit die „Long-term Low Emissions Development Strategies“ (LT-LEDS) und die „Nationally Determined Contributions“ (NDC) im Sinne einer transparenten Darstellung des Weges zu Netto-Null.

Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Ansätzen von Negativemissionen müssen betrachtet und evaluiert werden. Hier braucht es zudem einen integrierten Ansatz, der in der Summe die größtmöglichen Negativemissionen mit der insgesamt besten Kosten-Nutzen-Betrachtung liefert. Auch positive Nebeneffekte (etwa Biodiversität) oder Nachteile bzw. besondere Herausforderungen (etwa notwendige Energiebedarfe) müssen abgewogen werden. Dabei sollten alle möglichen Negativemissionstechnologien betrachtet werden. Eine nationale Senkenstrategie kann sich auch auf ein definiertes Set an Technologien und Ansätzen stützen, wenn dadurch eine Zielerreichung robust möglich ist. Es ist jedoch anzunehmen, dass gerade zu Beginn keine Technologien auszuschließen sind.

WICHTIGE ABWÄGUNGEN UND UNTERSCHIEDLICHE STRATEGIEN

Trotz der Notwendigkeit eines breiten Einsatzes von Möglichkeiten der Negativemissionen sind verschiedene Ansätze und Strategien zu unterscheiden und Wechselwirkungen zu beachten.

Natürliche Senken werden insbesondere über eine Extensivierung der Waldbewirtschaftung, Wiederaufforstung und Wiedervernässung von organischen Böden erreicht. Die Ausweitung der Senken im LULUCF-Bereich, wie im KSG vorgesehen, beschränkt daher Möglichkeiten für BECCS und reduziert das Biomasseangebot für die Transformation in den anderen Sektoren. Der Beitrag von BECCS in der dena-Leitstudie ist daher geringer als in Vergleichsstudien.

Eine Fokussierung auf BECCS wiederum würde sehr hohe Flächenbedarfe für den Anbau der Biomasse erfordern und zu Nutzungskonkurrenzen führen (Nahrungsmittelproduktion) und möglicherweise ginge eine intensivierte Waldbewirtschaftung zulasten der Senkenleistung im LULUCF-Sektor und weiterer Ziele wie der Biodiversität.

Strategien für Netto-Null im Bereich der Senken sollten auch die CO₂-Speicherung in langlebigen Holzprodukten mit betrachten. Das Potenzial der CO₂-Senke im Holzbau, inklusive der Substitutionseffekte unter Einbezug der Auswirkungen auf die Senke im Wald, ist noch nicht ausreichend erforscht.

Technische CO₂-Senken weisen aktuell noch sehr hohe Kosten auf, werden aber für eine robuste Zielerreichung benötigt. Bei wachsender Bedeutung der Rolle von CCU/S und DAC sind auch Energiebedarfe mit zu bedenken. Eine Fokussierung ausschließlich auf technische Optionen der CO₂-Entnahme mit Schwerpunkt DAC ist aufgrund nicht ausreichender Verfügbarkeit erneuerbarer Energie unrealistisch. Für einen relevanten Beitrag zur Klimaneutralität muss jedoch bereits jetzt begonnen werden, die hohen Kosten zu senken und die Technologien in die breite Anwendung zu bringen.

Die Senkenstrategie muss geeignet sein, spätestens **im Jahr 2045 Netto-Null und danach Netto-Negativ** zu erreichen. Um der globalen Verantwortung und Rolle in der Welt gerecht zu werden, sollte Deutschland über das zur Treibhausgasneutralität zwingende Niveau der Negativemissionen hinausgehen. Durch eine frühe Rolle der Technologieführerschaft kann die Entwicklung in Deutschland und der EU der globalen Entwicklung und dem Hochlauf insbesondere der technischen Senken einen Schub verleihen. Potenziale von Negativemissionen müssen weltweit in enormem Ausmaß gehoben werden, um die Ziele des Pariser Klimaabkommens erreichen zu können und etwa einen Overshoot von Emissionen auszugleichen.

Bei der Senkenstrategie müssen auch Fragen der Permanenz und der adäquaten Bilanzierung der Negativemissionen sowie Kostenbetrachtungen eine Rolle spielen. Diese Strategie muss insbesondere auch eine **Biomassenutzungsstrategie** beinhalten, denn Biomasse ist ein zentraler Faktor in allen Sektoren und ihre Verwendung muss gut abgewogen werden.

Eine gemeinsame Integration in Handelssysteme ist wegen stark unterschiedlicher Kosten bei „technisch vs. natürlich“ nur bedingt durchführbar – aktuell sind CO₂-Senken vom EU-ETS ausgeschlossen, wenn sie in den Bereich der LULUCF-Verordnung fallen. Sie können nur durch Flexibilitätsregelungen zum Teil bei der Lastenteilungsverordnung verwendet werden. Vorerst sind separate Betrachtungen und Instrumente für AFOLU und technische Senken zu bevorzugen, auch wenn die strategische Betrachtung gemeinsam erfolgen sollte.

Durch die enge Verbindung zwischen Landwirtschaft und LULUCF sollten Maßnahmen zusammen gedacht werden und eine einheitliche Zielrichtung verfolgen. Dies ist auch im Hinblick auf die möglicherweise anstehende Integration auf europäischer Ebene ratsam.

Der Hochlauf von Negativemissionstechnologien muss angereizt werden

Im Rahmen der übergeordneten Senkenstrategie muss ein adäquater Mix politischer Instrumente für den **Hochlauf verschiedener Negativemissionstechnologien (NET)** und den Ausbau der Senkenleistung gefunden werden.

Der Aufbau technischer Senken ist eine „**No Regret**“-**Maßnahme**. Senkentechnologien werden benötigt für die Vermeidung von Prozessemissionen (CCU/S), für Negativemissionen zur bilanziellen Erreichung von Klimaneutralität sowie für den Hochlauf einer Wertschöpfungskette für H₂ und seine Derivate. Ein Hochlauf von NETs sollte so früh wie möglich starten, um über Skaleneffekte und Lernkurzen schnell Kostendegressionen zu erreichen und signifikant zu den global notwendigen Negativemissionen beizutragen. Ein Hochlauf für DAC könnte beispielsweise über „Early Adopter“-Märkte wie die Produktion von synthetischen Kraftstoffen (z. B. synthetisches Kerosin für die Luftfahrt) funktionieren.

Anreize für Negativemissionstechnologien können grundsätzlich **auf drei Ebenen** ablaufen:

1. **Kurzfristige Unterstützung** für Forschung und Entwicklung, Pilotprogramme und Innovationsförderungen, um Technologieentwicklung und Preisdegression zu unterstützen.
2. **Temporäre Subventionen** abhängig von den erreichten Negativemissionen (beispielsweise über zweiseitige Auktionen, die eine Abnahme und Preisgarantie erhalten ähnlich dem EEG). Ein separates Mengenziel soll der Differenzierung von Entnahme und Minderung Rechnung tragen. Dabei sind eine Differenzierung nach Technologien bzw. technologiespezifische Zu-/Abschläge denkbar, um auch positive Nebeneffekte zu berücksichtigen.
3. **Einbindung in regulatorisches Regime** oder **Preismechanismus** (z. B. ETS).

Während zu Beginn also die technologiespezifische Förderung und die Subventionierung für den Hochlauf notwendig sind, kann perspektivisch über eine Integration von Negativemissionszertifikaten in den ETS nachgedacht werden.

Bei Überlegungen zur Unterstützung des Hochlaufs von NETs sind auch relevante „Nebeneinnahmequellen“ entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu beachten. BECCS kann Energie und Wärme erzeugen. Maßnahmen in der Waldbewirtschaftung können mit positiven Nebeneffekten auf Biodiversität oder Tourismus einhergehen. Maßnahmen für eine bessere Bodenbewirtschaftung schaffen mit diesen Effekten eine mögliche weitere Einnahmequelle. Nach der Abscheidung kann das CO₂ auch weiterer Wertschöpfung zugeführt werden in langlebigen Produkten (etwa Bauindustrie) oder auch in kurzlebigen Produkten (Powerfuels), wobei dies dann keine Negativemission darstellt.

Zusatzeinnahmen außerhalb von Förderprogrammen für technische Senken können auch über einen **freiwilligen Zertifikatehandel** entstehen. Für Unternehmen bestehen gerade für Negativemissionen aus natürlichen Senken verhältnismäßig kostengünstige Methoden, ihre Klimabilanz auszugleichen. Es gibt bereits eine Reihe von Organisationen, die eine Marktplattform speziell für die CO₂-Entnahme anbieten und gegen verifizierte Maßnahmen zur Erzielung von Senkenleistung Negativemissionszertifikate ausgeben. Die Organisationen fokussieren dabei aktuell stark auf Möglichkeiten im LULUCF-Bereich, bei denen Wege zum Umgang mit der Unsicherheit der Senke gefunden werden müssen. Dies sollte von der Politik als komplementäre Maßnahmen begrüßt, jedoch nicht als Ersatz für staatliches Handeln verstanden werden.

Zentrale Handlungsempfehlungen für die kommende Legislaturperiode



AUFGABE 75

Integrierte Senkenstrategie für Deutschland entwickeln

Die Bundesregierung sollte einen Prozess anstoßen, um eine integrierte Senkenstrategie zu entwickeln, welche die „Long-term Low Emissions Development Strategies (LT-LEDS) und die „Nationally Determined Contributions“ (NDC) ergänzt und einen glaubhaften Weg zu Netto-Null und Netto-Negativ unter Abwägung technischer und natürlicher Senkenpotenziale aufzeigt. Zudem sollte auch auf europäischer Ebene auf die Entwicklung einer übergeordneten grenzüberschreitenden Strategie hingewirkt werden, die die verschiedenen Rahmenbedingungen der europäischen Länder berücksichtigt und eine grenzüberschreitende Planung ermöglicht.

Eine ehrliche Betrachtung der Notwendigkeit von Senken erfordert auch eine robuste Planung. Die Bundesregierung sollte daher in ihren Energiekonzepten mit den Energiebedarfen für Senken planen sowie eine mögliche Zielverfehlung für LULUCF in das Risikomanagement aufnehmen (siehe Kapitel 1 „Gesamtstrategie“).

Zunächst sollte über Pilotprogramme und Innovationsförderungen die Technologieentwicklung vorangetrieben werden, bevor auf mittlere Sicht die erreichten Negativemissionen vergütet werden, beispielsweise über Auktionen mit einer Abnahme- und Preisgarantie.

Die Bundesregierung sollte unterstützende Analysen in Auftrag geben, um passende Instrumente für eine effiziente Unterstützung von technologischen Optionen für Negativemissionen zu finden. Die Bundesregierung sollte sich zudem mittelfristig eine Wissensbasis zu einer möglichen Integration von verschiedenen Negativemissionstechnologien in ein Emissionshandelssystem schaffen.

Eine europäische Strategie und gemeinsame Förderprogramme (etwa über den EU Innovation Fund) würden Planungssicherheit schaffen und Synergien heben. Dies ist insbesondere relevant für die grenzüberschreitende Planung und den Bau von CO₂-Infrastrukturen. Die Bundesregierung sollte für eine europäische Strategie und Planung werben. Fragen der Haftung bei Risiken der CO₂-Sequestrierung sind zu klären.



AUFGABE 76

Rahmenbedingungen für den Hochlauf von Negativemissionstechnologien schaffen

Die Bundesregierung sollte sicherstellen, dass die vermeidbaren Treibhausgasemissionen bis 2045 vollständig reduziert werden und gleichzeitig in CCU/S-Technologien investiert wird, um die residualen Emissionen (z. B. aus dem Zementsektor) abzuscheiden und parallel den Ausbau der technischen CO₂-Entnahmetechnologien zu forcieren. Hierfür ist die Ausweisung eines separaten CO₂-Entnahmeziels nötig und es müssen Anreizsysteme für den Hochlauf von Negativemissionstechnologien mit verifizierbarer Entnahme und Permanenz geschaffen werden.



AUFGABE 77

CO₂-Infrastrukturbedarf prüfen und integrierte Planung vorsehen

Die Bundesregierung sollte prüfen, in welchem Ausmaß eine CO₂-Infrastruktur aufzubauen ist, um das Ziel der Klimaneutralität und den Aufbau eines klimaneutralen Kohlenstoffkreislaufs zu erreichen (z. B. Transportkapazitäten für CCU/S zur Vermeidung von Prozessemissionen). Erste Leitungen werden vermutlich dann geplant, wenn große Punktquellen von anders nicht vermeidbaren CO₂-Emissionen vermieden werden sollen. Perspektivisch wird ein Netz an CO₂-Pipelines benötigt. Der pipelinegebundene Netzausbau könnte durch die Implementierung eines „CO₂-Netzentwicklungsplans“ zu gegebener Zeit koordiniert werden. Dieser sollte auf dem integrierten Systementwicklungsplan aufbauen (siehe Kapitel 2 „Marktdesign“).

Die Bundesregierung sollte prüfen, in welcher Form der Aufbau einer Infrastruktur für CO₂, die sowohl für CCU als auch für CCS notwendig wird, mit der Planung einer Wasserstoffinfrastruktur verzahnt werden kann.

Zudem sollten raumordnerische Planungskompetenzen des Bundes entsprechende Vorzugskorridore für CO₂-Pipeline-Infrastrukturen ermöglichen. Eine erste Annäherung wurde bereits im Vorschlag des Prognos-Gutachtens gemacht.

Die Bundesregierung sollte auf europäischer Ebene auf den Aufbau eines regulatorischen Rahmens für eine grenzüberschreitende CO₂-Infrastruktur hinarbeiten und hier etwa die EU Strategy for Energy System Integration ausfüllen.



AUFGABE 78

Akzeptanz für CCU/S schaffen

Die Bundesregierung sollte in der kommenden Legislaturperiode umfassende Dialog- und Informationsverfahren starten, um über Aufklärung und ehrliche Kommunikation insbesondere die Akzeptanz für CCS zu erhöhen. Ein „Stakeholder-Dialog CCS“ sollte wichtige gesellschaftliche Gruppen und Multiplikatoren zusammenbringen.

Die Bundesregierung sollte in dieser Kommunikation CCU/S als Option für eine Laufzeitverlängerung fossiler Kraftwerke und Technologien ausschließen. Emissionsvermeidung und CO₂-Entnahme müssen daher getrennt betrachtet werden. Außerdem sollte CCU/S deutlich abgegrenzt werden von Methoden des Geoengineerings.



AUFGABE 79

Klimaneutralen Kohlenstoffkreislauf als Zielbild etablieren

Insgesamt sollte auf einen klimaneutralen Kohlenstoffkreislauf hingearbeitet werden, in dem CO₂ entweder wiederverwendet (CCU) oder gespeichert wird (CCS). Die Verwendung von CO₂ in Produkten der chemischen Industrie ist nur dann klimaneutral, wenn anfallender Abfall wiederverwertet oder bei der thermischen Verwertung das CO₂ erneut abgeschieden wird. Der Weg zur CO₂-Kreislaufwirtschaft muss durch entsprechende Verpflichtungen und Förderungen begleitet werden.

Ein klimaneutraler Kohlenstoffkreislauf sollte in einer Kaskade darauf abzielen, Mengen zu reduzieren, Produkte wiederzuverwenden, eine möglichst hohe Recyclingrate zu erreichen und erst im letzten Schritt in die thermische Verwertung zu gehen. Die thermische Verwertung muss durch den Einsatz von CCU/S CO₂ abscheiden und dem Kohlenstoffkreislauf wieder zuführen oder endgültig sequestrieren (siehe auch Kapitel 7 „Industrie“).

Langlebige Produkte mit Kohlenstoffbindung spielen in diesem Kreislauf eine wichtige Rolle. Für die Verwendung von CO₂ in besonders langlebigen Produkten wie Karbonfasern oder als Bestandteil von Zement ist noch viel Forschung und Entwicklung nötig. Die Bundesregierung sollte daher verstärkt in Programme zur Erforschung der langfristigen Wiederverwendung und Speicherung von CO₂ investieren.

Für die Anrechenbarkeit von CCU in weniger langlebigen Produkten muss die gesamte Prozesskette transparent und nachvollziehbar sein. Hierfür werden Fortschritte bei „Monitoring, Reporting and Verification“ (MRV) benötigt. Erst dann kann auch CCU als Negativemission angerechnet werden.

Für Powerfuels wird sich ein internationaler Markt etablieren müssen. Damit Powerfuels aber wirklich klimaneutral sind, muss der gesamte Kohlenstoffkreislauf über Herkunftsnachweise für CO₂ transparent gestaltet sein (zusätzlich zu Herkunftsnachweisen für die eingesetzte Energie). Die Bundesregierung sollte daher auf die Etablierung eines transparenten internationalen Zertifizierungssystems und den Aufbau eines Marktes für Herkunftsnachweise hinarbeiten.



AUFGABE 80

Klimawandelresistente natürliche Senken fördern

Die Bundesregierung sollte auf den gegenwärtigen Trend des Rückgangs der Senkenleistung des LULUCF-Sektors und auf die Zielverschärfungen im KSG mit einem Sofortprogramm zum Schutz und Ausbau natürlicher Senken reagieren.

Die Bundesregierung sollte die Klimawirksamkeit organischer Böden berücksichtigen und mit ambitionierten Moorschutz- und Wiedervernässungsprogrammen auf Bundes- und Länderebene dazu beisteuern, die Emissionen aus der Landnutzung zu reduzieren. Hierfür können auch Instrumente über den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) sowie über den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) genannt werden. Die in dieser Legislaturperiode vom Bundesumweltministerium herausgegebene Moorschutzstrategie sollte zu einer Bundesstrategie weiterentwickelt werden, die in der Lage ist, diese Ziele zu erreichen.

Die Bundesregierung sollte kurz- und mittelfristig die Senkenleistung über LULUCF oder AFOLU separat zu technischen Senken anreizen und regulieren. Wichtig ist zudem der Aufbau einer einheitlichen Zertifizierung und einheitlicher Bilanzierungsregeln, um auch Probleme der Permanenz natürlicher Senken zu adressieren (erst dann könnten natürliche Senken in einen CO₂-Preis-basierten Ansatz überführt werden).

Der LULUCF-Bereich ist gekennzeichnet von hoher Unsicherheit über die erreichten Negativemissionen und ihre Permanenz. Die Bundesregierung sollte sich daher dafür einsetzen, das MIV der natürlichen Kohlenstoffsinken zu verbessern. Hier sollten das Verständnis des LULUCF-Sektors und Methoden zur Fernerkundung von Kohlenstoff-speichern gefördert, Methoden zur Bilanzierung verbessert und damit auch Doppelbilanzierungen (z. B. LULUCF und Energiewirtschaft) verhindert werden.

Die Bundesregierung sollte die Unsicherheit bei natürlichen Senken auch berücksichtigen, indem sie den Aufbau von klimaresilienten Wäldern fördert und gleichzeitig zur Erreichung der erforderlichen Negativemissionen keine Abhängigkeit vom LULUCF-Sektor schafft, indem andere Senkenpotenziale vernachlässigt werden. Klimaresiliente Wälder lassen sich über einen gezielten Umbau zu naturnahen Laub- und Mischwäldern unter Einbeziehung von Klimaprognosen schaffen.

Die Bundesregierung sollte zudem verschiedene Ziele im LULUCF-Sektor (Aufbau Senkenleistung im Wald, Holzwirtschaft, Biomassenutzung, Biodiversität) abwägen und eine Strategie erarbeiten, die im Rahmen der übergeordneten Senkenstrategie zum Gesamtziel bestmöglich beiträgt.

Die Bundesregierung sollte Programme zur Kaskadennutzung insbesondere bei Holzprodukten stärken. Darüber hinaus sollte für Produkte am Ende der Nutzungskaskade (Hygienepapiere, Verpackung) die Verwendung von Primärfasern beendet (auch über ordnungsrechtliche Vorgaben) und das Recycling verpflichtend werden.



AUFGABE 81

Biomassenutzungsstrategie entwickeln

Die Bundesregierung sollte eine Biomassenutzungsstrategie erarbeiten, die sowohl die energetische und stoffliche Nutzung von Biomasse betrachtet als auch die Senkenleistung von Biomasse, um Zielkonflikte beispielsweise hinsichtlich von Flächenverfügbarkeit und Nutzungskonkurrenzen zu untersuchen und zu bewerten.

Dabei sollte herausgearbeitet werden, wo Bioenergie effizient eingesetzt werden kann (z. B. als Hochtemperatur-Prozesswärme in der Industrie). Im Ergebnis sollte eine Abschätzung vorliegen, wie sich das nachhaltig verfügbare Biomass Potenzial auf die Nutzungssektoren aufteilen kann, um die Nutzung von Biomasse weiterhin als zentrale Säule für die kosteneffiziente Defossilisierung zu sichern.

Entscheidend dafür ist die Etablierung eines dauerhaften Monitoringsystems für Biomasse, um die Potenziale sowie die Nutzung von Biomasse zukünftig besser beurteilen zu können. Für den Bereich Bioenergie hat die dena bereits das „Marktmonitoring Bioenergie“ ins Leben gerufen. Zur weiteren Erarbeitung einer Biomassenutzungsstrategie bleibt jedoch ein Stakeholder-Dialog mit den Industrievertretern und politischen Entscheidungsträgern notwendig.

Die gesamte Wertschöpfungskette von der Biomasseerzeugung bis zum Endenergieeinsatz muss zukünftig transparent und nachvollziehbar sein, um eine nachhaltige Bereitstellung für Endanwendungen garantieren zu können. Außerdem sollten Bedingungen für den Import von Biomasse festgesetzt werden, um Verlagerungseffekte wie nicht nachhaltige Biomasseproduktion im Ausland zu vermeiden.



AUFGABE 82

Potenziale von BECCS in der Industrie nutzen

Die Bundesregierung sollte die Rahmenbedingungen schaffen, damit die Abscheidungsleistung und Negativemissionspotenziale (über BECCS) in der Industrie genutzt werden können, da in einigen Branchen sowieso Carbon Capture-Anlagen aufgebaut werden müssen, um Restemissionen zu vermeiden. Dies könnte sich in einer zeitnahen Entwicklung von Anreizsystemen für Negativemissionen (siehe oben) äußern und muss in der Biomassenutzungsstrategie reflektiert werden.

Der Einsatz von Biomasse und BECCS in der energieintensiven Industrie ist aufgrund der notwendigen Hochtemperatur-Wärmebedarfe in Teilen eine „No Regret“-Strategie, solange ausreichend nachhaltige Biomasse zur Verfügung steht.



AUFGABE 83

Transformation der Landwirtschaft beschleunigen

Die Bundesregierung sollte die zentrale Rolle der Landwirtschaft bei der Transformation anerkennen und neben den notwendigen technischen Maßnahmen Anreize und Möglichkeiten schaffen für eine Veränderung klimaschädlicher Konsummuster auch im Bereich landwirtschaftlicher Produkte. Der Konsum tierischer Produkte ist die zentrale Stellschraube in der Landwirtschaft und bedingt maßgeblich die Emissionen aus der Viehhaltung sowie die Flächenverfügbarkeit für den Anbau energetischer Biomasse oder den Aufbau natürlicher Senkenleistung. Neben Informationskampagnen und Kommunikationsmaßnahmen sollte dies durch höhere Standards in der Tierhaltung (und damit höhere Preise) und die Förderung von Fleischalternativen angereizt werden. Dabei sind die Wechselwirkungen im europäischen Binnenmarkt für Agrarprodukte zu berücksichtigen und gegebenenfalls entsprechende Initiativen und Anstrengungen auf EU-Ebene zu forcieren.

Die Bundesregierung sollte über die Anforderungen der Gemeinsamen Agrarpolitik hinausgehen und verstärkte Anreize für klimaschützende und biodiversitätserhöhende Maßnahmen in der Landwirtschaft setzen. Die Bundesregierung sollte in diesem Rahmen die europäische „Carbon Farming Initiative“ unterstützen, die eine neue Einnahmequelle für die Landwirtschaft und Landbesitzer erschließt, welche sich an der Höhe der Klimaschutzwirkung verschiedener Maßnahmen misst, beispielsweise der Erhöhung der Kohlenstoffsенke durch verbesserte Bodenbewirtschaftung.

Die Bundesregierung sollte zudem mit einem bundesweiten Sofortprogramm die Wiedervernässung organischer Böden beschleunigen. Dabei müssen Landwirte für Produktivitätsverluste angemessen entschädigt werden. Klimaschutz darf auch in der Landwirtschaft nicht zu sozialen Spannungen führen.

Die Bundesregierung sollte Maßnahmen ergreifen, um den Kunstdüngereinsatz in der Landwirtschaft zu reduzieren. Dies würde zu niedrigeren Lachgasemissionen und auch einem verringerten Energiebedarf für die Ammoniakherstellung führen (siehe Kapitel 7 „Industrie“). Eine klimafreundliche Alternative könnte die vermehrte Verwendung von Gärresten sein.



AUFGABE 84

Forschung und Entwicklung ausweiten

Viele der in diesem Kapitel diskutierten Technologien und Handlungsoptionen stehen am Anfang ihrer Entwicklung (technologische Senkenoptionen) oder befinden sich in einem sehr komplexen Gefüge von Wechselwirkungen (beispielsweise natürliche Senken). Die Bundesregierung sollte daher die Forschung und die Wissensbildung in diesen Bereichen ausweiten und intensivieren.

Verweis auf weitere relevante Empfehlungen in anderen Kapiteln:

- ▶ **Rohstoffeffizienz erhöhen und Kreislaufwirtschaft für sämtliche nicht erneuerbaren Rohstoffe einführen** (Kapitel 7 „Industrie“)
- ▶ **Das Ziel „Klimaneutralität“ erfordert robuste Planung mit erhöhten Sicherheitspuffern** (Kapitel 1 „Gesamtstrategie“)
- ▶ **Einen Systementwicklungsplan für eine integrierte Infrastrukturplanung gesetzlich einführen** (Kapitel 2 „Marktdesign“)
- ▶ **Internationale Kooperationen für den Import von Wasserstoff und seinen Derivaten aufbauen** (Kapitel 5 „Internationale Einbettung“)

Literaturverzeichnis

AG Energiebilanzen e. V. (2020). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2019* (Stand September 2020). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>

Agentur für Erneuerbare Energien. (2021). *Neue Studie zeigt: Bürgerenergie bleibt zentrale Säule der Energiewende*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.unendlich-viel-energie.de/studie-buergerenergie-bleibt-zentrale-saeule-der-energievende>

Agora Energiewende. (2019). *Studie: Klimaneutrale Industrie*. Von <https://www.agora-energievende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie>

AgoraEnergiewende. (2021). *Abschätzung der Klimabilanz Deutschlands für das Jahr 2021*. 227/04-A-2021/DE, Version 2.0.

Atomgesetz (ATG). (1985). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Gesetze im Internet: <https://www.gesetze-im-internet.de/atg/>

Bekk, A., Held, A., & George, J. (2021). *CO₂-basierte Refinanzierung der Erneuerbaren-Förderung – Welche Konsequenzen ergeben sich für Endverbraucher und Sektorkopplungstechnologien?*

Bellamy, R., & Geden, O. (2019). Govern CO₂ removal from the ground up. *Nature Geoscience* (12), S. 874 – 876.

Boos, P. (2021). *Umsetzung der EU-Richtlinie zur Förderung der Eigenversorgung aus Erneuerbaren Energien und der Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften durch das EEG 2021?* in Auftrag von Bündnis Bürgerenergie e. V. Berlin: BH&W.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). (2019). *Analyse: Blockchain sicher gestalten – Konzepte, Anforderungen, Bewertungen*. Von https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Krypto/Blockchain_Analyse.pdf

Bundesklimaschutzgesetz (KSG). (2019). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Gesetze im Internet: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>

Bundesministerium der Finanzen (BMF). (2021). 28. *Subventionsbericht*. Anhang 6. Von <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Pressemitteilungen/Finanzpolitik/2021/08/2021-08-18-zukunftsorientierte-subventionspolitik-bundesregierung.html>

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). (2018). *Daten und Fakten Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau*. Berlin. Von <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Daten-und-Fakten-Landwirtschaft.html>

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). (2020). *Massive Schäden – Einsatz für die Wälder*. Von <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). (2019). *Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2019_broschuere_bf.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). (2021). *Broschüre: GreenTech made in Germany 2021: Umwelttechnik-Atlas für Deutschland*. Von <https://www.bmu.de/publikation/greentech-made-in-germany-2021-umwelttechnik-atlas-fuer-deutschland>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (27.06.2017). *Was sind eigentlich „benachteiligte Gebiete“?* Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.bmwi-energievende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2017/11/Meldung/direkt-erklart.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2018a). *Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2018*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2018.pdf>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2018b). *Erfahrungsbericht nach § 97 EEG (EEG-Erfahrungsbericht)*. Von https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/eeg-erfahrungsbericht.html

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2018c). *INFOGRAFIK: Energiedaten und -szenarien*. Von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energiegewinnung-und-Energieverbrauch/energiedaten-energiegewinnung-verbrauch-03.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2020). *Nationale Wasserstoffstrategie*. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2021a). *Kohle*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/kohlepolitik.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2021b). *Pressemitteilung: Erste Abschätzungen Stromverbrauch 2030*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/07/20210713-erste-abschaetzungen-stromverbrauch-2030.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2021c). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)* (Stand: Februar 2021). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2021d). *Die Energie der Zukunft. 8. Monitoring-Bericht zur Energiewende – Berichtsjahre 2018 und 2019*. Abgerufen am 1. Oktober von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/achter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (kein Datum). *CCU/CCS: Baustein für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Industrie?* Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html>

Bundesnetzagentur (BNetzA). (2021). *Kraftwerksliste*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW). (2019). *Wie heizt Deutschland?* Abgerufen am 1. Oktober 2021 von https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Heizungsmarkt_final_30.09.2019_3ihF1yL.pdf

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW). (2020). *Erdgasabsatz nach Kundengruppen*. Abgerufen am 9. August 2021 von https://www.bdew.de/media/documents/Erdgasabsatz_nach_Kundengruppen_Vgl_10J_o_jaehrlich_Ki_online_13032020.pdf

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW). (2021). *Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland 2020*. Abgerufen am 10. September 2021 von <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/beheizungsstruktur-wohnungsbestand-deutschland/>

Deutsche Bank AG. (kein Datum). *Mehr Verkehrswende wagen. results.(1-2020)*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Deutsche Bank: <https://www.deutsche-bank.de/ms/results-finanzwissen-fuer-unternehmen/maerkte/01-2020-retten-e-autos-das-klima.html>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2018). *Ergebnispapier der Taskforce Netzentgelte. Impulse zur Weiterentwicklung der Netzentgeltsystematik*. Berlin.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2019). *Analyse: Künstliche Intelligenz für die integrierte Energiewende*. Berlin. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-analyse-kuenstliche-intelligenz-fuer-die-integrierte-energiewende>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2020a). *Analyse: Klimaneutralität*. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-analyse-klimaneutralitaet>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2020b). *Kurzstudie: Vorschlag für die Senkung der EEG-Umlage auf null*. Berlin. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/kurzstudie-vorschlag-fuer-die-senkung-der-eeeg-umlage-auf-null>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2020c). *Zwischenbericht: Der Systementwicklungsplan – Umsetzungsvorschlag für eine integrierte Infrastrukturplanung in Deutschland*. Berlin. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-zwischenbericht-der-systementwicklungsplan>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021a). *Gebäudereport 2021: Fokusthema Ressourcen im Bauwesen*. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-gebaudereport-2021-fokusthemen-fuer-den-klimaschutz>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021b). *Gebäudereport: Fokusthemen für den Klimaschutz*. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-gebaudereport-2021-fokusthemen-fuer-den-klimaschutz>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021c). *Green Recovery der Luftfahrtbranche. Ergebnisbericht des dena Mobility Talks am 24. Juni 2021*. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/green-recovery-der-luftfahrtbranche/>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021d). *Gutachten: Digitale Marktkommunikation für das Energiesystem der Zukunft*. Berlin. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/digitale-marktkommunikation-fuer-das-energiesystem-der-zukunft>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021e). *Positionspapier: Begrenzte Umlage der BEHG-Kosten – Investitionsanreize stärken*. Berlin. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-positionspapier-begrenzte-umlage-der-behg-kosten-investitionsanreize-staerken/>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021f). *Stellungnahme: Entwurf einer BEHG-Carbon-Leakage-Verordnung (BECV) – Klimaschutzmaßnahmen und Beihilfedifferenzierung Entscheidend für das Erreichen der Klimaschutzziele*. Berlin. Von http://dena-de.live.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-STELLUNGNAHME_Entwurf_einer_BEHG-Carbon-Leakage-Verordnung_BECV.pdf

Deutscher Wetterdienst (2021): *Aus extrem wurde normal: Sommer in Deutschland, der Schweiz und Österreich immer heißer*. Pressemitteilung, 02.07.2020, https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20200702_dach.html.

Dröge, S. (2021). *Ein CO₂-Grenzausgleich für den Green Deal der EU. Funktionen, Fakten und Fallstricke*. Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin.

Energieverbrauch. (2017). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Eurostat: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Consumption_of_energy/de

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI). (2021). *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 – Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems*. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Europäische Kommission. (2014). *Pressemitteilung: Gas-Stresstest: Zusammenarbeit ist entscheidend bei Unterbrechung von Erdgaslieferungen*. Von https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_14_116

Europäisches Patentamt. (2019). *Mehr Patentanmeldungen von europäischen Unternehmen und Erfindern*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von https://www.epo.org/news-events/news/2019/20190312_de.html

European Commission. (2021a). *Proposal for a regulation of the european parliament and of the council establishing a carbon border adjustment mechanism (COM(2021) 564 final)*. Von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EnN/TXT/?uri=CELEX%3A520>

European Commission. (2021b). *The European Green Deal Investment Plan and Just Transition Mechanism explained*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_24

European Council. (2021). *Council agrees on new rules for cross-border energy infrastructure*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2021/06/11/council-agrees-on-new-rules-for-cross-border-energy-infrastructure/>

EU-Vertrag (EUV). (1993).

Expertenkommission Forschung und Innovation. (2021). *Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands*. Gutachten 2021. Berlin. Von <https://www.e-fi.de/publikationen/gutachten>

Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“. (2020). *Klimaschutz vorantreiben, Wohlstand stärken – Kommentierung zentraler Handlungsfelder der deutschen Energiewende im europäischen Kontext*.

Expertenrat für Klimafragen. (2021). *Bericht zur Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020*. Freiburg.

Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft. (2021). *Zehn klimaschädliche Subventionen sozial gerecht abbauen – ein Zeitplan*. Eine Studie in Auftrag von Greenpeace, Berlin. Von <https://www.greenpeace.de/klimaschaedliche-subventionen>

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fh ISE). (2021). *Innovative Energietechnologien - Analyse ausgewählter innovativer Technologien zur Energieerzeugung, -umwandlung und -speicherung*. Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Gesamtverband der Aluminiumindustrie e. V. (kein Datum). *Zunehmendes Recycling von Aluminium*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <http://www.aluinfo.de/recycling.html>

Harvey, F., & Tremlett, G. (12. August 2021). *Greenhouse gas emissions must peak within 4 years, says leaked UN report*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von The Guardian: <https://www.theguardian.com/environment/2021/aug/12/greenhouse-gas-emissions-must-peak-within-4-years-says-leaked-un-report>

Hashim, H., & Sudin, M. N. (2020). *Development of Superconducting Magnetic Levitation (Maglev) Train Prototype Controlled Using Arduino*. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering (Volume 9, No. 1.4).

Herzog, J. (2012). Staatsmodernisierung durch Open Innovation: Problemlage, Theoriebildung, Handlungsempfehlungen. *TICC Schriftenreihe*, Band 4. Von <https://www.zu.de/institute/togi/assets/pdf/TICC-120911-TICC-Band-4-Herzberg-Open-Innovation-V2.pdf>

Ifeu. (2021). *Kurzstudie: Gebäude mit der schlechtesten Leistung (Worst performing Buildings) - Klimaschutzpotenzial der unsanierten Gebäude in Deutschland, 2021*. Von https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/bauen/PDF/210505-ifeu-kurzstudie-gebaeude-mit-schlechtester-leistung.pdf

Industrieverband Agrar. (2021). *Modern und verantwortungsbewusst: Landwirtschaft in Deutschland*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.iva.de/verband/landwirtschaft-deutschland>

Industrievereinigung Rollläden-Sonnenschutz-Automation (IVRSA). (2018). *Studie: Rollläden und Sonnenschutz – Optimierung von Energiebedarf und Kom-fort durch Automation*. Von https://ivrsa.de/technische_unterlagen/studien/

Industrievereinigung Rollläden-Sonnenschutz-Automation (IVRSA). (2019). *Effizient Energie sparen: Mit Rollläden und Sonnenschutz*. Industrievereinigung Rollläden-Sonnenschutz-Automation.

Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH (ITG) / Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München (FIW). (2021). *Klimaneutralität 2045 – Transformation des Gebäudesektors*. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global Warming of 1.5 °C*. Von IPCC: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Summary for Policymakers. In V. P. Masson-Delmotte (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Von <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

International Energy Agency (IEA). (2018). *Report: The Future of Cooling*. Von <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>

International Energy Agency (IEA). (2020). *Report: Direct Air Capture. Tracking Report – June 2020*. Von <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>

International Energy Agency (IEA). (2021a). *Report: Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. Von <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

International Energy Agency (IEA). (2021b). *Report: World Energy Balances: Overview. Statistics report – August 2021*. Von <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>

Jacobs University Bremen (JUB) (2021). *Handlungsbedarfe und Weiterentwicklungsoptionen im Energiemarktdesign auf dem Weg zur Klimaneutralität*. Gutachten im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVBG). (2020). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Gesetze im Internet: <https://www.gesetze-im-internet.de/kvbg/>

Kritische Infrastrukturen. (kein Datum). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Kritische_Infrastrukturen

Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW). (2021a). *Innovationen in der deutschen Wirtschaft. Indikatorenbericht zur Innovationserhebung 2020*. Mannheim. Von https://ftp.zew.de/pub/zew-docs/mip/20/mip_2020.pdf?v=16161418

Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW). (2021b). *ZEW-B Branchenreport Innovation*. Von <https://www.zew.de/publikationen/zew-gutachten-und-forschungsberichte/forschungsberichte/innovationen/zew-branchenreport-innovation/>

Leopoldina, Rat für nachhaltige Entwicklungen. (2021). *Positionspapier: Klimaneutralität: Optionen für eine ambitionierte Weichenstellung und Umsetzung*. Von <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/klimaneutralitaet-optionen-fuer-eine-ambitionierte-weichenstellung-und-umsetzung-2021>

Loria, P., & Bright, M. (2021). Lessons captured from 50 years of CCS projects. *The Electricity Journal* (Volume 34, Issue 7). Von <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040619021000890?via%3Dihub>

Lösch, O. (2021). *Projektbasierte Klimaschutzverträge für eine treibhausgasneutrale Industrieproduktion*. Karlsruhe: IREES.

Löschel, A., Erdmann, G., Staiß, F., & Ziesing, H.-J. (2019). *Stellungnahme zum zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2017. Expertenkommission zum Monitoring-Prozess »Energie der Zukunft*. Berlin, Münster, Stuttgart. Von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ewk-stellungnahme.pdf>

Lowe, S. (2021). *The EU's carbon border adjustment mechanism: How to make it work for developing countries*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.cer.eu/publications/archive/policy-brief/2021/eus-carbon-border-adjustment-mechanism-how-make-it-work>

Ludwig-Bülow-Systemtechnik GmbH (LBST) & Deutsche Energie Agentur GmbH (dena). (2017). *E-Fuels Study. The potential of electricity based fuels for low emission transport in the EU*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/mobilitaet/e-fuels-the-potential-of-electricity-based-fuels-for-low-emission-transport-in-the-eu/>

LUT University & Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2020). *Powerfuels in a Renewable Energy World – Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von https://www.powerfuels.org/fileadmin/powerfuels.org/Dokumente/Global_Alliance_Powerfuels_Study_Powerfuels_in_a_Renewable_Energy_World.pdf

Minx et al. (2018). *Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis*. Environmental Research Letters 13.

Nationale Plattform für Mobilität (NPM). (2020). *Flächendeckende öffentliche Ladeinfrastruktur*. Von <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/2download/flaechendeckende-oeffentliche-ladeinfrastruktur/>

News release: *China, US and EU are the largest economies in the world*. (2020). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Eurostat: https://ec.europa.eu/eurostat/documents/portlet_file_entry/2995521/2-19052020-BP-EN.pdf/bb14f7f9-fc26-8aa1-60d4-7c2b509dda8e

Nova-Institute. (2021). *Studie: Turning off the Tap for Fossil Carbon. Future Prospects for a Global Chemical and Derived Material Sector Based on Renewable Carbon*. Von: www.renewable-carbon.eu/publications/product/turning-off-the-tap-for-fossil-carbon-future-prospects-for-a-global-chemical-and-derived-material-sector-based-on-renewable-carbon

Oehmichen, K., Klatt, S., Gerber, K., Polley, H., Röhling, S., & Dunger, K. (2018). *Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung. Szenarienentwicklung, Ergebnisse und Analyse (Thünen report 59)*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig. Von https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen-Report_59.pdf.

Öko-Institut e. V. (2021a). *Hochrechnung der deutschen THG Emissionen 2021*. Öko-Institut e. V.

Öko-Institut e. V. (2021b). *Natürliche Senken – Die Potenziale natürlicher Ökosysteme zur Vermeidung von THG-Emissionen und Speicherung von Kohlenstoff*. Modellierung sowie Analyse natürlicher Senken. Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Perner, J. et al. (2018). *Synthetische Energieträger – Perspektiven für die Deutsche Wirtschaft und den internationalen Handel. Eine Untersuchung der Marktpotentiale, Investitions- und Beschäftigungseffekte. Eine Studie von frontier economics und iw*. frontier economics und iw. Von https://www.frontier-economics.com/media/2504/frontier-iw-studie_ptx_markt_und_beschaeftigungsperspektiven.pdf

Pesch, R. et al. (2019). Ganzjährige Nutzung von Erdwärmesonden zum Heizen und Kühlen von Gebäuden mit Reversibler Wärmepumpe oder Kompressionkältemaschine. In *Building Performance in a Changing Environment* (S. 142–149).

Prognos AG. (2021). *Technische CO₂-Senken – Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO₂-Negativemissionstechnologien*. Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut. (2020). *Klimaneutrales Deutschland 2050*. im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Stiftung Klimaneutralität.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045*. im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Stiftung Klimaneutralität.

Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von OurWorldInData: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>

Roser et al. (2013). *Life Expectancy*. Von OurWorldInData: <https://ourworldindata.org/life-expectancy>

Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): *Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO₂-Budget*, Abgerufen am 1 Oktober 2021 von https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Kap_02_Pariser_Klimaziele.pdf?__blob=publicationFile&v=21

Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. (2020). *Jahresgutachten: Corona-Krise gemeinsam bewältigen, Resilienz und Wachstum stärken*. Von <https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/jahresgutachten-2020.html>

Setton, D., & Renn, O. (2021). Wie fair ist die Energiewende? Ergebnisse einer Paneluntersuchung zur wahrgenommenen Gerechtigkeit bei der Kostenverteilung. *info Schnelldienst*, S. 22 – 24.

Siebel, T. (2021). *USA und China investieren mehr in Forschung als die EU*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.springerprofessional.de/unternehmen---institutionen/werkstofftechnik/usa-und-china-investieren-mehr-in-forschung-als-die-eu/19019602>

Simon, F. (2021). *Brussels rules out double carbon compensation for EU steelmakers*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von [euractiv](https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/brussels-rules-out-double-carbon-compensation-for-eu-steelmakers/): <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/brussels-rules-out-double-carbon-compensation-for-eu-steelmakers/>

Sprin-D. (kein Datum). *Den Höhenwind ernten: Die Binnen-Windanlage der Zukunft*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.sprind.org/de/projekte/bendix/>

Statista. (2020). *Umsätze der wichtigsten Industriebranchen 2017–2019*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Statista: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/241480/umfrage/umsaetze-der-wichtigsten-industriebranchen-in-deutschland/>

Statista. (2021a). *Economy of Europe – Statistics & Facts*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Statista: <https://www.statista.com/topics/7046/economy-of-europe/>

Statista. (2021b). *Emissions in the EU – Statistics & Facts*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Statista: <https://www.statista.com/topics/4958/emissions-in-the-european-union/>

Statista. (2021c). *Europäische Union: Bruttoinlandsprodukt (BIP) in den Mitgliedstaaten der EU im Jahr 2020*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Statista: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/188776/umfrage/bruttoinlandsprodukt-bip-in-den-eu-laendern/>

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2020). *Handwerkszählung 2018*.

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2021a). Baugewerbe: Tätige Personen und Umsatz der Betriebe. *Fachserie 4 Reihe 5.1 – 2020*. Von https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Baugewerbe-Struktur/personen-umsatz-baugewerbe-2040510207004.pdf?__blob=publicationFile

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2021b). *Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) 1998–2018; Harmonisierter Verbraucherpreisindex Deutschland*.

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2021c). *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen - Inlandsproduktberechnung, Lange Reihe ab 1970*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Inlandsprodukt/inlandsprodukt-lange-reihen-pdf-2180150.pdf>

Stifterverband. (2021). *Forschung und Entwicklung in der Wirtschaft 2019*. Essen: SV Wissenschaftsstatistik GmbH. Von <https://www.stifterverband.org/fue-facts-2019>

Stiftung Umweltenergierecht (SUER). (2021a). *Eine EU CO₂-Bepreisung für internationale Importe. Europa- und völkerrechtliche Einordnung eines CO₂-Grenzausgleichssystems (Carbon Border Adjustment Mechanism CBAM) vor dem Hintergrund der weltweiten Klimaschutzbemühung*. Von https://stiftung-umweltenergierecht.de/wp-content/uploads/2021/06/Stiftung_Umweltenergierecht_WueBe-richte_52_Hintergrundpapier_CBAM-3.pdf

Stiftung Umweltenergierecht (SUER). (2021b). *Wirtschaft und Europa auf dem Weg zur Klimaneutralität – Der Green Deal der EU und seine Bedeutung für Deutschlands Energiewende*. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Swiss Re Institute. (2021). *Report: The insurance rationale for carbon removal solutions*. Zürich. Von <https://www.swissre.com/institute/research/topics-and-risk-dialogues/climate-and-natural-catastrophe-risk/expertise-publication-carbon-removal-technologies.html>

The EU in the world – 2020 edition. (2020). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/10934584/KS-EX-20-001-EN-N.pdf/8ac3b640-0c7e-65e2-9f79-d03f00169e17?t=1590936683000>

The next generation of magnetic-levitation trains has been presented in China. (2021). Abgerufen am 1. Oktober 2021 von Ndion: <https://ndion.de/en/the-next-generation-of-magnetic-levitation-trains-has-been-presented-in-china/>

Umweltbundesamt (UBA). (2020a). *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten>

Umweltbundesamt (UBA). (2020b). *Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#grosste-emittenten>

Umweltbundesamt (UBA). (2020c). *Nationaler Inventurbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018*.

Umweltbundesamt (UBA). (2021a). *Abschlussbericht: Optionen für ökonomische Instrumente des Ressourcenschutzes*. Von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-02-25_texte_31-2021_optionen_oekonomische_instrumente_ressourcenschutz.pdf

Umweltbundesamt (UBA). (2021b). *Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft>

Umweltbundesamt (UBA). (2021c). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2019. Climate Change (43/2021)*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-6>

Umweltbundesamt (UBA). (2021d). *Erneuerbare Energien in Zahlen*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#emissionsbilanz>

Umweltbundesamt (UBA). (2021e). *Grafik: Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte*. Abgerufen am 10. September 2021 von <https://www.umweltbundesamt.de/bild/anteil-erneuerbarer-energien-am-endenergieverbrauch-0>

Umweltbundesamt (UBA). (2021f). *Indikator: Treibhausgas-Emissionen der Industrie*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-treibhausgas-emissionen-der-industrie>

Umweltbundesamt (UBA). (2021g). *Treibhausgasemissionen sinken 2020 um 8,7 Prozent*. Von Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-sinken-2020-um-87-prozent>

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI). (2021). *Industrieland Deutschland*. Von <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/industrieland-deutschland-daten-fakten-bedeutung-deutsche-industrie.pdf>

Verein Deutscher Zementwerke (VDZ). (2020). *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zement-industrie*. Von <https://www.vdz-online.de/dekarbonisierung>

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (WI). (2021). *Gesellschaftliche Implikationen einer klimaneutralen Entwicklung. Begleitung des Querschnittsmoduls Transformation*. Begleitung des Querschnittsmoduls Transformation. Gutachten im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Zentralverband des deutschen Handwerks (ZDH). (2019). *Fachkräfte (gewinnen & halten): Ergebnisse einer Umfrage unter Handwerksbetrieben im dritten Quartal 2018*. Berlin.

Zentralverband des deutschen Handwerks (ZDH). (2021). *Betriebsnachfolge im Handwerk: Ergebnisse einer Befragung unter Handwerksbetrieben im dritten Quartal 2020*. Berlin.



dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität

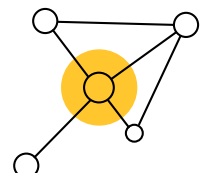
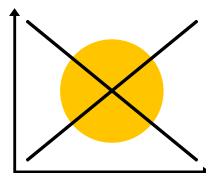
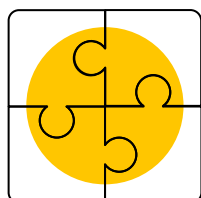
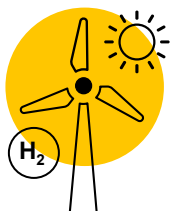
Modellierungs- zusammenfassung der Gutachter

dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität

Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems

Zusammenfassung, Oktober 2021

Im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur (dena)



**Energiewirtschaftliches Institut an der
Universität zu Köln gGmbH (EWI)**

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a
50827 Köln

Tel.: +49 (0)221 277 29-100

Fax: +49 (0)221 277 29-400

<https://www.ewi.uni-koeln.de>

EWI (Hauptgutachter)

Max Gierkink (Projektleitung)
Dr. Johannes Wagner (Projektleitung)
Berit Hanna Czock
Arne Lilienkamp
Michael Moritz
Lena Pickert
Tobias Sprenger
Jonas Zinke

**Forschungsinstitut für Wärmeschutz
e. V. München (Fachgutachter Gebäude)**

Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm

**Institut für Technische Gebäudeaus-
rüstung Dresden Forschung und Anwen-
dung GmbH (Fachgutachter Gebäude)**

Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz

Dr.-Ing. Bernadetta Winiewska

ef.Ruhr (Fachgutachter Stromnetze)

Jonas von Haebler

Maik Tretschock

Dr.-Ing. Christian Wagner

Dr.-Ing. Marco Greve

Bitte zitieren als

EWI/ITG/FIW/ef.Ruhr (2021). dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Zusammenfassung. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln ist eine gemeinnützige GmbH, die sich der anwendungsnahen Forschung in der Energieökonomik und Energie-Wirtschaftsinformatik widmet und Beratungsprojekte für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft durchführt. Der wissenschaftliche Betrieb wird finanziert durch Einnahmen aus Forschungsprojekten, Analysen und Gutachten für öffentliche und privatwirtschaftliche Auftraggeber. Eine Einflussnahme auf die wissenschaftliche Arbeit oder die Beratungstätigkeit des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln durch Dritte ist ausgeschlossen. Die Haftung für Folgeschäden, insbesondere für entgangenen Gewinn oder den Ersatz von Schäden Dritter, ist ausgeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

1	Die Ergebnisse auf einen Blick	1
2	Studienprozess und Szenarienbeschreibung	5
3	Hauptszenario Klimaneutralität 100	8
	3.1 Verkehrssektor	8
	3.2 Industriesektor	11
	3.3 Gebäudesektor	16
	3.4 Energiesektor	21
	3.5 Treibhausgasemissionen und Senken	25
	3.6 Energieinfrastrukturen	27
4	Pfadausprägungen	31
	Literaturverzeichnis	39
	Abkürzungsverzeichnis	40
	Abbildungsverzeichnis	42

1 Die Ergebnisse auf einen Blick

In der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität wird das Szenario *Klimaneutralität 100* (KN100) entwickelt. Das Szenario untersucht, wie das Ziel der Klimaneutralität in Deutschland bis zum Jahr 2045 erreicht werden könnte. Die Entwicklungen zeigen eine systematische und im Rahmen der Modellgrenzen konsistente Transformation der Endverbrauchssektoren und des Energiesystems auf. Das Szenario orientiert sich maßgeblich am Klimaschutzgesetz 2021 (KSG) und berücksichtigt neben sektorspezifischen Treibhausgasminderungszielen für das Jahr 2030 auch die sektorenübergreifenden Minderungsziele in den Folgejahren.

Für die drei Endverbrauchssektoren Industrie, Verkehr und Gebäude¹ werden auf Basis von Bottom-Up-Modellen Transformationspfade für die sektoralen Energieverbräuche entwickelt. Die Bereitstellung der aus den exogenen Transformationspfaden resultierenden Endenergieverbräuche wird mit dem Energiesystemmodell des EWI optimiert.

Der Endenergieverbrauch sinkt bis 2045 um 41 Prozent. Erdgas, Öle und Kohle werden im Zeitverlauf durch Strom und Wasserstoff ersetzt.

Im Szenario KN100 sinkt der aggregierte Endenergieverbrauch bis 2030 um etwa 21 % und bis 2045 um etwa 41 % gegenüber 2018. Für den Rückgang des Energieverbrauchs sind maßgeblich der Einsatz innovativer Technologien, Energieeffizienzsteigerungen sowie Veränderungen im Konsum- und Mobilitätsverhalten verantwortlich. Es erfolgt eine Verlagerung weg von konventionellen Energieträgern und hin zu Strom und Wasserstoff. Bereits bis 2030 geht die Nachfrage nach Kohle, Ölen und methanbasierten Gasen² um 39 % gegenüber 2018 zurück. Die Nachfrage nach Ölen (-42 %) sinkt überproportional, da im Verkehr weniger Kraftstoffe wie Diesel und Benzin (-38 %) sowie im Gebäudesektor weniger Heizöl (-50 %) nachgefragt werden. Im Jahr 2045 haben Öle und methanbasierte Gase noch einen Anteil von 18 % an der

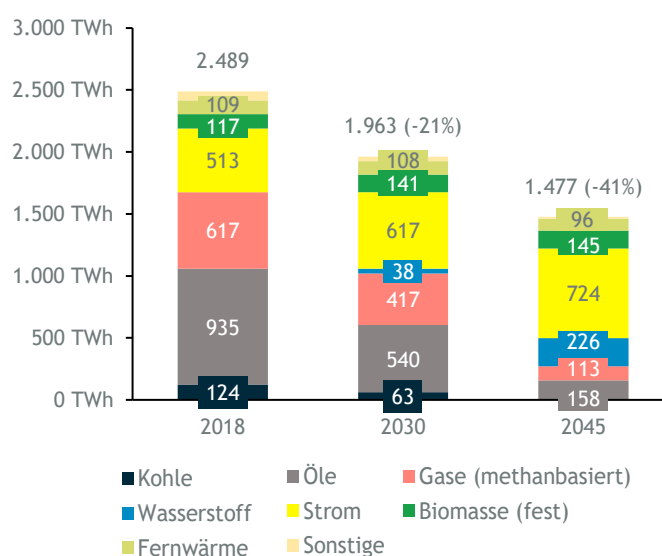


Abbildung 1: Aggregierter Endenergieverbrauch der Verbrauchssektoren nach Energieträgern

¹ Die Modellierung des Gebäudesektors wird vom Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden (ITG) und vom Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München (FIW) durchgeführt.

² Öle sind inklusive synthetischer und biogener Anteile; methanbasierte Gase sind inklusive synthetischer und biogener Anteile, exklusive Wasserstoff

Endenergienachfrage. Die Nachfrage nach Fernwärme und nach festen biogenen Brennstoffen bleiben in etwa auf heutigem Niveau.

Im **Verkehrssektor** findet eine teilweise Verlagerung (z. B. von Inlandsflügen oder PKW-Verkehr) auf umweltfreundlichere Verkehrsträger wie den öffentlichen Straßenpersonennahverkehr (ÖSPV) oder den Schienenverkehr statt. Zusätzlich steigt der Anteil von Elektrofahrzeugen deutlich an. Bis 2030 sind bereits ca. 14 Mio. (30 % Anteil am Fahrzeugbestand) im Jahr 2045 ca. 35 Mio. (93 %) elektrische PKW im deutschen Fahrzeugbestand. Im Schwerlastverkehr kommt ab 2030 verstärkt Wasserstoff zum Einsatz.

In der **Industrie** beeinflussen innovative Prozesstechnologien, Energieeffizienzsteigerungen sowie Veränderungen der Produktionsmengen und höhere Recyclingquoten den Endenergieverbrauch. Beispielsweise führt die wasserstoffbasierte Direktreduktion zu signifikanten Einsparungen von Treibhausgasemissionen in der Stahlproduktion und substituiert den Einsatz von Kohle in der Hochofenroute. Effizienzsteigerungen tragen branchenübergreifend maßgeblich zu einer Reduktion des Endenergieverbrauchs bei. Durch den Wechsel auf strombasierte Technologien in Branchen mit einem hohen Bedarf an Niedrigtemperaturwärme oder den Einsatz innovativer stromintensiver Produktionsverfahren, beispielsweise in der Chemieindustrie, steigt der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch der Industrie von 31 % im Jahr 2018 auf 54 % im Jahr 2045.

Im **Gebäudesektor** verdoppelt sich die energetische Sanierungsrate von heute jährlich 0,85 % auf jährlich 1,9 % und ineffiziente Heizungen werden sukzessive ausgetauscht. Hierdurch sinken vor allem die Verbräuche von Heizöl und methanbasierten Gasen. Ab 2030 wird im Gebäudesektor Wasserstoff verbraucht, zunächst im Rahmen einer Beimischung von Wasserstoff in die Methanverteilnetze. Bis zum Jahr 2045 steigt der Wasserstoffverbrauch auf 79 TWh, vor allem als direkte Nachfrage von mit Wasserstoff betriebenen Gasheizungen. Im Jahr 2030 werden in Wohngebäuden ca. 4,1 Mio. und im Jahr 2045 ca. 9 Mio. Wärmepumpen eingesetzt. Der Stromverbrauch des Gebäudesektors steigt bis 2045 um 10 % an und beträgt ca. 303 TWh.

Strom wird zum wichtigsten Endenergieträger und bildet die Grundlage für die nationale Wasserstoffwirtschaft.

Durch die Elektrifizierung von Endenergieanwendungen und die sinkende Nachfrage nach konventionellen Energieträgern steigt der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch von 21 % im Jahr 2018 auf 31 % im Jahr 2030. Im Jahr 2045 ist Strom mit einem Anteil von 49 % der meistgenutzte Endenergieträger. Neben dem Zuwachs bei elektrischen Anwendungen wie Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen sowie der Elektrifizierung von Industrieprozessen treibt auch der Hochlauf der deutschen Wasserstoffwirtschaft die Stromnachfrage. Für die Erzeugung von 10 TWh grünem Wasserstoff werden im Jahr 2030 ca. 14 TWh Strom benötigt. Im Jahr 2045 liegt der Strombedarf für die Elektrolyse in Deutschland bei 88 TWh. Insgesamt steigt die **Bruttostromnachfrage** bis 2030 auf 698 TWh und bis 2045 auf 910 TWh.

Die Stromerzeugung wird bereits 2040 nahezu klimaneutral. Bei geringer Einspeisung aus erneuerbaren Energien werden wasserstofffähige Gaskraftwerke eingesetzt.

Um das sektorale Klimaziel der Energiewirtschaft im Jahr 2030 sowie das langfristige Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, wird die **Stromerzeugung** bereits bis 2030 umfassend dekarbonisiert. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien verdoppelt sich etwa von 242 TWh im Jahr 2019 auf 475 TWh im Jahr 2030 und erreicht 2030 einen Anteil von 68 % an der Bruttostromnachfrage. Der Kohleausstieg wird marktgetrieben beschleunigt. 2030 sind noch 8 GW Steinkohle und 4 GW Braunkohle am Markt. Im Jahr 2030 wird der starke Rückgang bei der konventionellen Stromerzeugung teilweise durch einen Anstieg der Gasverstromung ausgeglichen, welche gegenüber 2019 um fast 60 % steigt. Dazu werden bis 2030 ca. 15 GW zusätzliche Gaskraftwerkskapazität installiert. Die Kraftwerke sind bereits wasserstofffähig bzw. werden mit Option zur Nachrüstung gebaut. Aufgrund des Rückgangs bei der konventionellen Stromerzeugung wird Deutschland ab 2030 vom Netto-Stromexporteur zum Netto-Stromimporteur.

Langfristig gewinnt die Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie weiter an Bedeutung und erreicht 2045 einen Anteil von 85 % an der Bruttostromnachfrage. Wasserstofffähige Gaskraftwerke übernehmen zunehmend eine Backupfunktion für Zeiten geringer Einspeisung aus erneuerbaren Energien (EE). Ab dem Jahr 2040 wird in diesen Kraftwerken überwiegend Wasserstoff eingesetzt, sodass nur noch geringe Restemissionen aus der Gasverstromung anfallen. Diese werden durch negative Emissionen an Biomasse-Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), d. h. mithilfe von BECCS (Bio-Energy Carbon Capture and Storage), teilweise kompensiert.

Wasserstoff und Wasserstoff-Folgeprodukte sind für das Ziel der Klimaneutralität in den Endverbrauchssektoren und im Energiesektor von zentraler Bedeutung.

Neben Strom nehmen auch Wasserstoff sowie Wasserstoff-Folgeprodukte, welche vor allem durch Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt werden, im KN100-Szenario eine zentrale Rolle ein. Grüner und blauer Wasserstoff sowie synthetisches Power-to-Liquid ermöglichen die Vermeidung von Emissionen vor allem bei Anwendungen, die nicht oder nur zu hohen Kosten elektrifiziert werden können. Dies betrifft beispielsweise die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme in Industrieprozessen oder den Schwerlast- bzw. Flugverkehr. Weiterhin können diese Energieträger über große Distanzen transportiert werden. Dadurch ist der Import aus Regionen mit besseren Standorten zur Erzeugung von erneuerbarem Strom und damit günstigeren Bedingungen für die elektrolysebasierte Wasserstoffproduktion möglich.

Im Szenario KN100 entwickelt sich in Deutschland bereits in den 2020er Jahren eine schnell wachsende Wasserstoffwirtschaft. Im Jahr 2030 werden 66 TWh klimafreundlicher **Wasserstoff** eingesetzt, was etwa 3 % der deutschen Endenergienachfrage entspricht. Davon werden ca. 10 TWh grüner Wasserstoff in Deutschland produziert, der Rest wird als blauer oder grüner Wasserstoff aus dem europäischen Ausland importiert. Bis 2045 wächst der Wasserstoffmarkt um 10-15 % pro Jahr. In diesem Zuge wird bis 2030 die Grundlage für eine Transportnetzinfrastruktur aufgebaut und in den 2030er-Jahren entstehen erste Wasserstoffverteilnetze. Im Jahr 2045 hat grüner Wasserstoff mit 226 TWh einen Anteil von 15 % am Endenergieverbrauch. Im Energiesektor

werden vor allem zur Strom- und Wärmeerzeugung zusätzlich 130 TWh eingesetzt. Hinzu kommen nichtenergetische Nachfragen im Industriesektor von 103 TWh. Im Zeitverlauf nehmen sowohl die inländische Erzeugung als auch Importe deutlich zu. Langfristig wird Wasserstoff vor allem aus dem Ausland per Pipeline importiert. Die Importe stammen sowohl aus der EU als auch aus Nordafrika, Osteuropa (Russland und Ukraine) sowie der Türkei.

Weil nicht alle Anwendungen mit Wasserstoff betrieben oder elektrifiziert werden können, wird Deutschland auch langfristig auf flüssige (ölbasierte) Energieträger und Methan angewiesen sein. Diese müssen in Zukunft klimaneutral in Form von synthetischen oder biogenen Energieträgern bereitgestellt werden.

Im KN100-Szenario ist das bedeutendste Anwendungsfeld für **Power-to-Liquid** (PtL) der Verkehrssektor, vor allem die Luftfahrt. Dort werden bereits 2030 ca. 3 TWh PtL-Kerosin eingesetzt. Auch in 2045 hat die Luftfahrt den größten Anteil. Hinzu kommt die Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen des Straßen-, Schienen-, und Binnenschiffsverkehrs sowie der Bedarf nach grünem Naphtha zur nichtenergetischen Nutzung in der Industrie. Im Jahr 2045 werden ca. 198 TWh PtL-Energieträger eingesetzt.

Die Herstellung von PtL-Energieträgern benötigt große Mengen erneuerbaren Stroms. Die Produktionskosten sind in Deutschland aufgrund der geringeren EE-Verfügbarkeiten vergleichsweise hoch. Weiterhin ist die verfügbare Fläche für den Zubau erneuerbarer Energien begrenzt und PtL-Energieträger können aufgrund ihrer hohen Energiedichte und ihres flüssigen Aggregatzustands günstig transportiert werden. Im KN100-Szenario werden diese daher aus weiter entfernten Weltregionen, vor allem aus dem mittleren Osten, Südamerika und Australien importiert.

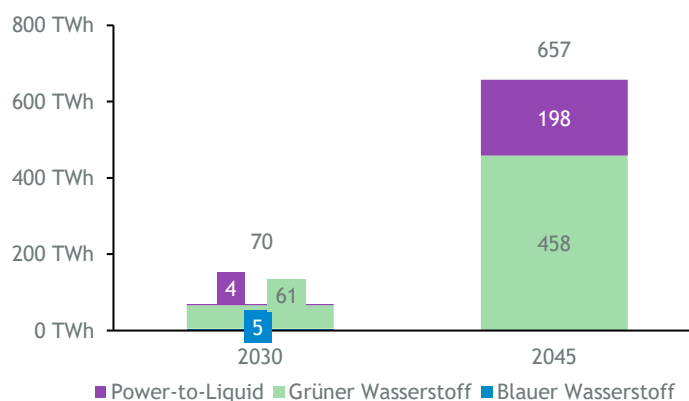


Abbildung 2: Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukten

Deutschland ist 2045 mithilfe technischer und natürlicher Senken klimaneutral.

Die Gesamtemissionen sinken bis 2030 um 65 % gegenüber 1990. Die Endverbrauchssektoren Gebäude, Verkehr und Industrie erreichen ihre Emissionsminderungsziele gemäß den Vorgaben des Klimaschutzgesetzes. Der Energiesektor kann sein Ziel, vor allem aufgrund des beschleunigten Kohleausstiegs, übererfüllen.³

³ In der Landwirtschaft werden im Jahr 2030 noch 58 Mt CO₂e (-50 % ggü. 1990) emittiert und das Reduktionsziel von 56 Mt CO₂e verfehlt. Auch im Sektor Abfall und sonstige wird das Sektorziel um ca. 1 Mt CO₂e verfehlt. Die exogenen Emissionspfade für diese Sektoren basieren auf der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2045* (Prognos, Öko-Institut & Wuppertal-Institut, 2021). Die Zielverfehlung wird im KN100-Szenario durch den Energiesektor kompensiert.

Im Jahr 2045 wird Klimaneutralität erreicht. Der Sektor Verkehr wird vollständig klimaneutral. In den Sektoren Gebäude und Industrie verbleiben noch geringe Netto-Restemissionen von 2 bzw. 4 Mt CO₂e. In der Industrie werden verbleibende Prozessemissionen und energetische Emissionen nicht vollständig durch **technische Senken** und CO₂-Vermeidungsoptionen kompensiert. Im Gebäudesektor wird noch in geringem Umfang fossiles Erdgas eingesetzt. Der Energiesektor hat durch den Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) an Biomasse-KWK- und Müllverbrennungsanlagen eine Netto-Negativbilanz und kann dadurch die Restemissionen aus anderen Sektoren ausgleichen. Im Landwirtschaftssektor verbleiben im Jahr 2045 Restemissionen in Höhe von 42 Mt CO₂e. Diese werden durch die Senkenleistung von Wäldern und anderen **natürlichen Senken** im LULUCF-Sektor⁴ in Höhe von 41 Mt CO₂e kompensiert.

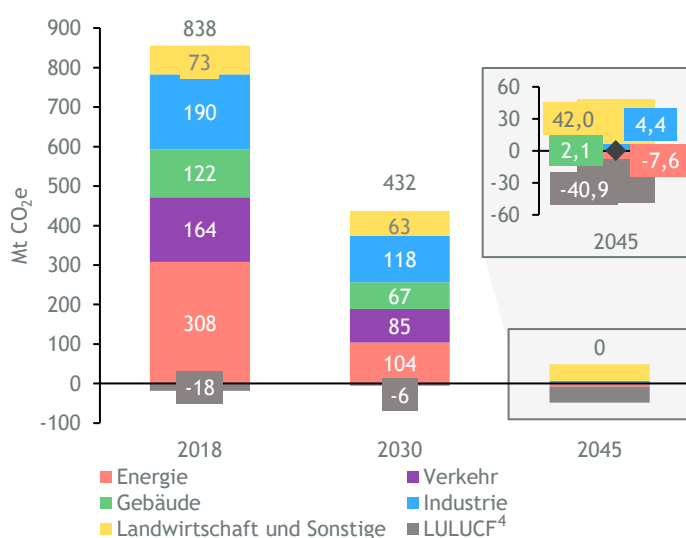


Abbildung 3: Entwicklung der Netto-Treibhausgasemissionen

2 Studienprozess und Szenarienbeschreibung

Die dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität verfolgt einen **Multi-Stakeholder-Ansatz**. Das Zusammenbringen von wissenschaftlicher Modellierung, fachlichem Austausch mit gesellschaftlichen Akteuren und branchenspezifischer Praxiserfahrung ist ein wichtiges Merkmal der Studie. Damit soll eine fundierte Basis für den gesellschaftlichen und politischen Diskurs zur Klimaneutralität in Deutschland bereitgestellt werden.

Wie auch die dena-Leitstudie Integrierte Energiewende aus dem Jahr 2018 verfolgt die vorliegende Studie einen Bottom-Up-Ansatz zur Ermittlung von **Transformationspfaden**. Für die Endverbrauchssektoren Industrie, Verkehr und Gebäude werden Bottom-Up-Modelle entwickelt, um einen möglichst konsistenten Pfad zur Erreichung der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung abzuleiten. Die Modellierung des Gebäudesektors wird dabei von dem Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH (ITG) und dem

⁴ Die Modellierung für das Kurzgutachten basiert auf den Schätzungen der Treibhausgasemissionen des Jahres 2018 aus der CRF-Submission des Jahres 2020 (UNFCCC, 2020), um mit der ausstehenden Projektion der Bundesregierung zum LULUCF-Sektor (Land Use, Land Use Change and Forestry) konsistent zu sein. In der Submission aus dem Jahr 2020 wird für die Netto-Emissionen des LULUCF-Sektors ein Wert von -29 Mt CO₂e ausgewiesen. Hier zitiert ist die Schätzung aus der CRF-Submission des Jahres 2021 (UNFCCC, 2021), die einen Wert von -18,29 Mt CO₂e ausweist.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München (FIW) durchgeführt. Verkehrs- und Industriesektor werden von EWI modelliert. Der exogene Transformationspfad des LULUCF-Sektors wird vom Öko-Institut entwickelt.

Aus den exogenen Transformationspfaden der Endverbrauchssektoren resultieren Bedarfe nach Energieträgern und Energiemengen. Die **Energiesystemmodellierung** des EWI ermittelt darauf aufbauend die kostenminimale Bereitstellung dieser Bedarfe. Auf Basis der Ergebnisse der Energiesystemmodellierung werden die exogenen Transformationspfade validiert.

Sektorspezifische **Annahmen und Rahmenbedingungen** werden aus wissenschaftlichen Quellen und Fachliteratur abgeleitet und im Rahmen des Multi-Stakeholder-Ansatzes mit den Expertinnen und Experten der dena, der Praxisexpertise aus den Partnerunternehmen und -verbänden sowie mit dem Fachwissen des Projektbeirats validiert. Die finalen Parameter werden von den wissenschaftlichen Gutachtern festgelegt. Für die Definition ausgewählter Annahmen werden zusätzlich Experteninterviews, bspw. mit Industrievertreterinnen und -vertretern, geführt. Dies betrifft beispielsweise innovative neue Produktionstechnologien, da diese teilweise noch im frühen Versuchsstadium sind und die Verfügbarkeit von öffentlichen Quellen begrenzt ist.

Eine Übersicht der zugrundeliegenden Parameter und Annahmen wird begleitend zu diesem Gutachten zum Download bereitgestellt.

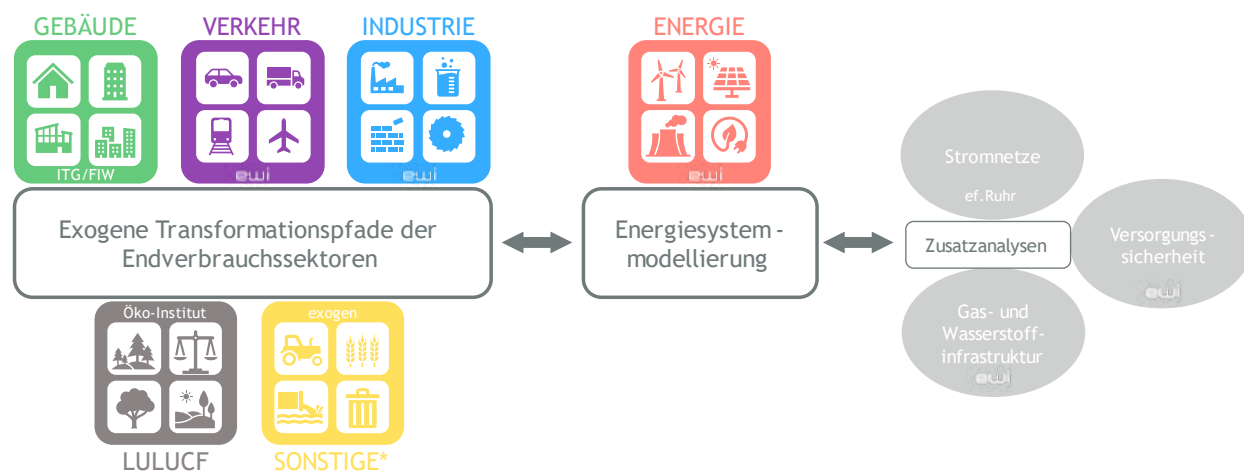


Abbildung 4: Übersicht zum methodischen Vorgehen bei der Modellierung

* Sonstige umfasst Landwirtschaft, Abfall und Sonstige

Für eine fundierte Entwicklung der Transformationspfade werden darüber hinaus **vertiefende wissenschaftliche Zusatzanalysen** zur Entwicklung der Stromnetze (Übertragungs- und Verteilnetze) von der ef.Ruhr sowie „Entwicklung der Gas- und Wasserstoffinfrastruktur“ und „Versorgungssicherheit in Extremwetterperioden“ vom EWI eingebunden.

Das **Hauptszenario** dieser Studie, *Klimaneutralität 100* (KN100), untersucht wie das Ziel der Klimaneutralität in Deutschland bis zum Jahr 2045 erreicht werden könnte. Das KN100 beschreibt eine konsistente Transformation der Endverbrauchssektoren und des Energiesystems unter bestmöglicher Berücksichtigung des aktuell verfügbaren und relevanten Wissens bezüglich

Abhängigkeiten und Wechselwirkungen verschiedener Systemkomponenten, Innovationsprozessen sowie techno-ökonomischer und gesellschaftlicher Entwicklungen.

Neben dem übergeordneten Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045, orientiert sich das KN100 maßgeblich an den im Klimaschutzgesetz 2021 verankerten nationalen Klimazielen. Sowohl die **sektorspezifischen Klimaziele für das Jahr 2030** werden (mit Ausnahme der Landwirtschaft⁵) erreicht als auch die sektorübergreifenden Minderungsziele für die Jahre 2030 und 2040.

Das Szenario KN100 beschreibt eine konsistente zukünftige Entwicklung zur Erreichung der Klimaneutralität im Jahr 2045. Dafür wird eine Reihe von Annahmen, insbesondere zu technologischen Entwicklungen, Verfügbarkeiten und Potenzialen getroffen, die naturgemäß Unsicherheiten unterliegen. Deshalb werden in Kapitel 4 vier Pfadausprägungen untersucht, in denen zentrale Einflussgrößen innerhalb der Transformationspfade der Endverbrauchssektoren Industrie, Verkehr und Gebäude variiert werden.

In den Ausprägungen werden die Dimensionen Elektrifizierungsgrad sowie Effizienzentwicklung in den Transformationspfaden der Endverbrauchssektoren des KN100-Szenarios systematisch variiert. Die Variation des Elektrifizierungsgrades führt zu einer Ausprägung „Electrons“, hier steigt beispielsweise der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge oder elektrischer Wärmepumpen im Vergleich zum Hauptszenario KN100. In der Ausprägung „Molecules“ steigt dagegen der Anteil gasbasierter Heizungstechnologien sowie die Nutzung von PKW mit Diesel- oder Benzinantrieben. In der Dimension Effizienzentwicklung gibt es eine Ausprägung „More“, in der die Effizienz weniger stark steigt als im Hauptszenario KN100 und eine Ausprägung „Efficient“, in der höhere Effizienzgewinne realisiert werden. Ein zentraler Parameter für die Variation ist hier die Gebäudesanierungsrate oder die Effizienzgewinne bei Querschnittstechnologien in der Industrie. Es resultieren die vier Pfadausprägungen „More Molecules“, „More Electrons“, „Efficient Electrons“ und „Efficient Molecules“.

Anhand der Pfadausprägungen lassen sich systematisch Implikationen verschiedener Transformationspfade in den Endverbrauchssektoren auf das Gesamtsystem untersuchen. Dafür wird, für die aus den Pfadausprägungen resultierenden Endenergienachfragen, die kostenminimale Bereitstellung durch das Energiesystem bestimmt. Damit wird insbesondere die Auswirkung auf die erforderliche Bereitstellung von Strom, Wasserstoff sowie von Wasserstoff-Folgeprodukten analysiert.

⁵ Der exogene Pfad der Landwirtschaft verfehlt das Reduktionsziel im Jahr 2030 um 2 Mio. t CO₂e. Entsprechend des KSG können diese Emissionen von anderen Sektoren kompensiert werden. Im KN100 werden die Emissionen durch den Energiesektor kompensiert.

3 Hauptszenario Klimaneutralität 100

3.1 Verkehrssektor

Das Klimaschutzgesetz 2021 sieht vor, die Emissionen des Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 auf 85 Mt CO₂e zu reduzieren und diese somit gegenüber 2019 nahezu zu halbieren. Um das sektorale Klimaziel 2030 und die Klimaneutralität im Jahr 2045 zu erreichen, ist das **Zusammenspiel technologischer und transformatorischer Ansätze** notwendig (siehe Abbildung 5).

Technologische Ansätze betreffen die Weiterentwicklung und Marktdurchdringung von Technologien. Entsprechende Ansätze sind der Einsatz alternativer Antriebe wie Elektromotoren oder die Verwendung neuer Energieträger, wie z. B. Wasserstoff oder synthetisch hergestellte flüssige Kraftstoffe wie Kerosin oder Benzin. Ebenso zählen Effizienzverbesserungen, welche den Kraftstoffverbrauch reduzieren, zu den technologischen Ansätzen.



Abbildung 5: Technologische und transformatorische Ansätze im Verkehrssektor

Transformatorische Ansätze adressieren die Veränderungen von Mobilitäts- bzw. Verbrauchsverhalten. Hierzu zählen beispielsweise die Wahl der Fahrzeuggröße, die den Kraftstoffverbrauch zentral beeinflusst. Der Anteil von Geländewagen (SUVs) an den Neuzulassungen stieg von

2016 bis 2021 kontinuierlich von 12,7 auf 23,8 %. Dies kompensiert einen großen Teil der technischen Effizienzgewinne und die spezifischen Kraftstoffverbräuche sinken nur geringfügig (Randelhoff, 2017). Weitere transformatorische Elemente sind die Verlagerung auf weniger emissionsintensive Verkehrsträger wie den öffentlichen Verkehr oder eine Reduzierung des Verkehrsvolumens durch eine höhere Fahrzeugauslastung.

Für die Abbildung der Emissionen und der Vermeidungsoptionen im Verkehrssektor werden neun Verkehrsträger unterschieden. Zum motorisierten Individual- und Straßengüterverkehr gehören die PKW, die leichten Nutzfahrzeuge (LNF) sowie die mittleren LKW (3,5-12 t) und schweren LKW (>12 t). Die sonstigen Verkehrsträger umfassen den Schienen-, Binnenschiff- und Luftverkehr sowie den Öffentlichen Straßenpersonenverkehr (ÖSPV) und die Mikromobilität.

Entwicklungen im Personen- und Güterverkehr

Im **Personenverkehr** wird angenommen, dass für den Betrachtungszeitraum bis 2050 die Jahresnachfrage nur geringfügig steigt. Die Anteile der unterschiedlichen Verkehrsträger am Personenverkehr ändern sich jedoch im Zeitverlauf deutlich. Ein zentraler Bestandteil der angenommenen Entwicklung ist der Schienenpakt der Bundesregierung. Dieser sieht eine

Verdoppelung der Fahrgastzahlen im Fernverkehr bis 2030 vor. In der Folge wird eine teilweise Verlagerung des nationalen Luftverkehrs und des PKW-Verkehrs auf der Langstrecke auf die Schiene angenommen. Darüber hinaus wird eine zunehmende Verlagerung des innerstädtischen PKW-Verkehrs auf öffentliche Verkehrsmittel wie Busse und Straßenbahnen unterstellt. Weiterhin wird von einem kontinuierlich wachsenden Anteil der Mikromobilität, hauptsächlich in Form von Fahrradverkehr, ausgegangen.

In der Summe reduziert sich der Anteil des PKW-Verkehrs von 2018 bis 2045 von ca. 80 % auf rund 55 %. Dennoch wird der Besitz eines eigenen PKW auch in Zukunft von zentraler Bedeutung sein. Die unterstellte Anpassung des Mobilitätsverhaltens, z. B. die Bildung von Fahrgemeinschaften sowie die stärkere Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln oder dem Fahrrad führt jedoch zu einem Rückgang der durchschnittlich zurückgelegten Fahrzeugkilometer.

Im **Güterverkehr** wird angenommen, dass die Jahresnachfrage bis 2045 gegenüber 2018 um etwa 22 % steigt. Hierbei steigt bei allen Verkehrsträgern die Verkehrsleistung. Der Anstieg ist primär auf das angenommene Wirtschaftswachstum und einen Anstieg des Zulieferverkehrs, bedingt durch eine Zunahme des Onlinehandels, zurückzuführen. Auch im Güterverkehr wird die Erfüllung der Ziele des Schienenpaktes unterstellt. Er sieht vor, dass die Schiene im Güterverkehr bis 2030 einen Marktanteil von 25 % erreicht. Im Jahre 2018 waren dies noch ca. 19 %.

Entwicklungen der Fahrzeugbestände

Bei den **PKW** sinkt die Fahrzeugzahl von rund 46 Mio. auf ca. 38 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2045 (siehe Abbildung 6). Dabei ist die Batterieelektromobilität der treibende Faktor, wodurch der Marktanteil von batterieelektrischen und hybriden Elektrofahrzeugen bereits in der kurzen Frist deutlich ansteigt. Es wird angenommen, dass bis 2030 insgesamt 14 Mio. Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen unterwegs sind. Davon sind 9 Mio. Fahrzeuge rein batterieelektrische (BEV) und 5 Mio. Plug-in hybride Fahrzeuge (PHEV). Konventionelle Diesel- und Benzinantriebe bleiben auch bis 2045, hauptsächlich in Form von Plug-in Hybriden, im Fahrzeugportfolio enthalten. Dies liegt an der angenommenen Lebensdauer von 16,5 Jahren und der daraus resultierenden sukzessiven Flottenwälzung. Dabei kommen ab den frühen 2030er-Jahren konventionelle Antriebe nur noch in Form von Plug-in-Hybriden und ab 2045 nur noch reine Elektro- und Wasserstofffahrzeuge in den Markt.

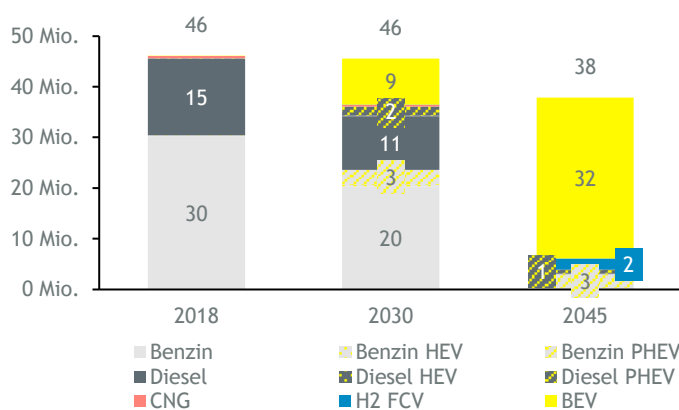


Abbildung 6: Entwicklung des PKW-Bestandes

Auf Grund der steigenden Nachfrage im Lieferverkehr wächst die Anzahl der LNF im Zeitverlauf von 2,5 auf 2,8 Mio. Fahrzeuge an. Dabei ist die Elektromobilität auch bei diesem Verkehrsträger der stärkste Treiber. Im (städtischen) Lieferverkehr werden tägliche Verkehrsleistungen erreicht, die in der Regel durch

batterieelektrische Fahrzeuge gedeckt werden können. Auf der Langstrecke stellen zudem Plugin-Hybride und perspektivisch auch Wasserstofffahrzeuge eine Alternative dar. Sie machen am Bestand der LNF einen Anteil von ca. 15 % aus und ergänzen die Elektromobilität auf der Langstrecke.

Bei den **LKW** im Straßengüterverkehr spielt neben batterieelektrischen Antrieben perspektivisch auch Wasserstoff eine wesentliche Rolle. Wasserstoff wird insbesondere auf der Langstrecke eingesetzt, während batterieelektrische Fahrzeuge hauptsächlich auf der Kurzstrecke und bei leichteren Fahrzeugmodellen (<12,5 Tonnen) eingesetzt werden. Die Rolle von konventionellen Antrieben ändert sich in der kurzen Frist nur geringfügig und Dieselantriebe dominieren weiterhin. Mittelfristig durchdringen alternative Antriebe in größerem Maße den Fahrzeugpark. Hierbei werden Dieselantriebe zunächst durch Erdgas- (CNG) bzw. Flüssigerdgas-Antriebe (LNG) ergänzt. In der langen Frist kommen verstärkt Wasserstoffantriebe zum Einsatz. So haben im Jahr 2045 rund 41 % aller LKW einen Wasserstoffantrieb.

Bei den **übrigen Verkehrsträgern** kommt es auf Grund ihres heterogenen Charakters zu unterschiedlichen Entwicklungen. So wird der Schienenverkehr sowohl im Güter- als auch im Personenverkehr weiter elektrifiziert. Auf schwer zu elektrifizierenden Strecken kommen zudem auch Brennstoffzellenzüge auf Wasserstoffbasis zum Einsatz. Im Luftverkehr bleibt Kerosin auch langfristig der wichtigste Kraftstoff. In der Binnenschifffahrt wird der Schiffsdiesel im Zeitverlauf zunehmend durch LNG und teilweise auch Wasserstoff ersetzt. Im ÖSPV wird der Antriebsmix maßgeblich durch die *Clean Vehicle Directive* beeinflusst. Diese führt dazu, dass die Anteile alternativer Antriebe in Form von Elektromobilität und Wasserstoff bis zum Jahr 2045 rund 85 % steigen. Bei der Mikromobilität ist der Eigenantrieb (z. B. Fahrrad) der dominante Antrieb.

Endenergieverbrauch im Verkehrssektor

Der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor (siehe Abbildung 7) sinkt im Zeitverlauf deutlich. Den größten Einfluss haben dabei die Verkehrsverlagerung auf weniger emissionsintensive Verkehrsträger wie den ÖSPV oder den Schienenverkehr sowie die verkehrsträgerübergreifende Elektrifizierung der Antriebsstränge. Bis zum Jahr 2045 sinkt der Endenergieverbrauch um ca. 57 % von 762 TWh auf 328 TWh. Insgesamt steigt die Nachfrage nach Strom und Wasserstoff im Verkehrssektor deutlich, während die Nachfrage nach Benzin und Diesel von insgesamt 623 TWh auf 34 TWh sinkt. Der Verbrauch von Kerosin sinkt im Zeitverlauf weniger stark als die anderen ölbasierten Kraftstoffe.

Neben dem allgemeinen Rückgang des Endenergieverbrauchs ändert sich auch die **Zusammensetzung der öl- bzw. gasbasierten Kraftstoffe**. So sind von den 446 TWh flüssigen Kraftstoffen im Jahr 2030 rund 415 TWh fossil. Hinzu kommen ca. 28 TWh biogene und 4 TWh

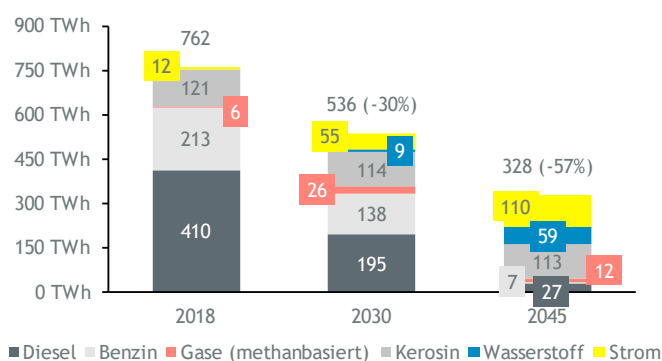


Abbildung 7: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor

synthetische Kraftstoffe. Im Jahr 2045 dominieren synthetische Kraftstoffe dann bei den verbleibenden rund 147 TWh flüssigen Kraftstoffen mit einem Anteil von etwa 138 TWh. Dabei entfällt mit 108 TWh der Großteil auf die Luftfahrt. Der biogene Anteil sinkt auf 9 TWh. Fossile Kraftstoffe werden nicht eingesetzt. Die ausgewiesenen Mengen an flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen beziehen sich auf den nationalen Verkehr sowie die internationale Luftfahrt.

Der **direkte Wasserstoffbedarf** steigt im Verkehrssektor vor allem nach 2030 deutlich an. Der größte Treiber sind hierbei die schweren LKW, auf die mehr als die Hälfte der Wasserstoffnachfrage entfällt. Bei den LNF und den PKW wird Wasserstoff vornehmlich auf der Langstrecke eine wichtige Ergänzung zu batterieelektrischen Antrieben. Beim Luft-, dem Schienen- und dem Binnenschiffverkehr spielt Wasserstoff eine eher geringe Rolle.

3.2 Industriesektor

Das Klimaschutzgesetz 2021 sieht vor, die Emissionen des Industriesektors bis zum Jahr 2030 auf 118 Mt CO₂e und somit gegenüber 2018 um mehr als ein Drittel zu reduzieren. Um das sektorale Klimaziel im Jahr 2030 sowie die Klimaneutralität im Jahr 2045 zu erreichen, müssen innovative Technologien eingesetzt, die Energieeffizienz gesteigert sowie vermehrt recycelt werden.

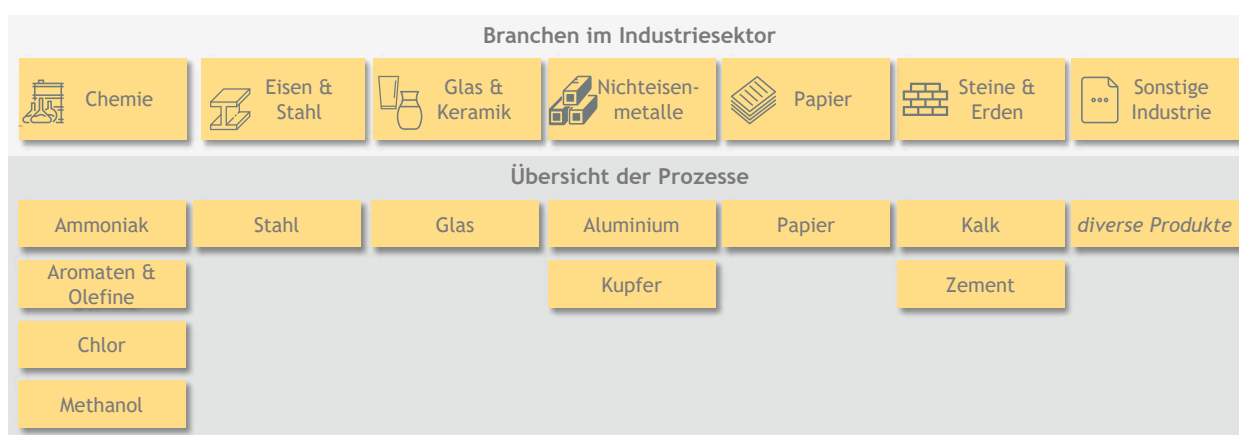


Abbildung 8: Übersicht der Industriebranchen und Prozesse

Der Sektor Industrie ist durch eine heterogene Branchenstruktur gekennzeichnet. In dieser Studie werden die energie- und emissionsintensivsten Branchen Chemie, Eisen & Stahl sowie Steine & Erden detailliert betrachtet. Auf Prozessebene werden zudem Glas & Keramik, Nichteisenmetalle und Papier untersucht. Weitere Branchen wie bspw. Gummi- und Kunststoffwaren sowie Maschinenbau oder Fahrzeugbau werden unter Sonstige Industrie zusammengefasst.

Die Branchen Chemie, Eisen & Stahl und Steine & Erden machten im Jahr 2018 ca. 54 % der gesamten Endenergienachfrage aus. Zudem wurden in diesen Branchen rund 70 % der gesamten

energetischen und prozessbedingten Emissionen⁶ emittiert. Veränderungen in diesen Branchen können daher maßgeblich zur Erreichung der im Klimaschutzgesetz verankerten Ziele beitragen.

Produkte		Status quo		KN100	
		Technologien	Hauptenergieträger	Technologien	Hauptenergieträger
Chemie					
	Ammoniak	▫ Haber-Bosch, Steam Methane Reforming (SMR)	▫ Strom ▫ Erdgas (z. T. NE)	▫ Haber-Bosch, Elektrolyse ▫ Haber-Bosch, H ₂ -Zukauf	▫ Strom ▫ Wasserstoff (NE)
	Aromaten & Olefine	▫ Steamcracking	▫ Naphtha (NE)	▫ Methanol- to-Olefins/-Aromatics ▫ Steamcracking	▫ Strom ▫ Grünes Naphtha (NE)
	Methanol	▫ Partialoxidation, Schweröl, Methanolsynthese ▫ SMR, Methanolsynthese	▫ Schweröl (NE) ▫ Erdgas (NE) ▫ Strom	▫ Elektrolyse-Wasserstoff, Methanolsynthese ▫ Biomassevergasung, Methanolsynthese	▫ Wasserstoff (NE) ▫ Biomasse (fest) (NE)
Eisen & Stahl					
	Stahl	Primär	▫ Hochofenroute	▫ Direktreduktionsroute mit Elektrolichtbogenofen (DRI-EAF)	▫ Strom
		Sekundär	▫ Elektrolichtbogenofen		▫ Wasserstoff (z. T. NE)
Steine & Erden					
	Kalk	▫ Branntkalk	▫ Braunkohle ▫ Erdgas	▫ Trockenverfahren	▫ Strom ▫ Wasserstoff
	Zement	▫ Halbtrockenverfahren	▫ Alternative Brennstoffe		▫ Alternative Brennstoffe
		▫ Trockenverfahren	▫ Steinkohle		▫ Wasserstoff (10%) ▫ Biomasse (fest) (5%)
NE = nichtenergetisch					

NE = nichtenergetisch

Abbildung 9: Übersicht der Technologietransformation ausgewählter Industriebranchen

Technologieentwicklungen in ausgewählten Industriebranchen

Abbildung 9 zeigt eine Übersicht der heutigen Prozesse und der Hauptenergieträger sowie der technologischen Entwicklungen im KN100-Szenario für ausgewählte Branchen.

Die **chemische Industrie** machte im Jahr 2018 rund 21 % des Energieverbrauchs der Industrie aus. Sie setzt sich aus verschiedenartigen Produkten und einer Vielzahl an CO₂-Vermeidungsoptionen zusammen, sowohl für energetische als auch prozessbedingte Emissionen. Für das Szenario KN100 wurden insbesondere Ammoniak, Aromaten & Olefine, Chlor und Methanol untersucht und Transformationspfade hin zu einer klimaneutralen Zukunft entwickelt. Anstelle der heute eingesetzten fossilen Energieträger wie Erdgas, Öl und Naphtha, werden zukünftig zunehmend klimaneutrale Alternativen wie Wasserstoff, Biomasse und grünes Naphtha genutzt.

- **Ammoniak** wird derzeit größtenteils mit Wasserstoff aus Methan-Dampfreformierung im Haber-Bosch-Verfahren erzeugt. Bis 2045 wird Ammoniak vollständig über grünen Wasserstoff erzeugt und ist in Kombination mit dem strombasierten Haber-Bosch-Verfahren klimaneutral.
- **Aromaten & Olefine** werden primär zur Herstellung von Kunststoffprodukten genutzt und aktuell größtenteils in Steamcrackern auf Basis von fossilem Naphtha erzeugt. Im Szenario KN100 wird angenommen, dass bis 2045 ca. 60 % über Methanol-to-Olefins und -Aromatics

⁶ Zu prozessbedingten Emissionen werden Emissionen gezählt, die nicht bei der energetischen Nutzung von Energieträgern entstehen, sondern durch den Einsatz von Rohstoffen (z. B. fossile Gase oder Öle) durch chemische oder physikalische Umwandlung freigesetzt werden.

(MTO/MTA)⁷ und 40 % über Steamcracker auf Basis von importiertem grünem Naphtha erzeugt wird.

- **Methanol** wird heute über Methanolsynthese in Kombination mit Partialoxidation von Schweröl und Dampfreformierung von Erdgas erzeugt. Im Szenario KN100 wird Methanol bis 2045 zu 60 % über elektrolysebasierten Wasserstoff und zu 40 % über die Vergasung von Biomasse erzeugt.

Die Branche **Eisen & Stahl** machte im Jahr 2018 rund 25 % der Energienachfrage der Industrie aus. Grundsätzlich wird Stahl in Primär- und Sekundärstahl unterteilt. Primärstahl macht heute rund zwei Drittel der gesamten Stahlproduktion aus und wird in Deutschland fast ausschließlich über die Hochofenroute erzeugt. Im Szenario KN100 wird angenommen, dass Primärstahl langfristig vollständig über die wasserstoffbasierte Direktreduktion und anschließende Schmelze in Elektrolichtbogenöfen (DRI-EAF-Route) erzeugt wird. Durch die Nutzung von Wasserstoff können direkte Emissionen um nahezu 100 % vermindert werden⁸. Sekundärstahl ist das Produkt des Recyclings von Stahlschrott in Elektrolichtbogenöfen (EAF). Diese Route ist energieeffizienter als die Primärstahlerzeugung, jedoch ist die rein schrottbasierte EAF-Route zur Herstellung hochwertiger Stahlprodukte technologisch nur begrenzt geeignet. Zudem wird der mögliche Einsatz dieser Route durch die Verfügbarkeit und Qualität der Schrotte beschränkt.

Der Bereich **Steine & Erden** machte im Jahr 2018 rund 8 % der Energienachfrage der Industrie aus. Trotz des niedrigen Anteils an der Energienachfrage nimmt die Herstellung von Steinen und Erden eine Schlüsselposition in Bezug auf die CO₂-Vermeidung ein. Heute werden durch den thermischen Einsatz von Kohle, Erdgas und alternativen Brennstoffen⁹ sowie Prozessemissionen große Mengen CO₂ emittiert. Eine Reduktion der Emissionen in der Zementindustrie wird über das Zusammenspiel verschiedener technologischer Entwicklungen erreicht. So können bspw. durch den Einsatz ressourceneffizienter Betone (CEM II/C und CEM VI¹⁰) und alternativer Bindemittel als Ersatz für Klinker, langfristig Energie und Emissionen eingespart werden. Grundlegende technologische Weiterentwicklungen der konventionellen Verfahren werden weder in der Kalk- noch der Zementindustrie erwartet. Anfallende Prozessemissionen und Restemissionen aus der Nutzung alternativer Brennstoffe werden durch CCU (Carbon Capture and Utilization) und CCS vermieden.

Entwicklung der Produktionsmengen

Das KN100-Szenario trifft für alle betrachteten Branchen Annahmen über Entwicklungen der Produktionsmengen. Dabei wird unterstellt, dass ein **funktionierender Carbon-Leakage Schutz** in Deutschland und der EU mögliche Wettbewerbsnachteile für die deutsche Industrie weitgehend abwenden kann.

⁷ Über das MTO/MTA-Verfahren können Olefine und Aromaten über den Einsatz von Methanol erzeugt werden. Dies ist eine alternative Route zur heute weit verbreiteten Erzeugung durch den Einsatz von Naphtha in Steamcrackern.

⁸ Als direkte Emissionen verbleiben noch rund 30 kg CO₂ pro Tonne Primärstahl durch Elektrodenabbbrand und Schäumkohle (Hölling et al., 2017).

⁹ Alternative Brennstoffe sind z. B. Altreifen, Altöl, Tiermehle, aufbereitete Gewerbe- und Siedlungsabfälle sowie Klärschlamm (VDZ, 2020)

¹⁰ Durch den Einsatz von Zementen wie CEM II/C und CEM VI kann der Klinkergehalt um bis zu 50 % reduziert werden. Die Klinkerherstellung ist sehr energieintensiv und für einen großen Teil des Energieverbrauchs und der Prozessemissionen verantwortlich (VDZ, 2020).

In der **chemischen Industrie** werden für Ammoniak und Aromaten & Olefine sinkende Produktionsmengen in Deutschland angenommen. Bei Ammoniak sinkt die Produktion 2045 gegenüber 2018 um 28 %. Bei Aromaten & Olefine sinken die Produktionsmengen im gleichen Zeitraum annahmegemäß um 5 %. Gerade bei Ammoniak hängt die Produktion stark vom Vorprodukt Wasserstoff ab. Vor allem an Standorten mit guten Bedingungen zur Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff könnten langfristig auch Folgeprodukte wie Ammoniak produziert werden. Verstärkt wird dieser potenzielle Effekt durch die besseren Transporteigenschaften von Ammoniak im Vergleich zu Wasserstoff. Für die Basisnachfrage nach **Methanol** wird ein Nullwachstum angenommen. Durch den Einsatz des MTO/MTA-Verfahrens zur Herstellung von Aromaten & Olefinen erhöht sich die Methanolnachfrage jedoch insgesamt um den Faktor 15, wodurch Methanol ein zentraler Baustein auf dem Weg zu einer klimaneutralen Chemieindustrie wird. Es wird dabei angenommen, dass langfristig das Verhältnis von Importen und heimischer Produktion ausgeglichen ist.

Trotz dem starken internationalen Wettbewerb im Bereich **Stahl** wird im Szenario KN100 keine Abwanderung der Produktionsstätten angenommen. Dabei unterstützt eine mögliche zukünftige Vorreiterrolle bei der Produktion von grünem Stahl im internationalen Wettbewerb. Vor diesem Hintergrund wird für die Stahlindustrie eine konstante Produktion auf dem Niveau von 2018 (42,4 Mio. t Rohstahl) angenommen.

Für die Segmente **Zement und Zementklinker** gibt es zwei Effekte, die Einfluss auf die Produktionsmengen haben: die Entwicklung der Baukonjunktur sowie Ressourceneffizienz. Die annahmegemäß rückläufige Anzahl von Neubauten im Gebäudesektor verringert langfristig die notwendige Produktion in geringem Ausmaß. Stärkeren Einfluss hat die Nutzung von Ressourcenpotenzialen, wie materialsparende Bauweisen sowie der Einsatz ressourceneffizienter Betone, welche die notwendigen Mengen an Zementklinker und Zement langfristig senken. Die inländische Produktion von Zement sinkt durch diese Effekte bis 2045 um rund 14 %.

Entwicklung der Energieeffizienz

Unter Effizienz werden allgemeine technologische Entwicklungen zusammengefasst, wie z. B. Optimierungen von Querschnittstechnologien (Pumpen, Ventilatoren, elektrische Motoren, etc.), oder die Steigerung der Energieeffizienz bei bestehenden und neuen industriellen Verfahren. In den Branchen Chemie und Eisen & Stahl sind die Anteile von Querschnittstechnologien, in denen die größten Effizienzpotenziale liegen, vergleichsweise gering. Viele Prozesse sind weitgehend ausoptimiert und Effizienzpotenziale werden als gering eingeschätzt. In anderen Branchen, wie Steine & Erden und Sonstige Industrie liegen größere Potenziale vor. In der Sonstigen Industrie werden beispielsweise bis 2045 kumulierte Energieeffizienzsteigerungen von 34 % angenommen.

Entwicklung der Recyclingquoten

Die Recyclingquoten spielen neben dem Bereich Eisen & Stahl (hier Sekundärproduktion) auch in weiteren Branchen eine wichtige Rolle. Dazu zählen die Glas¹¹- und Papierindustrie sowie die Sekundärproduktion von Aluminium und Kupfer. Sowohl in der Stahlindustrie als auch in den anderen Branchen werden insgesamt nur geringe Steigerungspotenziale erwartet. Recyclingquoten und Sekundärproduktionen sind mehr durch die Verfügbarkeit und Qualität recyclingfähiger Materialien und weniger durch technische Potenziale begrenzt.

Endenergieverbrauch im Industriesektor

Der Endenergieverbrauch der Industrie geht bis 2045 um rund 20% gegenüber 2018 zurück. Dabei ersetzen Strom und Wasserstoff bis 2045 zunehmend Kohle und Öle. Auch methanbasierte Gase verlieren an Bedeutung.

Der Stromverbrauch steigt bis 2030 von 226 TWh auf 263 TWh. Gründe für den Anstieg sind unter anderem eine stärkere Durchdringung strombasierter Technologien in Branchen mit einem hohen Bedarf an Niedrig- und Mitteltemperaturwärme. Methanbasierte Gase nehmen im Jahr 2030 mit etwa 146 TWh weiterhin eine wichtige Rolle ein, werden jedoch zunehmend durch Wasserstoff und Strom substituiert. Der Verbrauch von Kohle sinkt bis 2030 maßgeblich durch die Umstellung von der Hochofenroute auf wasserstoffbasierte Direktreduktion in der Stahlindustrie.

Bis 2045 werden die fossilen Energieträger Kohle und Öl vollständig durch Strom, feste Biomasse und Wasserstoff substituiert. Durch den Einsatz fester Biomasse, speziell im Bereich Prozesswärme, entsteht in Kombination mit CCS oder CCU eine CO₂-Senke. Die Stromnachfrage steigt bis 2045 auf 311 TWh und kommt auf einen Anteil von etwa 54 % am Endenergieverbrauch. Zusätzlich zum Einsatz im Bereich der Niedrig- bis Mitteltemperaturwärme erhöhen auch stromintensivere Prozesse in der Chemieindustrie wie das MTO/A-Verfahren oder der Einsatz von Elektrolyseuren für die Ammoniakproduktion den Stromverbrauch. Fernwärme trägt langfristig mit ca. 8 % zur Deckung des Energiebedarfs bei. Der Anteil von Wasserstoff liegt aufgrund der voranschreitenden Substitution, bspw. im Bereich der Hochtemperaturwärme, langfristig über dem von methanbasierten Gasen.

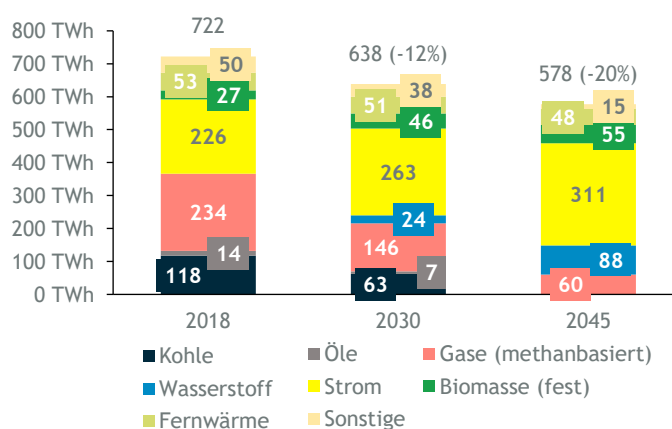


Abbildung 10: Endenergieverbrauch im Industriesektor

In der Industrie werden 2045 insgesamt etwa 191 TWh Wasserstoff verbraucht. Zusätzlich zum energetischen Verbrauch von 88 TWh kommen noch 103 TWh nichtenergetischer Verbrauch. Den

¹¹ Die Entwicklung der Recyclingquote bezieht sich im Bereich Glas auf den Anteil der Scherbeneinsätze.

größten Verbrauch verzeichnen dabei die Branchen Chemie und Eisen & Stahl, welche im Jahr 2045 zusammen rund 83 % der gesamten Wasserstoffnachfrage in der Industrie ausmachen.

Neben Wasserstoff spielt auch der Einsatz von Biomethan eine wichtige Rolle bei der Erreichung der Klimaneutralität. Im Jahr 2045 werden insgesamt 33 TWh und damit über 50 % des Bedarfes an methanbasierten Gasen biogen gedeckt. Langfristig wird zudem synthetisches Naphtha eingesetzt. 2045 werden etwa 51 TWh grünes Naphtha, ca. 59 % des nichtenergetischen Verbrauchs von Ölen, synthetisch hergestellt.

3.3 Gebäudesektor¹²

Das Klimaschutzgesetz 2021 sieht vor, die Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors bis zum Jahr 2030 auf 67 Mio. t zu reduzieren. Das entspricht einer Minderung um rund 45 % gegenüber 2020. Die energetische Qualität und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen eines Gebäudes werden überwiegend von den thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle und der Effizienz des Versorgungssystems sowie von dem eingesetzten Energieträger bestimmt. Um das sektorale Klimaziel 2030 und die Klimaneutralität im Jahr 2045 zu erreichen, muss ein Dreiklang an Maßnahmen umgesetzt werden:

- Die Gebäudehülle muss energetisch verbessert werden, um den Bedarf an Energie zu reduzieren.
- Die Anlagentechnik in und an den Gebäuden muss effizienter werden und einen höheren Anteil erneuerbarer Energien nutzen.
- Der fossile Anteil und damit die spezifischen Treibhausgasemissionen der flüssigen und gasförmigen Energieträger müssen reduziert werden, gleichzeitig muss der Strom zunehmende Anteile erneuerbarer Energien aufweisen.

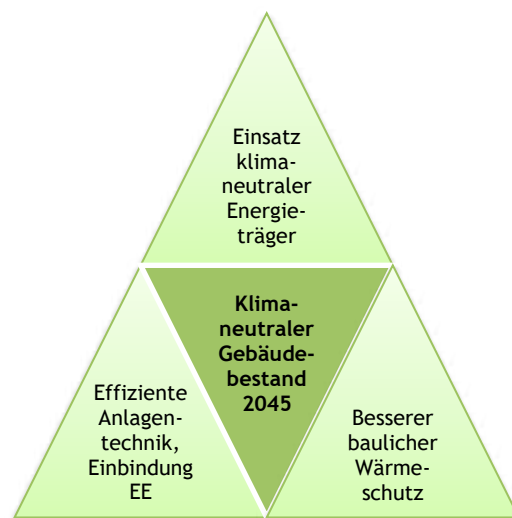


Abbildung 11: Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität im Gebäudesektor

Das Ziel des Gutachtens besteht in der Erarbeitung eines realistischen Pfades zur Entwicklung des Gebäudesektors in Hinblick auf die sektoralen und übergeordneten Ziele nach KSG.

¹² Das Kapitel 3.3 Gebäudesektor wurde vom Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden (ITG) und vom Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München (FIW) verfasst (FIW/ITG-Gutachterbericht, 2021).

Im Folgenden werden die grundsätzlichen Randbedingungen, die modellierten Entwicklungen des baulichen Wärmeschutzes und der Anlagentechnik sowie die daraus resultierende Entwicklung des Endenergieverbrauchs für das Klimaneutralitätsszenario KN100 beschrieben.

Entwicklung des Wohngebäudebestandes

Der im Jahr 2045 resultierende Wohngebäude- bzw. Wohnungsbestand wird durch Neubau- und Abrissaktivitäten beeinflusst. Zwischen 2020 und 2045 werden insgesamt ca. 5,75 Mio. Wohnungen überwiegend in Mehrfamilienhäusern neu errichtet.

Dabei sinkt das Neubauvolumen bis 2030 auf rund 200.000 Wohneinheiten pro Jahr und stagniert auf diesem Niveau. Gleichzeitig findet ein Wohnungsabgang mit durchschnittlich ca. 59.000 Wohneinheiten pro Jahr statt. Durch die Neubau- und Abrissaktivitäten erhöht sich die Anzahl der Wohneinheiten gegenüber dem Status quo um 4,1 Mio. Die Gesamtanzahl der Wohngebäude steigt um ca. 1,7 Mio. bis 2045.

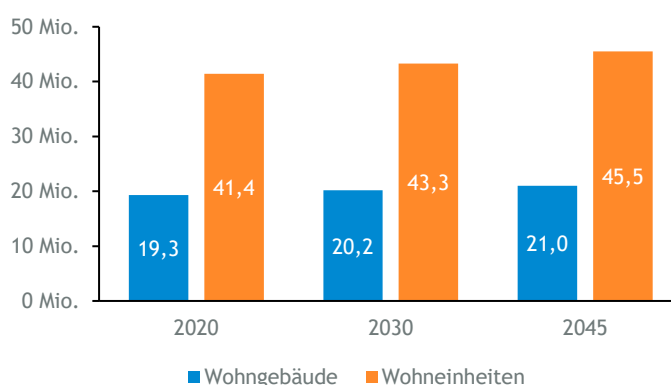


Abbildung 12: Entwicklung des Wohngebäude- und Wohnungsbestandes

Entwicklung des baulichen Wärmeschutzes

Im Bereich des baulichen Wärmeschutzes der Bestandsgebäude steigt die Sanierungsrate als Vollsanierungsäquivalent von aktuell ca. 0,9 % mit 0,1 Prozentpunkten Steigerung pro Jahr auf 1,9 % für alle Gebäudetypen. Ab 2031 verbleibt die Sanierungsrate auf diesem Niveau.

Die durchschnittliche Sanierungsrate im Betrachtungszeitraum zwischen 2020 und 2045 liegt somit bei 1,73 %. Die Anzahl der jährlich modernisierten Wohneinheiten steigt bis 2031 von aktuell rund 400.000 Wohneinheiten auf rund 786.000 Wohneinheiten und verbleibt danach auf gleichem Niveau. Im Zeitraum 2020 bis 2030 werden bereits 6,6 Mio. Wohneinheiten modernisiert, bis 2045 erhöht sich der Wert auf 18,4 Mio. Wohneinheiten.

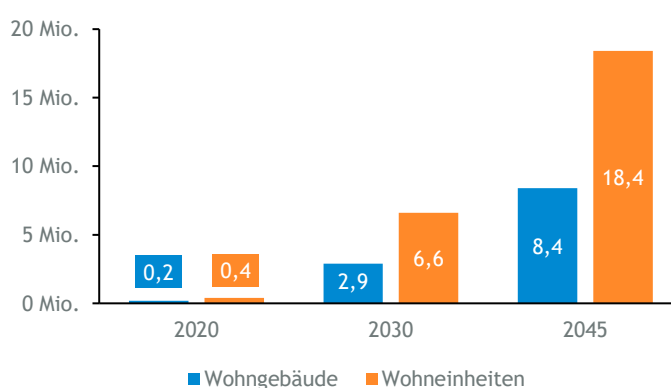


Abbildung 13: Kumulierte Anzahl der modernisierten Wohngebäude und -einheiten im Zeitraum 2020-2045

Mit Blick auf die Entwicklung der Sanierungstiefe geht der aktuell überwiegende Anteil der Modernisierungen auf das bauliche Niveau eines Effizienzhauses 85 bis 2035 kontinuierlich zurück. Gleichzeitig steigt der Anteil der gemäß den baulichen Anforderungen an das Effizienzhaus 55

modernisierten Gebäude besonders nach 2030 deutlich an. Alle nach 2040 modernisierten Gebäude erreichen das Niveau des Effizienzhaus 55. Das Anforderungsniveau an die entsprechende energetische Modernisierung erfolgt in Anlehnung an die Effizienzhausdefinition als Verhältnis des erwünschten spezifischen Transmissionswärmeverlustes zum korrespondierenden Transmissionswärmeverlust des Referenzgebäudes.

Als baulicher Neubaustandard wird bereits ab dem Jahr 2022 das Niveau eines Effizienzhauses 55 unterstellt. Ab 2030 wird für die danach errichteten Gebäude das bauliche Anforderungsniveau des Effizienzhauses 40 angenommen.

Entwicklung der Anlagentechnik

Die Entwicklung der Beheizungsstruktur im Betrachtungszeitraum bis 2045 wird durch folgende Treiber beeinflusst:

- deutliche Intensivierung der Modernisierungsaktivitäten bis 2030 ggü. dem Status quo
- deutlicher Rückgang ölbeheizter Gebäude
- sinkende Anteile gasbeheizter Gebäude
- forcierter Ausbau von Wärmepumpen
- Ausbau von Biomassewärmepumpen
- Steigerung der Anschlüsse an Wärmenetze
- zunehmende Hybridisierung, darunter Ausbau von Solarthermie und Photovoltaik (PV)
- schnellerer Markthochlauf bei Brennstoffzellen

Im Hinblick auf die KSG-Zielerfüllung für das Jahr 2030 und die Verfügbarkeit klimaneutraler flüssiger und gasförmiger Brennstoffe im Jahr 2030 wird unterstellt, dass Gas-Brennwertkessel

- ab 2022 immer mit mindestens solarer Trinkwassererwärmung (TWE)
- ab 2030 immer mit solarer TWE und Heizungsunterstützung

installiert werden. Für Öl-Brennwertkessel wird angenommen, dass diese bereits ab 2025 immer mit solarer TWE und Heizungsunterstützung installiert werden. Gleichzeitig werden keine neuen Niedertemperaturkessel im Mehrfamilienhausbereich ab 2022 eingesetzt. Darüber hinaus wird unterstellt, dass alle nach 2025 installierten Gas-Brennwertkessel wasserstofffähig sind und eine Umstellung vom Betrieb mit Erdgas oder Erdgas/Wasserstoff-Gemischen (ggf. mit Biomethananteilen) auf reinen Wasserstoff möglich ist.

Die Absatzzahlen insgesamt steigen bis 2030 gegenüber dem Status quo deutlich, da der Gebäudesektor die für

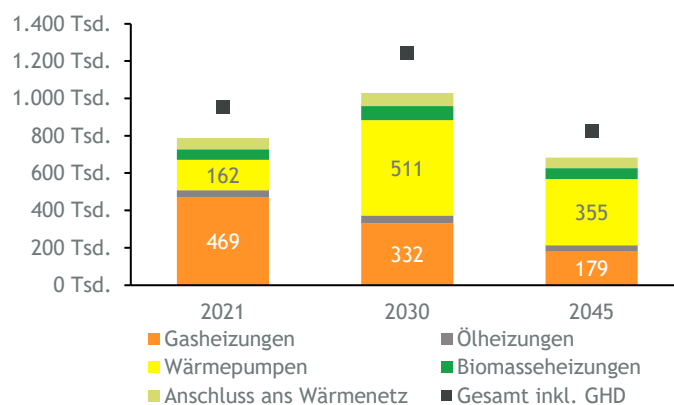


Abbildung 14: Entwicklung der Absatzzahlen für zentrale Wärmeerzeuger im Wohngebäudebereich im Vergleich zu Gesamtabsatzzahlen

das Jahr 2030 angestrebte Treibhausgasemissionsminderung vor allem durch Effizienzmaßnahmen und nur zu einem sehr geringen Anteil durch klimaneutrale Energieträger erreichen kann. Ab 2030 wird von einer steigenden Verfügbarkeit von klimaneutralen gasförmigen und flüssigen Brennstoffen ausgegangen, was einen etwas sinkenden Anlagenaustausch zur Folge hat.

Zwischen 2021 und 2030 steigen die Absatzzahlen für Wärmepumpen inkl. Hybridgeräte im Wohngebäudebereich (Neubau und Bestand) von rund 161.000 auf 511.000 pro Jahr. Im Zeitraum von 2030 bis 2040 geht die Anzahl der jährlich in Wohngebäuden installierten Wärmepumpen etwas zurück. Im Zeitraum zwischen 2040 und 2045 liegen die gesamten Absatzzahlen im Durchschnitt bei rund 400.000 Wärmepumpen p.a.

Der Einbau von mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung wird als eine weitere Maßnahme zur Effizienzsteigerung und damit zur Verringerung der Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors berücksichtigt. Die Anzahl der Wohneinheiten mit mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung steigt bis 2045 auf fast 8,8 Mio., wobei der jährliche Zubau bis 2040 kontinuierlich ansteigt und danach auf einem nahezu konstanten Niveau verbleibt.

Resultierende Beheizungsstruktur

Die Anzahl der mit gasförmigen Energieträgern beheizten Wohngebäude geht von 10,7 Mio. im Jahr 2020 auf 7,7 Mio. im Jahr 2045 zurück. Die Anzahl der mit flüssigen Energieträgern versorgten Gebäude verringert sich von 5,5 Mio. auf ca. 3,4 Mio. im Jahr 2030 und 1,24 Mio. im Jahr 2045.

2030 werden ca. 4,1 Mio. Wärmepumpen betrieben. Bis 2045 erhöht sich der Wert auf 9,0 Mio. in Wohngebäuden. Bezieht man den Nichtwohngebäude-Bereich ein, können für 2030 rund 4,5 Mio. Wärmepumpen und für 2045 rund 9,9 Mio. Wärmepumpen abgeschätzt werden. Nichtwohngebäude sind aufgrund der statistisch unsicheren Datenlage allerdings nicht Teil der detaillierten Modellierung des Anlagenparks. Die Anzahl der Wohngebäude, die mit zentralen Biomasseheizungen beheizt werden, steigt um knapp 1 Mio. auf 1,8 Mio. bis zum Jahr 2045. Die Anzahl der an Wärmenetze angeschlossenen Gebäude nimmt von aktuell rund 1,3 Mio. auf 1,75 Mio. im Jahr 2045 zu. Die Anzahl der mit Wärmenetzen versorgten Wohneinheiten steigt von 6,2 Mio. im Status quo auf rund 9,0 Mio. im Jahr 2045. Das entspricht einer Steigerung um 43 %.

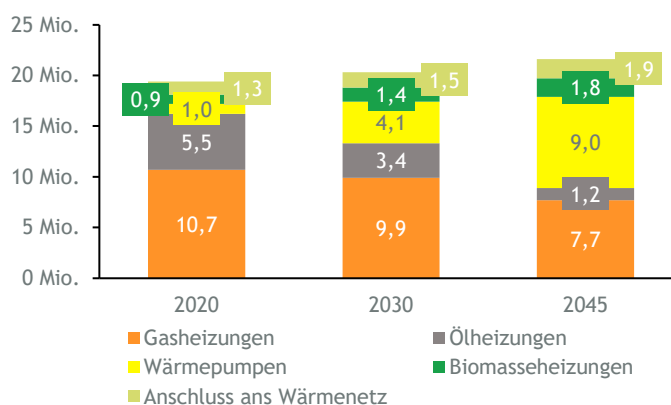


Abbildung 15: Resultierende Beheizungsstruktur nach Hauptwärmeerzeuger/Energieträger in Wohngebäuden

Endenergieverbrauch im Gebäudesektor

Der gesamte Endenergieverbrauch¹³ der Wohngebäude wird gegenüber dem Status quo durch Effizienzsteigerung im Bereich der Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie Einbindung erneuerbarer Energien nahezu halbiert und beträgt im Jahr 2045 rund 345 TWh. Neben den Effizienzmaßnahmen führt der Energieträgerwechsel zum sinkenden Verbrauch an flüssigen und im geringeren Maß an gasförmigen Energieträgern. Der forcierte Ausbau von Wärmepumpen führt zur Steigerung des Stromverbrauchs für die Wärmepumpen. Dieser erhöht sich von aktuell 5,7 TWh auf 28,6 TWh im Jahr 2045.

Der gesamte Gebäudesektor-relevante Endenergieverbrauch der Nichtwohngebäude verringert sich um 30 % ggü. dem Status quo und beträgt im Jahr 2045 226 TWh. Dabei sinkt der Verbrauch an gasförmigen Energieträgern um 56 TWh und liegt zum Ende des Betrachtungszeitraum bei 43 TWh. Der Verbrauch von flüssigen Energieträgern geht bis zum Jahr 2045 auf etwa 1 TWh zurück. Gleichzeitig steigt der Stromverbrauch ggü. dem Status quo um 11 TWh und erreicht 2045 einen Wert von 158 TWh.

Der gesamte Endenergieverbrauch im Gebäudesektor sinkt um 40 % ggü. 2020

und beträgt im Jahr 2045 damit 571 TWh. Der Verbrauch an gasförmigen Energieträgern wird gegenüber dem Status quo um 235 TWh reduziert und beträgt im Jahr 2045 120 TWh. Der Verbrauch von flüssigen Energieträgern geht bis zum Jahr 2045 von 183 TWh auf 11 TWh zurück. Der Stromverbrauch steigt um 29 TWh ggü. 2020 und liegt 2045 bei 303 TWh.

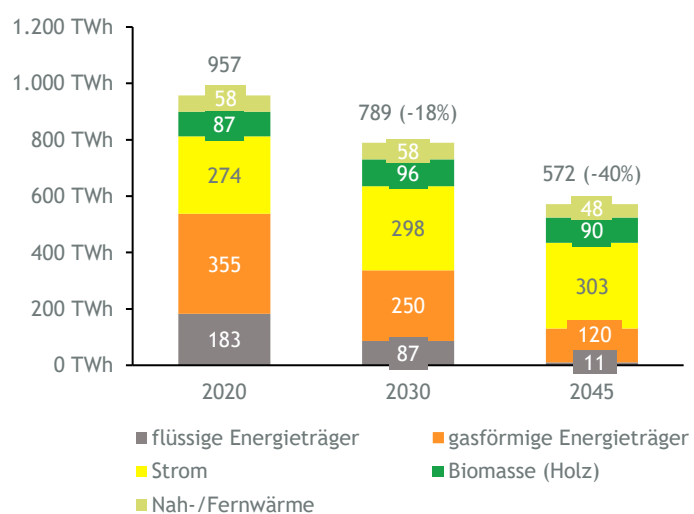


Abbildung 16: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor

Klimaneutrale Brennstoffe und der zukünftige Einsatz von Wasserstoff¹⁴

Neben dem Rückgang des Endenergieverbrauchs ändert sich auch die Zusammensetzung der öl- bzw. gasbasierten Energieträger. Die Zusammensetzung ist ein Ergebnis der Energiesystemmodellierung des EWI.

Ab 2030 wird im Gebäudesektor Wasserstoff verbraucht, zunächst im Rahmen einer Beimischung von Wasserstoff in die Methanverteilnetze. Die durchschnittliche Wasserstoffbeimischung liegt im Jahr 2030 bei 5,8 Vol.-% (entspricht 1,8 Energie-%). Bis zum Jahr 2045 erfolgt eine sukzessive Umstellung der Verteilnetze auf Wasserstoff, sodass im Jahr 2045 ca. 65 % der Nachfrage nach gasförmigen Energieträgern für die Wärmeerzeugung im Gebäudesektor mit Wasserstoff gedeckt wird. Die Wasserstoffbeimischung steigt bis 2045 auf 13,9 Vol.-% (entspricht 4,7 Energie-%). Der

¹³ Ohne Umweltwärme und Solarthermie.

¹⁴ Der Abschnitt „Klimaneutrale Brennstoffe und der zukünftige Einsatz von Wasserstoff“ wurde vom EWI verfasst.

Wasserstoffverbrauch steigt somit bis zum Jahr 2045 auf insgesamt knapp 79 TWh, die verbleibende Menge gasförmiger Energieträger entspricht methanbasierten Gasen. Die Entwicklung der Wasserstoff- und Gasinfrastruktur und die Voraussetzungen für eine Umstellung der Verteilnetze auf Wasserstoff werden in Kapitel 3.6 beschrieben.

Bei der Zusammensetzung von Heizöl und methanbasierten Gasen spielen biogene Brennstoffe und in der langen Frist auch synthetisch hergestelltes PtL-Heizöl eine wichtige Rolle. Im Jahr 2030 werden etwa 26 TWh (10 %) der methanbasierten Gase biogen bereitgestellt. Im Jahr 2045 werden noch etwa 11 TWh fossiles Erdgas genutzt, während etwa 30 TWh biogen bereitgestellt wird. Flüssige Energieträger bestehen im Jahr 2030 vollständig aus konventionellen Energieträgern. Im Jahr 2045 spielt konventionelles Öl im Gebäudesektor jedoch keine Rolle mehr und der Bedarf an flüssigen Energieträgern (11 TWh) wird zu 80 % synthetisch und zu etwa 20 % biogen gedeckt.

3.4 Energiesektor

Im KN100-Szenario wird die europäische Energiebereitstellung bis 2050 entsprechend des *European Green Deal* klimaneutral, in Deutschland zielgemäß bereits bis zum Jahr 2045. Das bedeutet: Bei der Erzeugung von Strom und Fernwärme, aber auch bei der Bereitstellung von Gasen und flüssigen Energieträgern für den Endverbrauch oder den Energiesektor dürfen keine Treibhausgase emittiert werden oder diese müssen durch technische oder natürliche CO₂-Senken bilanziell ausgeglichen werden. Das sektorale Klimaziel der Energiewirtschaft für 2030 beträgt 108 Mt CO₂e.

Beim aggregierten **Endenergieverbrauch**, der vom Energiesektor bereitgestellt werden muss, erfolgt eine Verlagerung weg von konventionellen Energieträgern und hin zu Strom und Wasserstoff. Durch die Elektrifizierung von Endenergieanwendungen und die sinkende Nachfrage nach konventionellen Energieträgern steigt der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch von 21 % im Jahr 2018 auf 31 % im Jahr 2030. Im Jahr 2045 macht Strom 49 % der Endenergienachfrage aus und hat damit den mit Abstand größten Anteil. Die Nachfrage nach Kohle, Ölen und methanbasierten Gasen¹⁵ geht bis 2030

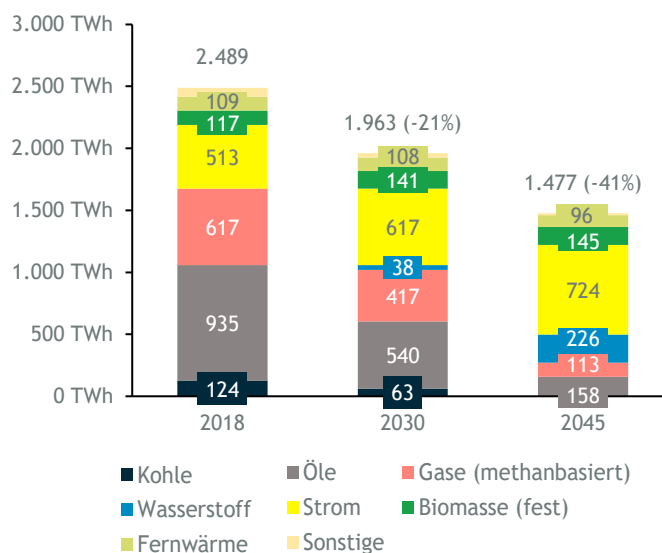


Abbildung 17: Aggregierter Endenergieverbrauch der Verbrauchssektoren nach Energieträgern

¹⁵ Öle sind inklusive synthetischer und biogener Anteile; Methanbasierte Gase sind inklusive synthetischer und biogener Anteile, exklusive Wasserstoff.

um 39 % gegenüber 2018 zurück. Die Nachfrage nach Ölen (-42 %) sinkt überproportional, da im Verkehr weniger konventionelle Kraftstoffe wie Diesel und Benzin (-40 %) sowie im Gebäudesektor weniger Heizöl (-50 %) nachgefragt werden. Im Jahr 2045 haben Öle und methanbasierte Gase noch einen Anteil von 18 % an der Endenergienachfrage, Kohle wird nicht mehr als Endenergieträger genutzt. Wie auch die Fernwärmenachfrage bleibt die Nachfrage nach festen biogenen Brennstoffen in etwa auf heutigem Niveau.

Stromnachfrage

Die Bruttostromnachfrage steigt bis 2030 auf 698 TWh und bis 2045 auf 910 TWh. Im Verkehrssektor wächst der Strombedarf durch den Durchbruch der Elektromobilität und verfünffacht sich bis 2030 in etwa. Anschließend erfolgt eine weitere Verdoppelung der Nachfrage bis 2045 auf 110 TWh. Im Gebäudesektor führt der vermehrte Einsatz von Wärmepumpen zu einem Nachfrageanstieg, der allerdings durch bessere Gebäudedämmung und effizientere Anwendungen teilweise kompensiert wird. Bis 2045 beträgt der Anstieg im Gebäudesektor 23 TWh (+9 %). Die Stromnachfrage der Industrie steigt in Folge der Umstellung auf strombasierte Produktionsprozesse bis 2045 um 93 TWh (+43 %) im Vergleich zu 2019.

Zusätzlich benötigt die wachsende nationale Wasserstoffwirtschaft zunehmend Strom. Bis 2030 wird die nationale Wasserstoffstrategie umgesetzt und 5 GW Elektrolyseursleistung in Deutschland installiert. Für die Erzeugung von knapp 10 TWh grünem Wasserstoff werden 14 TWh Strom im Jahr 2030 benötigt. Bis 2045 steigt die Elektrolyseursleistung in Deutschland auf 24 GW und der für Elektrolyse aufgewendete Strom auf 88 TWh an.

Stromerzeugung und Kraftwerkspark

Eine günstigste CO₂-Vermeidungsoption im Energiesektor ist das Ersetzen von Kohleverstromung durch weniger emissionsintensive Formen der Stromerzeugung. Entsprechend geht die Kohleverstromung bereits bis 2030 deutlich zurück. Die Erzeugung in Kohlekraftwerken beschränkt sich auf Wintermonate, in denen dargebotsabhängige erneuerbare Energien weniger zur Stromerzeugung beitragen. Insgesamt verbleiben 4 GW Braunkohle und 8 GW Steinkohle am Markt, diese erreichen aber geringe Auslastungen und erfüllen eher eine Back-up-Funktion.

Parallel zum Rückgang bei der Kohlekraft wird Ausstieg aus der Kernenergie bis Ende 2022 abgeschlossen. Um den Rückgang steuerbarer Kraftwerksleistung zu kompensieren, werden bereits bis 2030 ca. 15 GW Gaskraftwerkskapazität zugebaut. Etwa zwei Drittel davon stehen als Spitzenlast- bzw. Reservekraftwerke zur Verfügung. In den 2020ern zugebaute Gaskraftwerke sind direkt oder durch die Option zur Nachrüstung wasserstofffähig. Ab 2040 wird Wasserstoff zur Stromerzeugung eingesetzt.

Im Jahr 2045 besteht der Bestand von steuerbaren Kraftwerken vor allem aus wasserstofffähigen Gas- und Dampf-Kombikraftwerken (GuD-Kraftwerke) und Spitzenlastkraftwerken (insgesamt 50 GW). Kraftwerke, die ausschließlich methanbasierte Gase verbrennen verbleiben mit 9 GW am Markt, erfüllen aber hauptsächlich eine Reservefunktion. Die Stromerzeugung in Gaskraftwerken ist daher nahezu vollständig wasserstoffbasiert. Restemissionen aus der Verstromung von Erdgas

werden durch negative Emissionen an Biomasse-KWK-Anlagen, d. h. mithilfe von BECCS, überkompensiert.

Zentraler Bestandteil der Dekarbonisierung im Energiesektor ist der Ausbau Erneuerbarer Energien: Bis 2030 verdoppelt sich die installierte Leistung von Wind und PV gegenüber 2019 nahezu. Dabei werden die Ausbauziele der Bundesregierung jeweils übererfüllt. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien verdoppelt sich etwa von 242 TWh im Jahr 2019 auf 475 TWh im Jahr 2030. Insgesamt haben Erneuerbare Energien 2030 einen Anteil von 68 % an der Bruttostromnachfrage. Das 65 %-Ziel der Bundesregierung wird also übertroffen.

Die installierte Leistung von Wind und PV vervierfacht sich bis 2045 gegenüber 2019 in etwa. In Deutschland sind im KN100 Szenario im Jahr 2045 ca. 50 GW Wind Offshore, 124 GW Wind Onshore und insgesamt 260 GW Photovoltaik installiert. Der Ausbau erneuerbarer Energien wird flankiert durch den Zubau von Flexibilität, insbesondere Batteriespeichern. Bis 2030 sind 2 GW und bis 2045 ca. 15 GW Speicher am Markt aktiv.

Zusätzlich gewinnt auch der Stromhandel an Relevanz. Deutschland wird ab 2030 vom Netto-Stromexporteur zum -Importeur. Hauptgrund hierfür ist der Kernenergieausstieg sowie der Emissionsminderungsdruck im Energiesektor und der damit einhergehende Rückgang der konventionellen Stromerzeugung. Im Jahr 2030 importiert Deutschland ca. 41 TWh Strom, vor allem aus Frankreich, den Niederlanden und Nordeuropa. Erst im Jahr 2050 ist die Stromhandelsbilanz wieder nahezu ausgeglichen.

Analog zur Stromerzeugung sinkt der Einsatz konventioneller Energieträger auch in der Fernwärmeerzeugung. Ersetzt werden diese Anlagen zunächst durch (teilweise wasserstofffähige) Gas-KWK-Anlagen und neue Wärmequellen wie Geothermie, Solarthermie, industrielle Abwärme, Großwärmepumpen und Power-to-Heat (Elektrodenkessel).

Bedarf an Wasserstoff und Wasserstoff-Folgeprodukten

Neben Strom nehmen auch Wasserstoff sowie Wasserstoff-Folgeprodukte, welche vor allem durch Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt werden, im KN100-Szenario eine zentrale Rolle ein. Grüner und blauer Wasserstoff sowie synthetisches Power-to-Liquid ermöglichen CO₂-Vermeidung vor allem bei Anwendungen, die nicht oder nur zu hohen Kosten elektrifiziert werden können. Dies

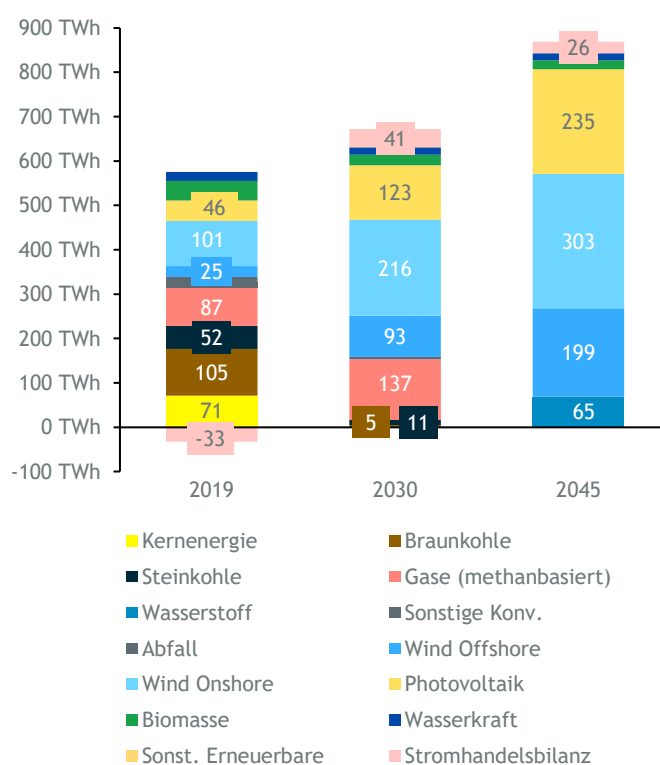


Abbildung 18: Nettostromerzeugung nach Energieträgern

betrifft beispielsweise den Bereich der Hochtemperaturwärme in Industrieprozessen oder den Schwerlast- bzw. Flugverkehr. Außerdem können diese Energieträger über große Distanzen transportiert werden, wodurch der Import aus Regionen mit besseren Standorten zur Erzeugung von erneuerbarem Strom und damit günstigeren Bedingungen für die elektrolysebasierte Wasserstoffproduktion möglich ist.

Im Szenario KN100 entwickelt sich in Deutschland bereits in den 2020er Jahren eine schnell wachsende Wasserstoffwirtschaft. Im Jahr 2030 werden 66 TWh klimafreundlicher Wasserstoff eingesetzt, was 3 % der deutschen Endenergienachfrage entspricht. Vor allem die Stahl- und Chemieindustrie setzen früh große Mengen Wasserstoff energetisch und stofflich ein. Der Industriesektor verbraucht 52 TWh klimafreundlichen Wasserstoff im Jahr 2030. Auch im Verkehrssektor werden 2030 bereits 9 TWh Wasserstoff nachgefragt. Zusätzlich wird Wasserstoff in geringem Umfang in das Erdgasnetz beigemischt. Im Gebäudesektor kommt es erst in den 2030er Jahren zur Umstellung von Gas- zu Wasserstoffnetzen.

Im Jahr 2045 liegt der Bedarf an klimaneutralem, grünem Wasserstoff bei insgesamt 458 TWh. Allein im Industriesektor steigt die Nachfrage auf 191 TWh, davon 103 TWh als nicht-energetische Nachfrage. Im Verkehrssektor wird Wasserstoff überwiegend im Güterverkehr eingesetzt, der Bedarf steigt auf insgesamt 59 TWh im Jahr 2045. Im Gebäudesektor wird nahezu der gesamte Gasbedarf durch grünen Wasserstoff gedeckt, insgesamt werden im Jahr 2045 ca. 79 TWh in der Gebäudewärme eingesetzt. In der Strom- und Wärmeerzeugung erfolgt im Zeitraum von 2035 bis 2045 eine (fast) vollständige Substitution von Erdgas durch Wasserstoff. Dies führt im Jahr 2045 zu einem Verbrauch von 130 TWh Wasserstoff im Energiesektor.

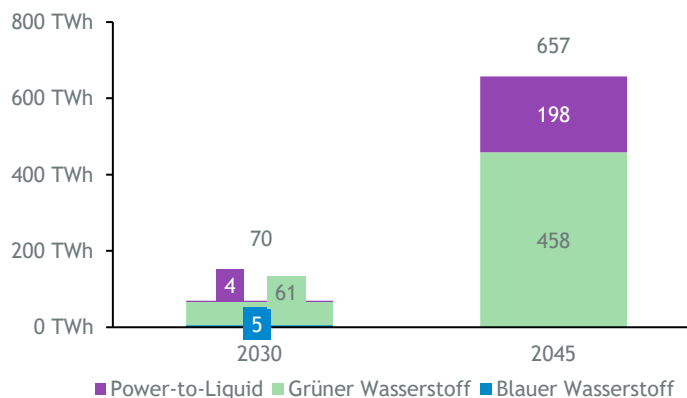


Abbildung 19: Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukten

Neben der direkten Wasserstoffnachfrage werden im KN100-Szenario PtL-Energieträger eingesetzt. Im Jahr 2030 werden ca. 4 TWh zur CO₂-Vermeidung vor allem in der Luftfahrt genutzt. Im Jahr 2045 wächst der Bedarf an synthetischem Kerosin auf 105 TWh. Zusätzlich werden 32 TWh PtL im Straßen-, Schienen- und Binnenschiffsverkehr eingesetzt. Weiterer Großabnehmer von Power-to-Liquid ist die chemische Industrie. Dort wird heute bei der Herstellung von Aromaten und Olefinen überwiegend fossiles Naphtha (Rohbenzin) eingesetzt. Im KN100-Szenario wird die Herstellung von Aromaten und Olefinen langfristig teilweise auf den Einsatz von synthetischem Naphtha (sogenanntem „grünem Naphtha“) umgestellt. Insgesamt werden im Jahr 2045 dafür 51 TWh grünes Naphtha nichtenergetisch verwendet. Im Vergleich dazu, sind die PtL-Mengen, die im Gebäude- und Energiesektor eingesetzt werden, wesentlich geringer. Im Jahr 2045 werden im Gebäudesektor rd. 9 TWh synthetisches Heizöl benötigt, um verbleibende Ölheizungen klimaneutral zu beheizen.

Bereitstellung von Wasserstoff und Folgeprodukten

Im Szenario KN100 führen weltweite Anstrengungen zur Treibhausgasreduktion zu einem Hochlauf von Wasserstoffherzeugung, -weiterverarbeitung und -handel auf europäischer sowie globaler Ebene. Wasserstoff und synthetische Energieträger können daher aus Regionen mit günstigeren Bedingungen für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen importiert werden.

Auch die nationale Wasserstoffproduktion verzeichnet einen Hochlauf. Gemäß den Zielen der nationalen Wasserstoffstrategie werden in Deutschland bis 2030 Elektrolyseure mit einer elektrischen Gesamtleistung von 5 GW installiert, welche etwa 10 TWh grünen Wasserstoff erzeugen. Die verbleibenden 56 TWh werden aus dem europäischen Ausland importiert. Im Zieljahr 2045 deckt die nationale Produktion mit 60 TWh etwa 13 % der Wasserstoffnachfrage. Den größten Anteil an der Wasserstoffversorgung haben mit 47 % (214 TWh) Importe aus dem europäischen Ausland. Darüber hinaus werden große Mengen Wasserstoff per Pipeline aus Nordafrika, Osteuropa (Russland und Ukraine) sowie der Türkei importiert.

Die Herstellung synthetischer Energieträger benötigt große Mengen erneuerbaren Stroms. Die Produktionskosten sind in Deutschland vergleichsweise hoch. Denn die verfügbare Fläche für den Zubau erneuerbarer Energien ist begrenzt und PtL-Energieträger können aufgrund ihrer hohen Energiedichte und ihres Aggregatzustands günstig transportiert werden. Im KN100-Szenario wird PtL daher aus weiter entfernten Weltregionen importiert. Besonders der mittlere Osten bietet sich hier aufgrund der sehr guten PV-Bedingungen sowie dem relativ kurzen Transportweg nach Europa als Herkunftsregion an. Auch in Südamerika - insb. Chile und Kolumbien - und Australien befinden sich große Erzeugungspotenziale und günstige Bedingungen für Windenergie- und Photovoltaikanlagen. Im KN100-Szenario stammen im Jahr 2045 sämtliche PtL-Importe aus diesen drei Weltregionen. Die Importe aus dem Nahen Osten machen 75 % aller PtL-Importe aus. Weitere 15 % stammen aus Südamerika und 10 % aus Australien und Ozeanien.

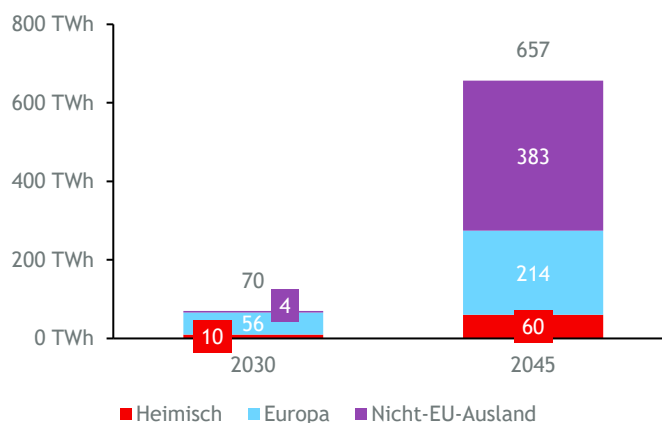


Abbildung 20: Herkunft von Wasserstoff und Folgeprodukten

3.5 Treibhausgasemissionen und Senken

Zur Erreichung der Klimaneutralität spielt neben der Reduktion des CO₂-Ausstoßes die langfristige Speicherung von CO₂ in Senken eine zentrale Rolle. Hierbei kann zwischen natürlichen und technischen Senken unterschieden werden.

Natürliche CO₂-Senken - LULUCF

Natürliche Senken sind Reservoirs, die der Atmosphäre z. B. durch Photosynthese Kohlenstoff entziehen und diesen speichern. Dazu zählen z. B. Wälder, Feuchtgebiete und Salzmarschen. Die Senkenleistung natürlicher Kohlenstoffsinken kann laut KSG für das Ziel netto-Klimaneutralität im Jahr 2045 angerechnet werden. Die Entwicklungen im LULUCF-Sektor im KN100-Szenario sind Ergebnis der Modellierung des Öko-Instituts und werden im Kurzgutachten *Natürliche Senken* (Öko-Institut-Kurzgutachten, 2021) beschrieben. Das Klimaschutzgesetz sieht vor, dass der LULUCF-Sektor im Jahr 2030 mindestens eine Senke in Höhe von -25 Mt CO₂e erreichen soll. Bis zum Jahr 2040 soll diese auf -35 Mt CO₂e und bis 2045 auf -40 Mt CO₂e gesteigert werden.

Im KN100-Szenario wird das Ziel im Jahr 2030 deutlich und im Jahr 2040 geringfügig unterschritten. Im Jahr 2045 erreicht der LULUCF-Sektor eine Senkenleistung von -41 Mt CO₂e und übertrifft damit das Ziel leicht. Um dies zu erreichen, müssen die oben genannten Ökosysteme sowie ihre Funktion als Kohlenstoffspeicher und -senke geschützt und gestärkt werden. Die größte Rolle spielt dabei die Waldsenke, die in den letzten Jahren durch Trockenheit und Borkenkäfer und die damit verbundene Abholzung geschrumpft ist. Der Ausbau und Erhalt der Waldsenke erfordert langfristig gesunde Wälder. Zwischen 2021 und 2040 erfolgt im KN100-Szenario daher ein Umbau der Wälder hin zu resistenteren Laub- und Mischwäldern. Ab 2040 wird außerdem weiter aufgeforstet, d. h. es werden Ackerflächen zu Wäldern umgewandelt, um die Waldsenke zu vergrößern. Zusätzlich werden Emissionen aus dem Acker- und Grünland verringert, indem bspw. der Ökolandbau intensiviert wird und Grünflächen geschützt werden.

Technische CO₂-Vermeidung und Senken

Neben den natürlichen Senken bestehen unterschiedliche Optionen zur Reduktion von CO₂-Emissionen durch technische CO₂-Vermeidung und -Senken. Diese Verfahren werden ausschließlich in den Sektoren Energie und Industrie angewandt. Alle Verfahren haben gemein, dass für eine anrechenbare Reduktion bzw. Senke CO₂ dauerhaft gespeichert oder genutzt werden muss.

Im Jahr 2030 werden im KN100-Szenario insgesamt rund 5 Mt CO₂e Emissionen durch technische CO₂-Vermeidung und -Senken vermieden.

Im Industriesektor werden 2 Mt CO₂e über Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Utilization (CCU) vermieden. Rund 1 Mt CO₂e werden zudem über Bio-Energy Carbon Capture and Storage (BECCS) und Bio-Energy Carbon Capture and Utilization (BECCU) abgeschieden. Etwa 1 Mt CO₂e werden in grünem Methanol gebunden und als Senke angerechnet.

Bis 2045 steigt die gesamte technische Senkenleistung und CO₂-Reduktion auf

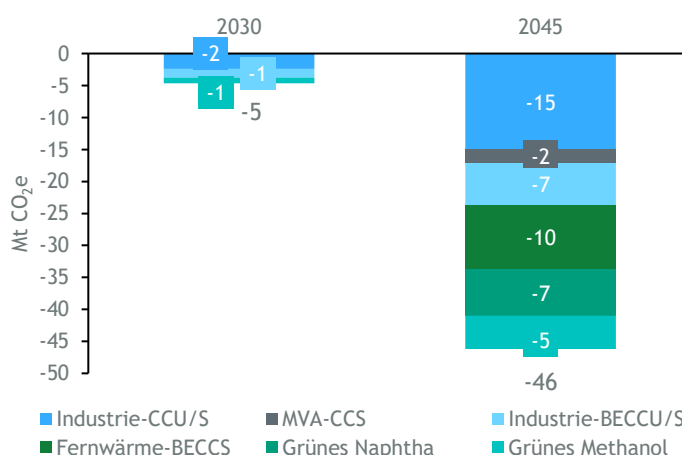


Abbildung 21: Technische CO₂-Vermeidung und -Senken in den Sektoren Energie und Industrie

46 Mt CO₂e an. Den größten Beitrag leistet dabei die Industrie mit 34 Mt CO₂e über CCU/S, BECCU/S sowie durch die Herstellung und Import von grünem Naphtha und Methanol. Im Energiesektor werden insgesamt CO₂-Minderungen von 12 Mt CO₂e durch CCS an Müllverbrennungsanlagen (MVA) und BECCS in der Fernwärmeerzeugung erreicht.

Treibhausgasemissionen in Deutschland

Die Gesamtemissionen sinken bis 2030 um -65 % gegenüber 1990, wodurch das übergeordnete Minderungsziel des Klimaschutzgesetzes 2021 erfüllt wird. Die sektoralen Zielvorgaben im Jahr 2030 werden mit Ausnahme der Sektoren Landwirtschaft, Abfall und Sonstige erreicht. Durch eine Übererfüllung der sektoralen Ziele des Energiesektors wird die sektorübergreifende Zielerreichung im Jahr 2030 sichergestellt.

Im Jahr 2045 wird Klimaneutralität erreicht. Der Sektor Verkehr erreicht dabei die Klimaneutralität. In den Sektoren Gebäude und Industrie verbleiben geringe Netto-Restemissionen von 2 bzw. 4 Mt CO₂e. Im Bereich Landwirtschaft verbleiben signifikante Restemissionen von rd. 42 Mt CO₂e. Die verbleibenden Emissionen werden durch negative Emissionsbilanzen im Energiesektor und im LULUCF-Sektor ausgeglichen.

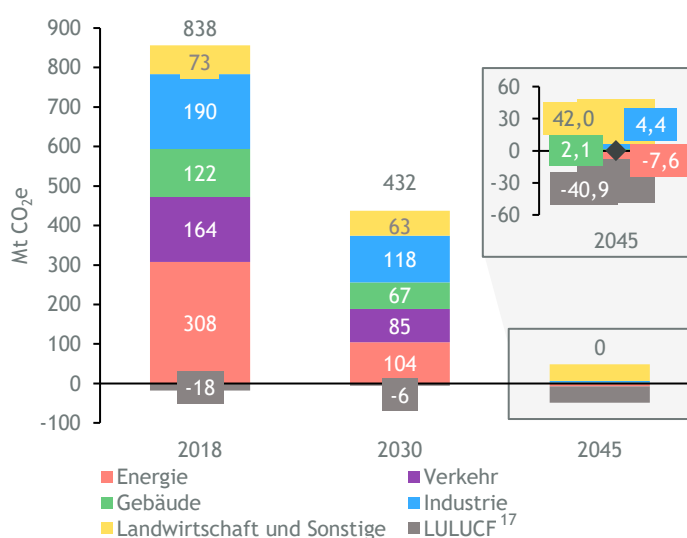


Abbildung 22: Entwicklung der Netto-Treibhausgasemissionen

3.6 Energieinfrastrukturen

Für eine konsistente Entwicklung der Transformationspfade werden **Zusatzanalysen** zum Ausbau der Stromnetze (Übertragungs- und Verteilnetze) sowie zur Entwicklung der Gas- und Wasserstoffinfrastruktur eingebunden.

Entwicklung des Stromübertragungsnetzes¹⁶

Im Bereich des Übertragungsnetzes wird anhand eines reduzierten Netzmodells für Deutschland und das umliegende europäische Ausland für die Zieljahre 2030 und 2045 der erwartete Netzausbaubedarf bestimmt. Das zugrundeliegende Netzmodell bildet das Start- und Zubaunetz des Netzentwicklungsplans (NEPs) für das Szenario B im Jahr 2035 ab und enthält damit alle gesetzlich verankerten Leitungsvorhaben des *Energieleitungsausbaugesetzes (EnLAG)* sowie des *Bundesbedarfsplangesetzes (BBPlG)* sowie einige Zubaumaßnahmen des NEP-Szenarios. Im

¹⁶ Das Kapitel Entwicklung des Stromübertragungsnetzes wurde von der ef.Ruhr verfasst.

Ergebnis der in dieser Studie durchgeführten Analysen resultiert für beide Zieljahre ein über die aktuellen Planungen des NEPs hinausgehender Netzausbaubedarf. Die Analysen ergeben, dass im KN100-Szenario bis 2030 bereits mindestens das im NEP-Szenario B für 2035 ausgewiesene Netz erforderlich sein wird. Konkret resultiert ein zusätzlicher Zubau-Bedarf gegenüber dem NEP-Szenario von etwa 2.700 Trassenkilometern. Bis zum Jahr 2045 ergibt sich ein Zubau-Bedarf von etwa 8.200 Trassenkilometern. Dies entspricht zusätzlichen Investitionen von etwa 6,7 Mrd. EUR bis 2030 bzw. 19,3 Mrd. EUR bis zum Jahr 2045. Die Ergebnisse zeigen, dass eine erfolgreiche Erfüllung der Versorgungsaufgabe des KN100-Szenarios durch das Übertragungsnetz eine signifikante Beschleunigung des Netzausbaus erfordert. Die umsetzbaren Beschleunigungspotentiale der bereits ambitionierten Ausbauziele bis 2035 erscheinen vor dem Hintergrund bereits umgesetzter Maßnahmen zumindest aus heutiger Sicht begrenzt. Daher sollten alternative Lösungen für eine beschleunigte Netzerweiterung, wie etwa die vollständige Ausschöpfung netzoptimierender Maßnahmen zur Ausnutzung des Bestandsnetzes oder der Einsatz neuer technischer Konzepte, wie die Vernetzung der Offshore-Windenergie für eine flexible und bedarfsgerechte Systemintegration verstärkt berücksichtigt werden. Ebenso sollten der Einsatz von Flexibilitätsoptionen seitens großer Lasten und der Schnittstelle zur Sektorenkopplung sowie die Berücksichtigung von Redispatch-Maßnahmen und Maßnahmen der systemdienlichen Abregelung erneuerbarer Energien, verstärkt Berücksichtigung finden

Entwicklung des Stromverteilnetzes¹⁷

Die Berechnung des Netzausbaubedarfs in der Mittelspannungs- (MS-Ebene) und Niederspannungsebene (NS-Ebene) erfolgt durch Netzausbaurechnungen einzelner Netze mit repräsentativen Versorgungsaufgaben nach vorheriger Clusterung und anschließender Hochrechnung auf Gesamtdeutschland. Die Analysen zeigen einen Netzausbaubedarf bis 2030 von 26 Mrd. EUR in der NS-Ebene und 17 Mrd. EUR in der MS-Ebene. Bis 2045 zeigen die Analysen in der NS-Ebene einen Ausbaubedarf von 75 Mrd. EUR und 40 Mrd. EUR in der MS-Ebene. Die Berechnung des Ausbaubedarfs erfolgt als Zielnetzplanung für die einzelnen Stützjahre. Der Netzausbau ist somit nicht konsekutiv zu verstehen. Der Großteil des zu erwartenden Ausbaubedarfs ist somit in der NS-Ebene verortet. Hier sind insbesondere Ballungszentren betroffen. Die Ergebnisse sind damit konsistent zur aktuellen Studienlage. Der jährlich zu leistende Ausbau der Leitungen in beiden Netzebenen befindet sich in einer Größenordnung mit dem historischen jährlichen Leitungszuwachs und bewegen sich damit in einer realistischen und damit grundsätzlich als realisierbar einzuordnenden Größenordnung. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Verfügbarkeit einer residuallastglättenden netzdienlichen Steuerung von Ladevorgängen an privaten Ladepunkten planerisch unterstellt wurde. Ein ungesteuertes Laden wie es heute in der Netzplanung berücksichtigt wird, würde zu einem erheblich höheren Netzausbaubedarf führen. Eine planerische Berücksichtigung einer Steuerung von Lasten erfordert jedoch die entsprechenden technischen und regulatorischen Voraussetzungen und ist somit in besonderem Maße abhängig von der derzeit in der Diskussion befindlichen Ausgestaltung von §14a im

¹⁷ Das Kapitel Entwicklung des Stromverteilnetzes wurde von der ef.Ruhr verfasst.

Energiewirtschaftsgesetz (EnWG). Die Realisierbarkeit des erforderlichen Netzausbaus kann zudem durch eine integrierte Netz- und Assetplanung unterstützt werden. Der Einsatz von Flexibilität, beispielsweise durch eine Steuerung von Ladevorgängen, sowie eine entsprechende Digitalisierungsstrategie für das Netz können hier wichtige Beiträge leisten. Zudem gilt es zu beachten, dass der Netzausbaubedarf nicht homogen über Deutschland verteilt anfällt und somit lokal Restriktionen bei der zeitlichen Realisierbarkeit des Netzausbaus entstehen können.

Der Netzausbaubedarf in der Hochspannungsebene (HS-Ebene) wurde mittels einer Extrapolation auf Basis der Ergebnisse der *dena-Verteilnetzstudie* (dena, 2012) und des im Rahmen des hier betrachteten Szenarios angenommenen Zubau von Erneuerbare-Energien-Anlagen abgeschätzt. Dies führt zu einem anzunehmenden Investitionsbedarf im mittleren (2030) und hohen (2045) zweistelligen Milliardenbereich. Hierbei werden die Entwicklungen im Bereich der neuartigen Lasten sowie mögliche Einflüsse auf den Ausbaubedarf nicht berücksichtigt. Entsprechend sind die angegebenen Investitionen als eine konservative Einordnung zu verstehen. Es ist zu empfehlen den Ausbaubedarf in der HS-Ebene in zukünftigen Studien ausführlich zu betrachten

Entwicklung der Wasserstoff- und Gasinfrastruktur

Basierend auf den Ergebnissen des KN100-Szenarios erfolgt im Rahmen der Studie eine ausführliche Betrachtung der Gas- und Wasserstoffinfrastruktur. Die Entwicklung des Verbrauchs hat dabei großen Einfluss auf die Infrastruktur. Der gesamte nationale **Gasverbrauch** sinkt bis 2030 zunächst geringfügig und nimmt dann bis 2045 deutlich ab. Mit 79 % entfällt ein Großteil des Gasverbrauchs im Jahr 2045 auf die Gasfamilie Wasserstoff, während der Anteil der Gasfamilie Methan auf 21 % sinkt.¹⁸

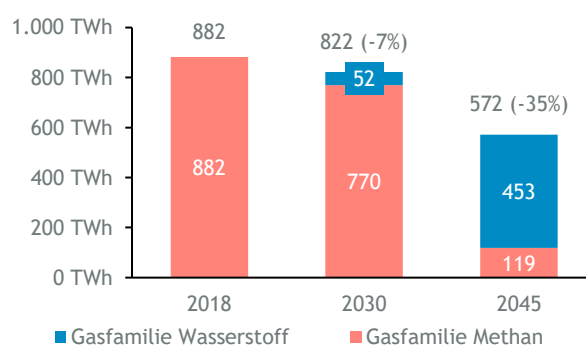


Abbildung 23: Energieverbräuche nach Gasfamilie

Ein **nationales Transportnetz** für Wasserstoff könnte in der kurzen Frist zunächst im Nordwesten Deutschlands ausgebaut werden, um dort große Industriecluster im Dreiländereck zwischen Deutschland, Belgien und den Niederlanden anzuschließen (Fernleitungsnetzbetreiber, 2021; Agora Energiewende & AFRY Management Consulting, 2021; Jens et al., 2021). Dieses nationale Transportnetz könnte sich im Zeitverlauf in Richtung Südwesten entwickeln und bis zum Jahr 2040 könnte ein flächendeckender Anschluss Süddeutschlands an das Wasserstoff-Transportnetz möglich sein.

Weiterhin hat der Aufbau einer **Wasserstofftransportinfrastruktur auf europäischer Ebene** Relevanz, da ein Großteil des langfristig benötigten (grünen) Wasserstoffbedarfs aus Importen

¹⁸ Im Rahmen der Studie ist Gasfamilie Methan als Mischung aus methanbasierten Gasen sowie einem Wasserstoffanteil von bis zu 20 Vol.-% definiert. Die Gasfamilie Wasserstoff beinhaltet reinen Wasserstoff. Die Definition der Gasfamilie Methan ist analog zu der 2. Gasfamilie und die der Gasfamilie Wasserstoff zu der 5. Gasfamilie gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 260.

gedeckt wird. Im Jahr 2045 stammen 47 % des Wasserstoffs aus dem europäischen Ausland. Das europäische Fernleitungsnetz im Südwesten Europas bildet weiterhin die Grundlage für Importe aus Nordafrika, worüber im Jahr 2045 ca. 19 % des deutschen Wasserstoffbedarfs gedeckt werden. Zusätzlich dazu stellt das Fernleitungsnetz eine Option für Wasserstoffimporte aus Osteuropa und Vorderasien dar. Aus diesen Regionen wird 2045 ca. 21 % der Wasserstoffnachfrage gedeckt.

Auf der **Transportnetzebene** ist die Leitungsinfrastruktur historisch gewachsen und wurde an vielen Stellen durch parallel geführte Methanpipelines ausgebaut, sodass eine bedarfsgerechte Umstellung für den Transport von Wasserstoff möglich. Aufgrund der hohen Investitionskosten bei gleichzeitig abnehmenden Verbräuchen, steigen sowohl die absoluten als auch die auf die verbrauchten Mengen bezogenen Kosten der Gastransportnetzinfrastruktur bis 2045 deutlich.

In den **Gasverteil- und Ortsnetzen** sind i. d. R. keine parallel geführten oder redundanten Leitungen vorhanden, weshalb die Koexistenz zweier Gasfamilien innerhalb eines Verteilnetzes innerhalb der Studie nicht betrachtet wird. Die Beimischung von Wasserstoff in Verteilnetze ist kurz- bis mittelfristig möglich. Lokale Bedarfsanforderungen (z. B. durch sensible Industrie-verbraucher) und Einspeisemöglichkeiten (z. B. durch Biomethan oder Wasserstoff aus dezentralen Elektrolyseuren) entscheiden über die Höhe der Beimischung und die Gasfamilie von Verteilnetzabschnitten. Es wird davon ausgegangen, dass für Beimischungen von mehr als 20 Vol.-% eine vollständige Umstellung des Verteilnetzabschnittes auf Wasserstoff kostengünstiger ist als eine zunehmende Beimischung. Der Trend von der Gasfamilie Methan hin zu Wasserstoff bedeutet, dass langfristig ein Großteil der Gasverteilnetze auf Wasserstoff umgestellt werden.

Die **Dauer der Marktraumumstellung** von Gasfamilie Methan auf Wasserstoff ist ein begrenzender Faktor für den Einsatz von Wasserstoff in Verteilnetzen. Der Beginn und die Geschwindigkeit der Marktraumumstellung auf Wasserstoff inklusive des Austausches oder der Nachrüstung betroffener Endgeräte ist maßgeblich von politischen Entscheidungen abhängig. Bevor ein Netzabschnitt auf Wasserstoff umgestellt werden kann, müssen alle Endgeräte in diesem Netzabschnitt wasserstofffähig sein. Die Studie geht davon aus, dass Verteilnetzumstellungen von Gasfamilie Methan auf Wasserstoff in den 2030er Jahren starten und im Jahr 2050 abgeschlossen sind. Um eine Netzumstellung in diesem ambitionierten Zeitrahmen zu ermöglichen, müssen viele Endgeräte früher als in den typischen Investitionszyklen durch wasserstofffähige Endgeräte ersetzt werden. Um einen beschleunigten Austausch der Endgeräte zu erreichen ist voraussichtlich eine politische Begleitung notwendig, z. B. mit ordnungsrechtlichen Maßnahmen oder der Förderung des vorzeitigen Austauschs von nicht-wasserstofffähigen Endgeräten.

4 Pfadausprägungen

Neben dem Hauptszenario KN100 werden vier Pfadausprägungen analysiert. In den Pfadausprägungen werden die Dimensionen Elektrifizierungsgrad sowie Effizienzentwicklung in den Transformationspfaden der Endverbrauchssektoren des KN100-Szenarios systematisch variiert. Die Variationen beeinflussen die Zusammensetzung der Endenergienachfrage in Bezug auf Strom und molekülbasierte Energieträger wie Wasserstoff, methanbasierte Gase und flüssige mineralöl-basierte Energieträger.

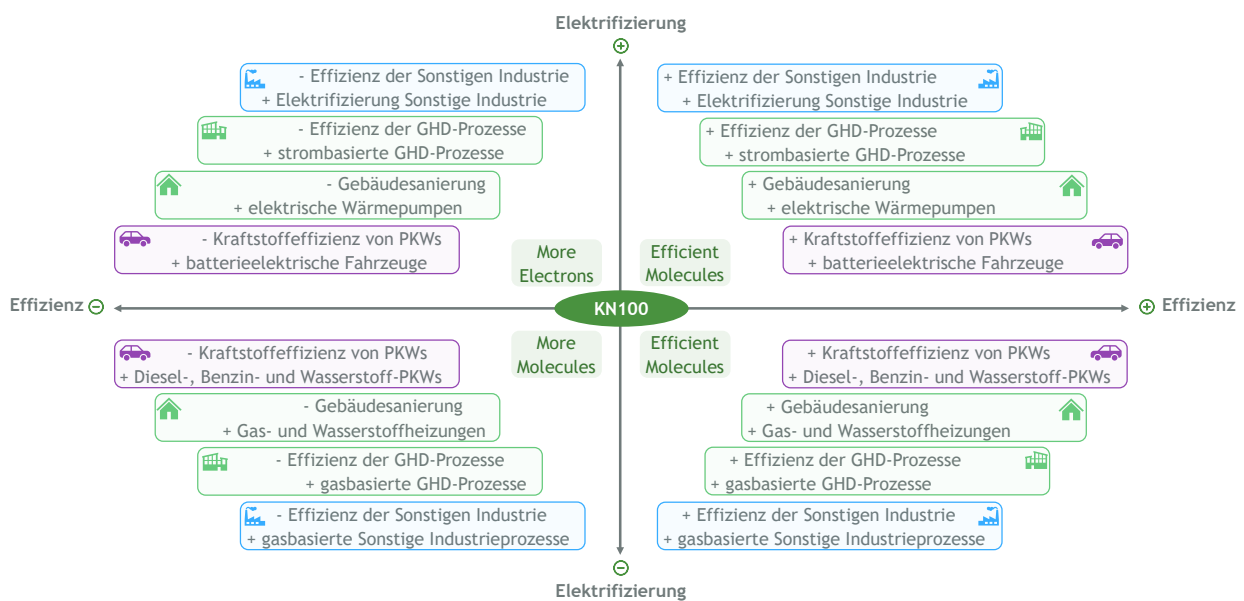


Abbildung 24: Übersicht zur Ausgestaltung der Pfadausprägungen

Es ergeben sich vier Pfadausprägungen „More Molecules“, „More Electrons“, „Efficient Electrons“ und „Efficient Molecules“ mit abweichenden Endenergiebedarfen im Vergleich zum Szenario KN100. Daraus resultieren veränderte Anforderungen an die Energiebereitstellung, welche für die vier Pfadausprägungen mit dem Energiesystemmodell bestimmt und optimiert wird.

Verkehrssektor

In den Pfadausprägungen unterscheiden sich die Transformationspfade im PKW-Bereich. Die detaillierte Betrachtung der PKW ist vor dem Hintergrund interessant, dass diese etwa die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor ausmachen. Zudem ist auf Grund der technischen Eigenschaften und der Nutzungsmuster von PKW der gleichwertige Einsatz unterschiedlicher Antriebstechnologien denkbar.

Bei den PKW werden im Rahmen der Pfadausprägungen die Kraftstoffeffizienz und die Marktdurchdringung von Elektro- bzw. konventionellen Antrieben wie Diesel oder Benzin gegenüber dem Hauptszenario KN100 variiert. In den „Molecules“-Ausprägungen werden mehr

konventionelle Antriebe bei den PKW unterstellt. Die „Molecules“-Ausprägungen stehen für eine Welt, in der Elektromobilität nur langsam Marktanteile gewinnen kann. In den „Electrons“-Ausprägungen wird dagegen eine höhere Anzahl von Elektrofahrzeugen angenommen.

Die Anpassungen resultieren im Jahr 2030 in den „Molecules“-Ausprägungen in einem PKW-Bestand von 5 Mio. reinen Elektrofahrzeugen (siehe Abbildung 25). Die Differenz von rund 4 Mio. BEVs gegenüber dem KN100-Szenario wird durch höhere Anteile von Plug-In-hybriden sowie reinen Diesel- und Benzinantrieben kompensiert. Bis zum Jahr 2045 wächst in den „Molecules“-Ausprägungen dann der Bestand auf rund 19 Mio. BEV. Das sind ca. 13 Mio. weniger als im KN100-Szenario. Dafür befinden sich in etwa 8 Mio. PHEVs, 3 Mio. Benziner und 1 Mio. Wasserstofffahrzeuge mehr im Fahrzeugbestand. In den „Electrons“-Ausprägungen sind bis zum Jahr 2030 bereits 11 Mio. BEVs im Fahrzeugbestand und damit rund 2 Mio. mehr als im KN100-Szenario. Dies entspricht einem sukzessiven Anstieg der Neuzulassungsraten für BEV auf rund 82 % im Jahr 2030. Insgesamt beträgt der Anteil der reinen Elektrofahrzeuge im Jahr 2045 ca. 89 % und es sind 34 Mio. BEVs im Fahrzeugbestand.

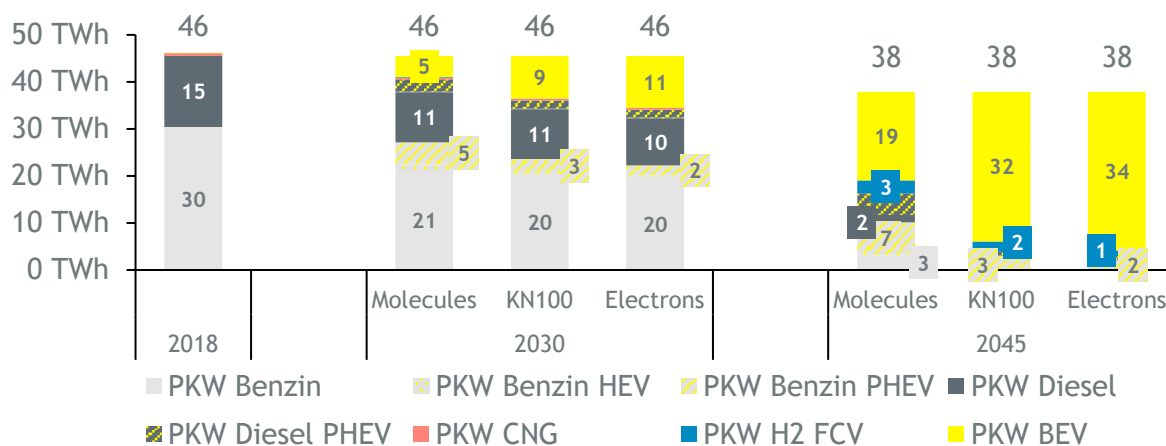


Abbildung 25: PKW-Bestand nach Pfadausprägung

Die Grundlage für die **Differenzierung der spezifischen Kraftstoffverbräuche** ist einerseits die Annahme, dass die technischen Entwicklungen schneller bzw. langsamer voranschreiten könnten. Weiterhin ist in der Realität zu beobachten, dass PKW zwar effizienter, jedoch gleichzeitig auch größer werden. Sollte sich diese Entwicklung fortsetzen, könnten die spezifischen Kraftstoffverbräuche höher ausfallen als im Hauptszenario angenommen. Sofern Endverbraucher zukünftig wieder stärker auf kleinere Fahrzeugklassen setzten, könnten die spezifischen Kraftstoffverbräuche stärker zurückgehen. Die Effizienz der neuzugelassenen Fahrzeuge wird bis zum Jahr 2030 um jeweils 5 % variiert, +5 % entspricht der „More“- und -5 % der „Efficient“-Ausprägung. Ab dem Jahr 2040 beträgt die Varianz dann ± 10 %.

Industriesektor

In den Pfadausprägungen werden Änderungen im Bereich Sonstige Industrie betrachtet. Eine detaillierte Betrachtung der sonstigen Industriebranchen ist interessant, da auf diese heute etwa ein Drittel des Endenergieverbrauchs der Industrie entfallen. Der Bereich zeichnet sich zudem

durch einen hohen Anteil von Querschnittstechnologien sowie vielfältiger Technologieoptionen im Bereich der Niedrig- und Mitteltemperaturwärmeerzeugung aus.

Im Bereich Sonstige Industrie bestehen hohe Effizienzpotenziale, welche primär durch den signifikanten Anteil von Querschnittstechnologien bedingt sind. Diese Technologien sind nicht auf eine Branche beschränkt, sondern werden übergreifend eingesetzt, wie z. B. Pumpen, Kompressoren, elektrische Motoren oder auch wärmeerzeugende Technologien wie Gas-Brennwertkessel oder Wärmepumpen. Im Szenario KN100 werden bis 2045 ca. 34 % kumulierte Effizienzgewinne realisiert. Hier sollen die Auswirkungen geringerer bzw. höherer Effizienz aufgezeigt werden. In den Ausprägungen „Efficient“ bzw. „More“ wird eine Variation von -5 Prozentpunkten (ca. 29 % kumuliert) bzw. +5 Prozentpunkten (ca. 39 % kumuliert) untersucht.

In Bezug auf die Nutzung strombasierter Prozesse und gasförmiger Energieträger bestehen im Bereich Niedrig- und Mitteltemperaturwärme große Freiheitsgrade bei der Wahl der Technologie. Im Szenario KN100 wird aufgrund der Effizienzvorteile einiger elektrischer Technologien, wie z. B. Wärmepumpen, gegenüber gasbasierten Technologien häufig ein Wechsel auf strombasierte Technologien unterstellt. Über die Pfadausprägungen sollen die Auswirkungen eines geringeren bzw. höheren Elektrifizierungsgrades aufgezeigt werden. In der „Electrons“-Ausprägung werden 10 % des Verbrauchs methanbasierter Gase und Wasserstoff durch Strom substituiert. Es resultieren höhere Anteile von Strom am Endenergieverbrauch von 59 % bzw. 60 %. Bei „Molecules“ hingegen werden 20 % des Stromverbrauchs anteilig durch methanbasierte Gase und Wasserstoff substituiert. In den „Molecules“-Ausprägungen liegen die Anteile von Strom am Energieverbrauch mit 42 % bzw. 43 % auf einem ähnlichen Niveau wie 2018.

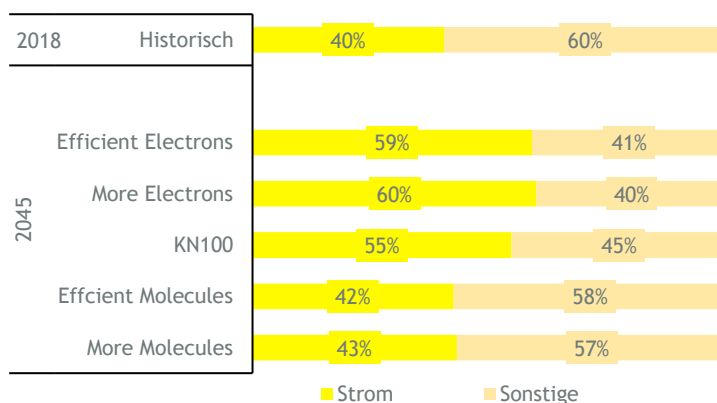


Abbildung 26: Anteil von Strom am Endenergieverbrauch der Sonstigen Industrie

Gebäudesektor

Im Gebäudesektor werden in den Pfadausprägungen abweichende Entwicklungen der Anlagentechnik und unterschiedliche Sanierungsaktivitäten betrachtet. Zusätzlich werden analog zu den Variationen in der Sonstigen Industrie auch Pfadausprägungen für den Bereich „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ (GHD) untersucht. Die Modellierung der Pfadausprägungen des Gebäudesektors wird wie auch das KN100 von den Gebäudegutachtern ITG und FIW modelliert (siehe ITG/FIW-Gutachterbericht, 2021). Die Entwicklungen im Bereich GHD werden vom EWI analysiert.

Bei der Steigerung der **Gebäudesanierungsrate** bestehen im Hinblick auf eine zunehmende Knappheit von Handwerksbetrieben oder von bestehenden Marktversagen wie dem Mieter-Vermieter Dilemma große Unsicherheiten. Die Pfadausprägungen zeigen die Auswirkungen einer niedrigeren bzw. höheren Sanierungsaktivität, indem in den Ausprägungen „More“ eine durchschnittliche Sanierungsrate von 1,30 % pro Jahr unterstellt wird (-0,43 % gegenüber KN100). In der Ausprägung „Efficient“ wird eine höhere durchschnittliche Sanierungsrate von 2,16 % pro Jahr (+0,43 % gegenüber KN100) angenommen.

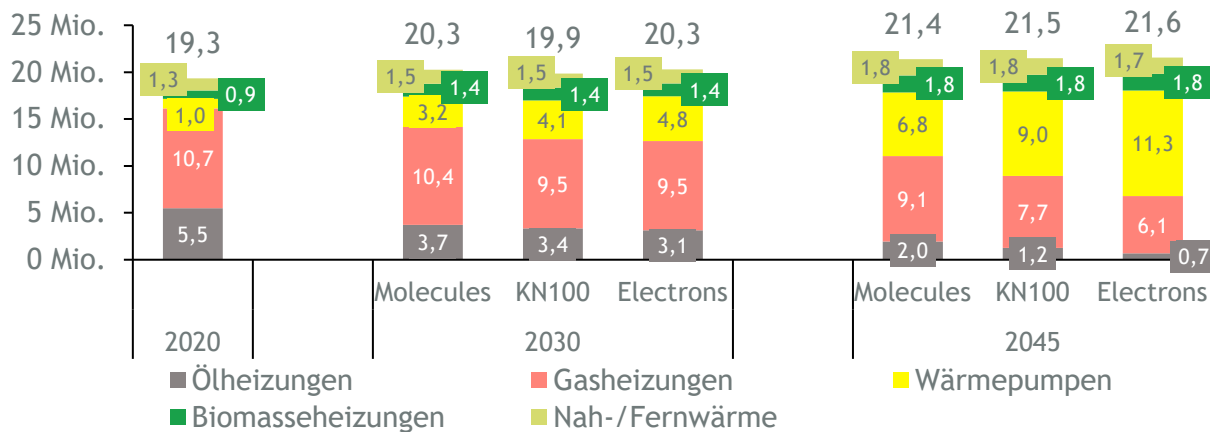


Abbildung 27: Beheizungsstruktur der Pfadausprägungen in Wohngebäuden

Zusätzlich zu der Sanierungsrate wird für den Gebäudesektor die **Marktdurchdringung von Wärmepumpen** variiert. Die Ausprägungen „Electrons“ berücksichtigen einen gegenüber dem Hauptszenario höheren Zubau von elektrischen Wärmepumpen und gleichzeitig einen stärkeren Rückgang der mit flüssigen und gasförmigen Energieträgern beheizten Gebäude. Die Ausprägungen „Molecules“ unterstellen dagegen einen geringeren Zubau von elektrischen Wärmepumpen.

Im **Bereich GHD** wird in den Pfadausprägungen ein analoges Vorgehen zur Sonstigen Industrie gewählt. Es wird „Efficient“ bzw. „More“ eine Variation der Effizienzentwicklung von -5 Prozentpunkten (ca. 40 % kumuliert) bzw. +5 Prozentpunkten (ca. 50 % kumuliert) gegenüber KN100 angenommen. Weiterhin werden in der Ausprägung „Electrons“ eine weitreichendere Elektrifizierung und in der Ausprägung „Molecules“ ein verstärkter Einsatz von Gasen unterstellt.

Energiesektor

Die Endenergieverbräuche der Endverbrauchssektoren in den Pfadausprägungen weichen in ihrer Höhe und Struktur vom Hauptszenario KN100 ab. Aufgrund der variierenden Endenergieverbräuche ergeben sich somit veränderte Anforderungen an die (klimaneutrale) Energiebereitstellung durch den Energiesektor. Insbesondere die Stromerzeugung sowie der Einsatz von klimafreundlichem Wasserstoff und synthetischen Energieträgern verändern sich. Als Referenz für die Diskussion der Ergebnisse in den Pfadausprägungen stellt Abbildung 28 die relevanten Ergebnisse des Hauptszenarios dar. Darauf aufbauend werden die Abweichungen der Ergebnisse in den einzelnen Pfadausprägungen diskutiert.

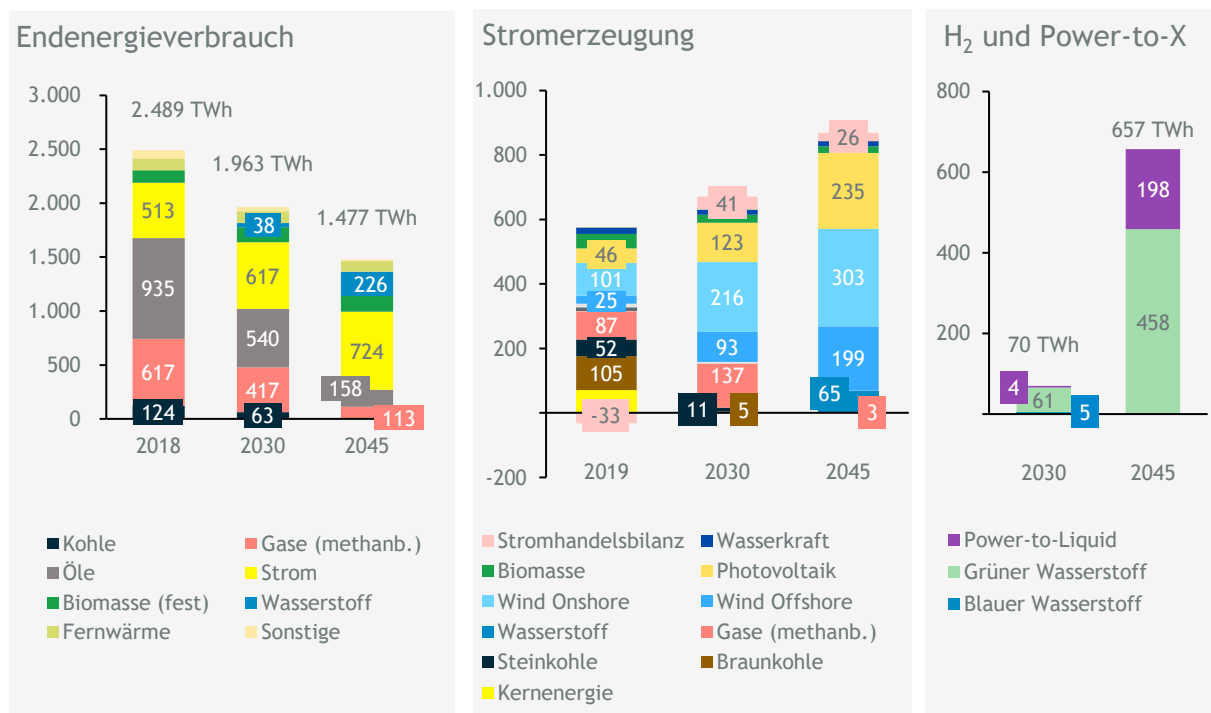


Abbildung 28: Übersicht zentraler Ergebnisse des Hauptszenarios KN100

In der „Efficient Electrons“-Ausprägung werden im Jahr 2030 in Summe ca. 37 TWh (-2 %) weniger Endenergie nachgefragt als im KN100-Szenario, im Jahr 2045 sind es 72 TWh (-5 %). Dabei sinkt vor allem die Nachfrage nach Ölen und Gasen. Die Stromnachfrage hingegen steigt im Jahr 2030 gegenüber KN100 um 18 TWh (+3 %). Im Jahr 2045 liegt sie um 6 TWh (+1 %) höher. Dies ist auf die höhere Zahl an Wärmepumpen, Elektroautos sowie elektrifizierten Industrieprozessen zurückzuführen. Der Anstieg bewirkt im Jahr 2030 vor allem einen Zuwachs bei der Stromerzeugung aus methanbasierten Gasen bzw. Biomethan. Zusätzlich ist etwas mehr Raum für konventionelle Stromerzeugung aus Kohle, weil im Energiesektor aufgrund höherer Minderung im Gebäudesektor weniger Minderungsdruck besteht. Hier wirkt sich vor allem die sehr ambitionierte Gebäudesanierung aus, die mehr als doppelt so hoch wie historisch beobachtete Sanierungsraten ist. Unter dieser Voraussetzung kann der Gebäudesektor Emissionen der nicht-zielerreichenden Sektoren Landwirtschaft und Abfall und Sonstige kompensieren. Im KN100-Szenario wird diese Kompensation durch den Energiesektor erbracht.

Im Jahr 2030 werden in der „Efficient Electrons“-Ausprägung 2 TWh (-3 %) weniger Wasserstoff und PtL als im KN100-Szenario nachgefragt. Im Jahr 2045 beträgt die Differenz 69 TWh (-10 %). Im Jahr 2030 lässt sich der Rückgang auf die veränderten Nachfragen in den Endverbrauchssektoren zurückführen. Auch im Jahr 2045 sinkt der Bedarf aus den Endverbrauchssektoren. Zusätzlich sinkt die Nutzung von Wasserstoff im Energiesektor im Vergleich zum Hauptszenario, weil aufgrund der geringeren Gasnachfragen aus den Endverbrauchssektoren mehr Biomethan für den Energiesektor zur Verfügung steht.

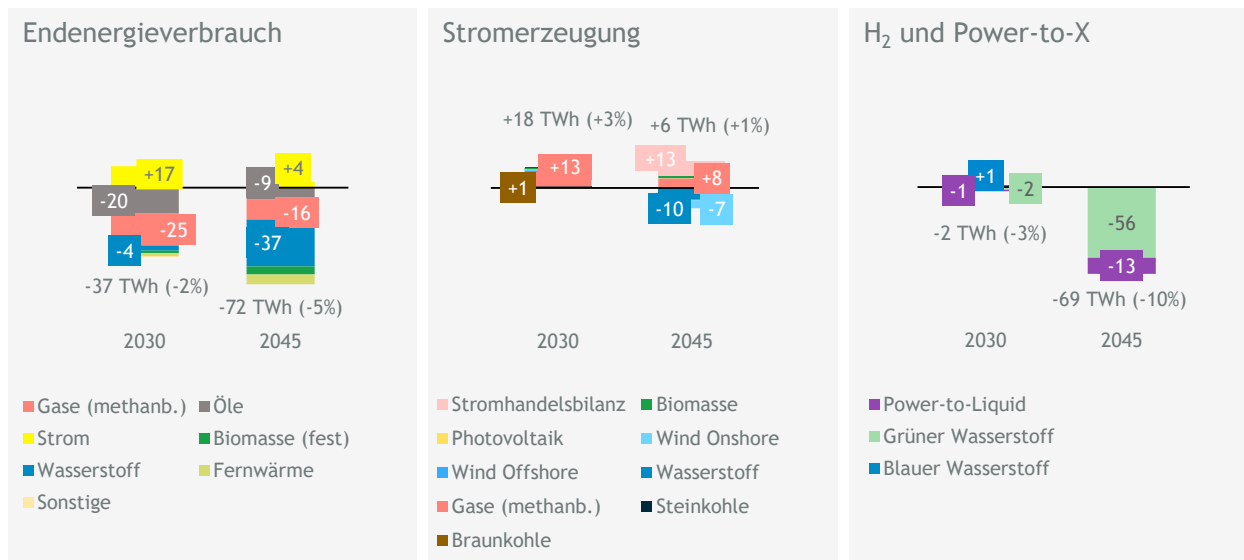


Abbildung 30: Übersicht zentraler Ergebnisse der Pfadausprägung „Efficient Electrons“

In der „More Electrons“-Ausprägung steigt der Endenergiebedarf gegenüber KN100 in Summe um 15 TWh (+1 %) im Jahr 2030 und um 41 TWh (+3 %) im Jahr 2045. Vor allem der Strombedarf ist aufgrund der verstärkten Elektrifizierung im Vergleich zum KN100-Szenario höher: Die Stromnachfrage liegt im Jahr 2030 33 TWh (+5 %) über dem KN100-Szenario, im Jahr 2045 beträgt der Unterschied 61 TWh (+7 %). Sie ist damit deutlich höher als die Stromnachfrage der „Efficient Electrons“-Ausprägung, was auf geringere Effizienzen im Industrie- und Verkehrssektor und die geringere Gebäudesanierung zurückzuführen ist. Die zusätzliche Stromnachfrage wird also sowohl im Jahr 2030 als auch 2045 in großen Teilen durch emissionsarme Erzeugung (v. a. Windenergie) und durch Importe gedeckt. Weil mit der Stromnachfrage auch die für Spitzenlastkraftwerke auslegungsrelevante Last ansteigt, müssen mehr steuerbare Kraftwerke zugebaut werden. Bis 2030 muss der Zubau im KN100-Szenario (15 GW) noch einmal um knapp 4 GW erhöht werden, bis 2045 sind 12 GW zusätzlich erforderlich.

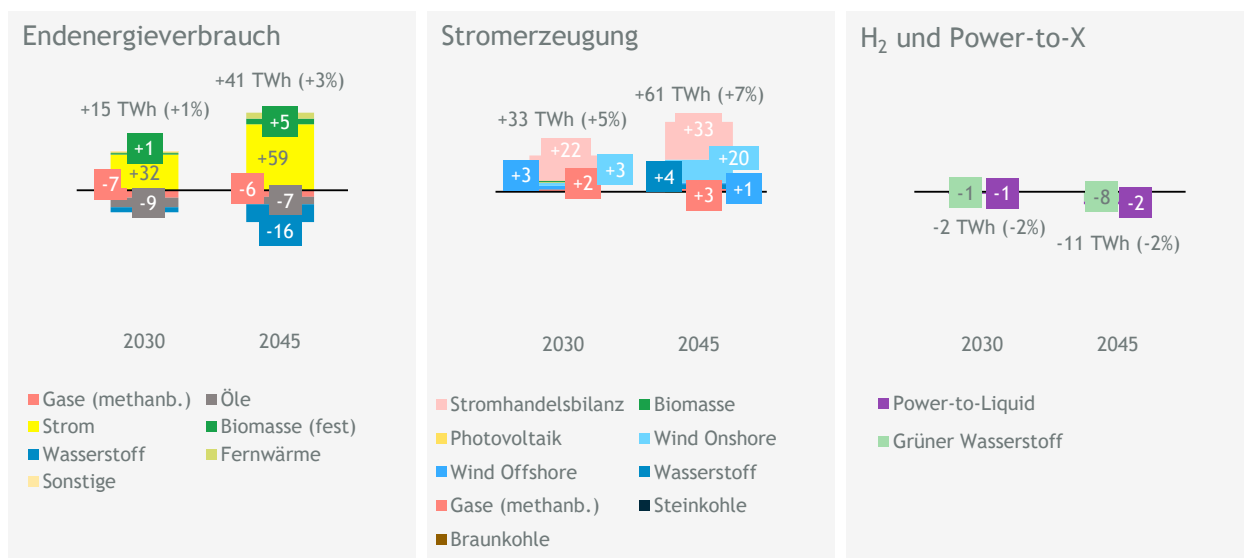


Abbildung 29: Übersicht zentraler Ergebnisse der Pfadausprägung „More Electrons“

In der „More Electrons“-Ausprägungen werden weniger Wasserstoff und Wasserstoff-Folgeprodukte nachgefragt als im Hauptszenario, weil weniger gas- und ölbasierte Technologien genutzt werden. Der Unterschied beträgt netto jeweils -2 % (2 TWh im Jahr 2030 und 11 TWh im Jahr 2045). Dabei sinken allerdings nur die Nachfragen aus Endverbrauchssektoren gegenüber dem Hauptszenario. Der Energiesektor, der mehr Strom und Wärme bereitstellen muss, hat jeweils eine höhere Nachfrage nach grünem Wasserstoff.

In der „Efficient Molecules“-Ausprägung gibt es beim Endenergieverbrauch im Jahr 2030 keinen Netto-Unterschied zum KN100-Szenario. Im Jahr 2045 werden 29 TWh (-2 %) weniger Endenergie nachgefragt. Die Stromnachfrage geht gegenüber dem Hauptszenario jeweils zurück, dafür steigt die Nachfrage nach Gasen und Ölen. Der Anstieg ist auf den höheren Anteil von Gas- und Ölheizungen, konventionellen PKW-Antrieben und gasbasierten Industrieprozessen zurückzuführen.

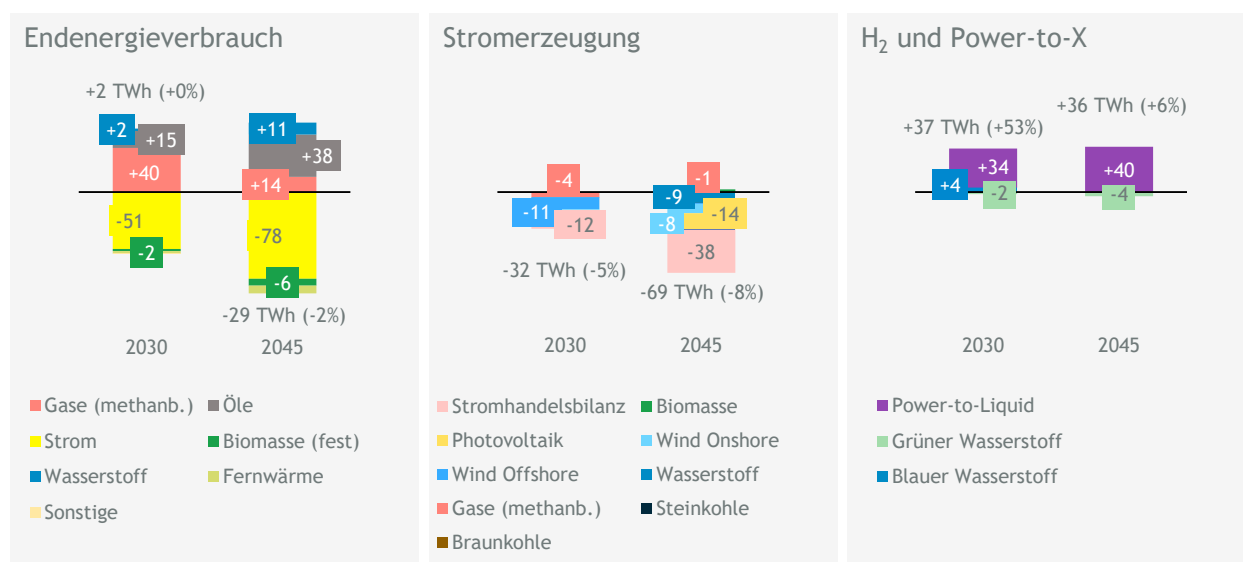


Abbildung 31: Übersicht zentraler Ergebnisse der Pfadausprägung „Efficient Molecules“

In der „Efficient Molecules“-Ausprägung ist die Stromnachfrage im Jahr 2030 32 TWh (-5 %) und im Jahr 2045 69 TWh (-8 %) geringer als in KN100. Der Rückgang ist auf die kombinierte Wirkung der höheren Effizienzgewinne sowie der geringer ausgeprägten Elektrifizierung gegenüber dem Hauptszenario zurückzuführen. Aufgrund der niedrigeren Stromnachfrage gehen die EE-Erzeugung, die Gas-bzw. Wasserstoffverstromung sowie die Importe gegenüber dem Hauptszenario zurück.

In der „Efficient Molecules“-Ausprägung werden 2030 37 TWh (+53 %) und 2045 36 TWh (+6 %) mehr synthetische Energieträger eingesetzt. Besonders im Jahr 2030 wird mehr Power-to-Liquid benötigt, um die Sektorziele - vor allem in den Sektoren Verkehr und Gebäude - zu erreichen. In beiden Sektoren verbleiben im Jahr 2045 signifikante Bedarfe nach flüssigen Energieträgern. Dafür geht der Bedarf nach grünem Wasserstoff gegenüber dem Hauptszenario leicht zurück, weil der Energiesektor aufgrund der geringeren Stromnachfrage weniger Wasserstoff verstromt.

Der größte Unterschied im Endenergiebedarf im Vergleich zum Hauptszenario ergibt sich in der „More Molecules“-Ausprägung. Im Jahr 2030 werden in Summe 56 TWh (+3 %) und 2045 93 TWh

(+6 %) mehr Endenergie benötigt. Dabei liegt die Stromnachfrage unterhalb des KN100-Szenarios, während die Nachfrage nach gasförmigen und flüssigen Energieträgern deutlich höher liegt.

Mit Blick auf die Stromerzeugung zeigt sich in der „More Molecules“-Ausprägung ein ähnliches Bild wie in der „Efficient Molecules“-Ausprägung. Der Rückgang der Stromnachfrage aus den Endverbrauchssektoren fällt allerdings geringer aus, weil die unterstellten Effizienzgewinne niedriger als im KN100-Szenario bzw. der „Efficient Molecules“-Ausprägung sind.

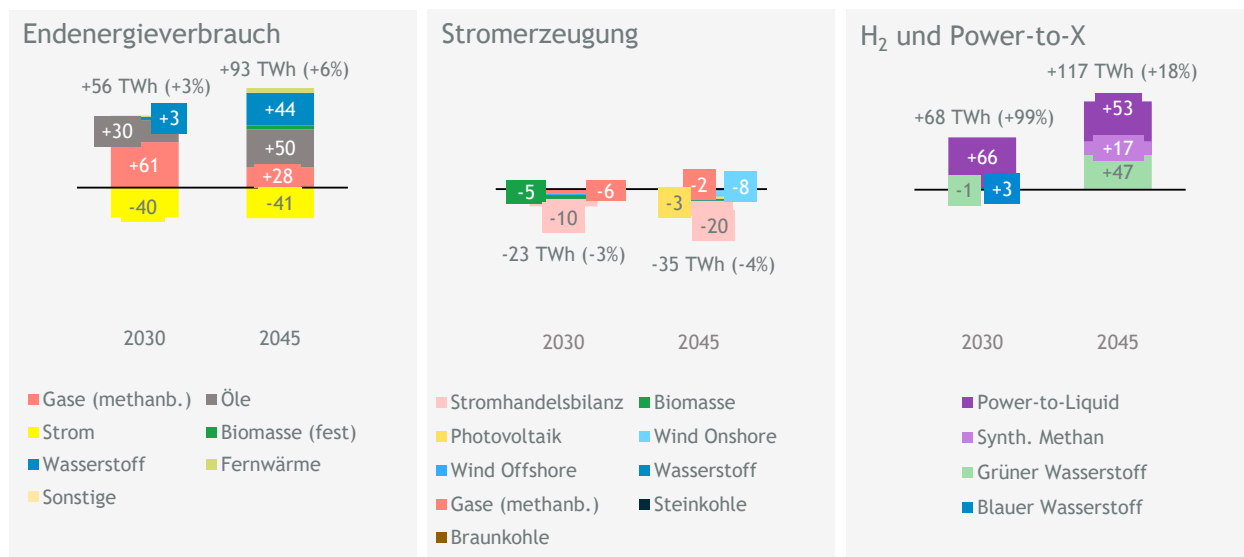


Abbildung 32: Übersicht zentraler Ergebnisse der Pfadausprägung „More Molecules“

In der „More-Molecules“-Pfadausprägung werden deutlich mehr gasförmige und flüssige Energieträger nachgefragt als in KN100. Im Jahr 2030 werden daher 68 TWh (+99 %) mehr synthetische Energieträger eingesetzt als im KN100-Szenario. Im Jahr 2045 beträgt der Anstieg 117 TWh (+18 %). Im Jahr wird 2030 ca. 66 TWh mehr Power-to-Liquid benötigt, um die Sektorziele in den Endverbrauchssektoren zu erreichen. Im Industriesektor wird außerdem mehr Wasserstoff eingesetzt als im Hauptszenario. Insbesondere mit Blick auf die Anforderungen an den Hochlauf der PtL-Produktion bis 2030 ist bei dieser Pfadausprägung die Umsatzbarkeit fraglich. Auch im Jahr 2045 nimmt der Einsatz von Power-to-Liquid in den Endverbrauchssektoren gegenüber dem Hauptszenario zu. Außerdem wird im Gegensatz zum Hauptszenario auch 2045 synthetisches Methan eingesetzt.

Literaturverzeichnis

Agora Energiewende & AFRY Management Consulting (2021) No-regret hydrogen: Charting early steps for H₂ infrastructure in Europe. BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020) Effizienz und Kosten: Lohnt sich der Betrieb eines Elektroautos?, Stand: 17.07.2020, URL: <https://www.bmu.de/WS5549>, zuletzt abgerufen am 30.09.2021.

dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH (2012) Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030.

Fernleitungsnetzbetreiber (2021) Netzentwicklungsplan Gas 2020-2030.

Hölling, M., Weng, M., & Gellert, S. (2017) Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff, Stahl und Eisen, Vol. 137(6), 47-53.

Jens, J., Wang, A., van der Leun, K., Peters, D. & Buseman, M. (2021) Extending the European Hydrogen Backbone - A European hydrogen infrastructure vision covering 21 countries.

Öko-Institut e.V. (2021) Natürliche Senken - Die Potenziale natürlicher Ökosysteme zur Vermeidung von THG-Emissionen und Speicherung von Kohlenstoff. Modellierung des LULUCF-Sektors sowie Analyse natürlicher Senken. Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

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

Randelhoff, M. (2017) Effizienzgewinne und Rebound-Effekte: Umweltwirkungen des Dieselantriebs im Vergleich, Stand: 29.08.2017, URL: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/164605/analyse/spezifische-co2-emissionen-diesel-pkw-ottomotor-potenziale-treibhausgasemissionen-thg/>, zuletzt abgerufen am 30.09.2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (2020) National Inventory Submissions 2020, URL: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2020>, zuletzt abgerufen am 30.09.2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (2021) National Inventory Submissions 2021, URL: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2021>, zuletzt abgerufen am 30.09.2021.

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke (2020) Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien.

Abkürzungsverzeichnis

BECCS	Bio-Energy Carbon Capture and Storage
BEV	Batterieelektrische Fahrzeuge
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CNG	Erdgas (Compressed Natural Gas)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente
dena	Deutschen Energie-Agentur GmbH
DRI-EAF Route	Wasserstoffbasierte Direktreduktion und anschließender Schmelze in Elektrolichtbogenöfen
EAF	Elektrolichtbogenöfen
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH
FIW	Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GuD-Kraftwerke	Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke
GW	Gigawatt
ITG	Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH
KN100	Klimaneutralität 100
KSG	Klimaschutzgesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Flüssigerdgas (Liquified Natural Gas)
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry
Mt	Megatonne
MTO/MTA	Methanol-to-Olefins/-Aromatics-Verfahren
NE	Nichtenergetisch

ÖSPV	Öffentlichen Straßenpersonennahverkehr
PHEV	Plug-in hybride Fahrzeuge
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik
SMR	Steam Methane Reforming
SUVs	Geländewagen
TWE	Solare Trinkwassererwärmung
TWh	Terawattstunden

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aggregierter Endenergieverbrauch der Verbrauchssektoren nach Energieträgern	1
Abbildung 2: Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukten	4
Abbildung 3: Entwicklung der Netto-Treibhausgasemissionen	5
Abbildung 4: Übersicht zum methodischen Vorgehen bei der Modellierung	6
Abbildung 5: Technologische und transformatorische Ansätze im Verkehrssektor	8
Abbildung 6: Entwicklung des PKW-Bestandes	9
Abbildung 7: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor	10
Abbildung 8: Übersicht der Industriebranchen und Prozesse	11
Abbildung 9: Übersicht der Technologietransformation ausgewählter Industriebranchen	12
Abbildung 10: Endenergieverbrauch im Industriesektor	15
Abbildung 11: Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität im Gebäudesektor	16
Abbildung 12: Entwicklung des Wohngebäude- und Wohnungsbestandes	17
Abbildung 13: Kumulierte Anzahl der modernisierten Wohngebäude und -einheiten im Zeitraum 2020-2045	17
Abbildung 14: Entwicklung der Absatzzahlen für zentrale Wärmeerzeuger im Wohngebäudebereich im Vergleich zu Gesamtabsatzzahlen	18
Abbildung 15: Resultierende Beheizungsstruktur nach Hauptwärmeerzeuger/Energieträger in Wohngebäuden .	19
Abbildung 16: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor	20
Abbildung 17: Aggregierter Endenergieverbrauch der Verbrauchssektoren nach Energieträgern	21
Abbildung 18: Nettostromerzeugung nach Energieträgern	23
Abbildung 19: Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukten	24
Abbildung 20: Herkunft von Wasserstoff und Folgeprodukten	25
Abbildung 21: Technische CO ₂ -Vermeidung und -Senken in den Sektoren Energie und Industrie	26
Abbildung 22: Entwicklung der Netto-Treibhausgasemissionen	27
Abbildung 23: Energieverbräuche nach Gasfamilie	29
Abbildung 24: Übersicht zur Ausgestaltung der Pfadausprägungen	31
Abbildung 25: PKW-Bestand nach Pfadausprägung	32
Abbildung 26: Anteil von Strom am Endenergieverbrauch der Sonstigen Industrie	33
Abbildung 27: Beheizungsstruktur der Pfadausprägungen in Wohngebäuden	34
Abbildung 28: Übersicht zentraler Ergebnisse des Hauptszenarios KN100	35
Abbildung 29: Übersicht zentraler Ergebnisse der Pfadausprägung „More Electrons“	36
Abbildung 30: Übersicht zentraler Ergebnisse der Pfadausprägung „Efficient Electrons“	36
Abbildung 31: Übersicht zentraler Ergebnisse der Pfadausprägung „Efficient Molecules“	37
Abbildung 32: Übersicht zentraler Ergebnisse der Pfadausprägung „More Molecules“	38



dena-Leitstudie

Aufbruch Klimaneutralität

Anhang

Anhang

Der Begriff Klimaneutralität im Rahmen der dena-Leitstudie

Im Klimaschutzgesetz bekennt sich die Bundesregierung zum Ziel der Erreichung von Treibhausgasneutralität bis 2045 und bestärkt damit die deutsche Erklärung vor dem Klimagipfel der Vereinten Nationen vom September 2019. Das hierin ausgedrückte Klimaschutzverständnis und die daraus abgeleiteten sektoralen Vorgaben und Instrumente bilden für die Arbeit im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität die Grundlage für Diskussionen und Modellierungen. Gleichzeitig wird auch die internationale Debatte betrachtet, insbesondere die EU-weite Diskussion über europäische und nationale Minderungsziele.

Der Begriff der „**Treibhausgasneutralität**“ beschreibt gemäß Klimaschutzgesetz das Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Treibhausgasemissionen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken. Zu den Treibhausgasen (THG) zählen dabei neben Kohlendioxid (CO_2) auch Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O – Lachgas), Schwefelhexafluorid (SF_6), Stickstofftrifluorid (NF_3) und die Stoffgruppen der Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW; $\text{C}_n(\text{H|F})_{2n+2}$) sowie der perfluorierten Kohlenwasserstoffe (FKW; $\text{C}_n\text{F}_{2n+2}$). Die verschiedenen Gase tragen nicht in gleichem Maße zur Erwärmung der Atmosphäre durch den Treibhauseffekt bei und verbleiben zudem unterschiedlich lange in der Atmosphäre. Um die Wirkung verschiedener Treibhausgase vergleichbar zu machen, können diese in CO_2 -Äquivalente ($\text{CO}_2\text{-ä}$) umgerechnet und zusammengefasst werden. Darüberhinausgehend beschreibt der Begriff der „**Klimaneutralität**“ den Zustand, in dem sich die Wirkungen sämtlicher anthropogener und natürlicher temperaturbeeinflussender Faktoren gegenseitig aufheben, sodass sich die globale Durchschnittstemperatur stabilisiert. Zu den hierfür relevanten Faktoren gehören neben den Treibhausgasemissionen beispielsweise auch Veränderungen der Luftverschmutzung (durch z. B. Ruß, Schwefeldioxid (SO_2) oder Feinstaub), der Wolkenbedeckung (Höhe und Art der Wolken) sowie das Rückstrahlvermögen (Albedo) der Erdoberfläche.

Im Rahmen dieses Projekts wird in der Modellierung und der Diskussion von Maßnahmen gemäß der aktuellen Gesetzgebung auf den vollständigen Ausgleich der nationalen THG-Emissionen aus allen Quellen und Sektoren durch **weitestgehende Minderung** menschgemachter Emissionen und den Abbau verbleibender Emissionen durch **technische und natürliche Senken** auf „Netto-Null“ fokussiert. Neben CO_2 werden dabei – so weit möglich – auch die wichtigsten CO_2 -Äquivalente berücksichtigt, etwa bestimmte Methanquellen im Energie- und Verkehrssektor sowie anthropogene Quellen für Methan und Lachgas in der

Landwirtschaft. Dabei wird das gesamtgesellschaftliche Ziel der Erreichung von Klimaneutralität – bei allen dabei zu bewältigenden Herausforderungen – auch als **Innovationstreiber für den Wirtschaftsstandort Deutschland** gesehen, welcher weitere Verbesserungen der Energieeffizienz und Produktivität ermöglicht und durch den frühen und breiten Einsatz von THG-armen und neutralen Prozesstechnologien sowie von Energiewende- und Negativemissionstechnologien **unternehmerische und industriepolitische Chancen** bietet.

„Zeitliche Bilanzierungsgrenze“: Das Zieljahr 2050 vs. ein THG-Budget bis 2050

Aufgrund der langfristigen Klimawirksamkeit von Treibhausgasen sind zur Stabilisierung der globalen Durchschnittstemperatur nicht nur die Emissionen eines einzelnen Jahres relevant, sondern die über mehrere Dekaden kumuliert emittierten Treibhausgase. Dabei war man bis um das Jahr 2000 von allmählich stattfindenden Veränderungen durch einen quasi-linearen Zusammenhang zwischen den Gesamtemissionen seit 1870 und dem Temperaturanstieg ausgegangen. Inzwischen geht die internationale Forschungsgemeinschaft im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung eher von einer nicht-linearen Dynamik und der Möglichkeit diskontinuierlicher, irreversibler und extremer Ereignisse durch „Kipppunkte“ (Tipping Points) des Klimasystems aus.

In jedem Fall gilt: Für eine wirksame Begrenzung der Erderwärmung muss die Menge der gesamthaft ausgestoßenen Treibhausgase begrenzt werden, statt nur auf ausgeglichene Bilanzen in einem Zieljahr hinarbeiten. Die in der Atmosphäre als „Treibhausgasdeponie“ kumuliert angesammelten Emissionen bestimmen die Gesamtbilanz der anthropogenen Klimawirkung. Die Form des Minderungspfads und die Minderungsgeschwindigkeit sind wesentlich zur Erreichung der Klimaziele.

Im Jahr 2015 hatte die weltweite Staatengemeinschaft mit dem Klimaabkommen von Paris das Ziel gefasst, die Erderwärmung im globalen Mittel auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst auf 1,5 Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Als Beitrag zum Parisabkommen hat sich die Europäische Union bereits 2015 im Rahmen der „Nationally Determined Contribution“ (NDC) verpflichtet, ihre THG-Emissionen bis 2030 um mindestens 40 Prozent gegenüber 1990 zu

senken¹. Mittlerweile wurde das Minderungsziel der Europäischen Union auf 55 Prozent bis 2030 angehoben. Das Ziel des European Green Deal ist zudem die EU-weite Treibhausgasneutralität bis 2050. Im Rahmen der EU-Klimaschutzverordnung² werden die individuellen nationalen Minderungsziele nach dem jeweiligen Bruttoinlandsprodukt pro Kopf berechnet: Länder mit hoher Wirtschaftskraft müssen größere THG-Minderungen vornehmen. Alternative Berechnungsmethoden verwenden als Bezugspunkt zur Ermittlung der für ein Land verbleibenden Budgets das aktuelle Niveau der CO₂-Emissionen oder dessen Anteil an der Weltbevölkerung.

Im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität können (und sollen) keine normativen Aussagen dazu getroffen werden, welcher Anteil des weltweit verbleibenden Restbudgets von THG-Emissionen im Sinne einer fairen globalen Lastenteilung für Deutschland verbleiben kann.

Bei einer Betrachtung, die sich an verbleibenden Emissionsbudgets orientiert, wäre eine möglichst frühzeitig starke Minderung der THG-Emissionen wichtig, um dadurch etwas mehr Zeit (= verbleibendes Restbudget) für die voraussichtlich besonders herausfordernden „letzten Prozente“ zu schaffen – zur direkten Reduzierung von verbleibenden Emissionen oder für den Hochlauf von Negativemissionstechnologien.

„Räumliche Bilanzierungsgrenze“: Deutschland vs. Europa vs. Welt

Die Atmosphäre der Erde ist global: Treibhausgas-Emissionen wirken ebenso global wie auch der Klimawandel ein globales Phänomen ist. Daher muss auch Klimaneutralität als globales Ziel mit gemeinsamen internationalen Anstrengungen verfolgt werden. Dabei werden einige Länder möglicherweise bereits eine netto-negative Emissionsbilanz erreicht haben, während andere Länder noch positive THG-Emissionen ausweisen. Auch sind die Potentiale zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre innerhalb der Staatsgrenzen sehr unterschiedlich, sodass manche Länder ggf. die Potentiale anderer Staaten mobilisieren müssen, um Klimaneutralität zu erreichen.

Die Vereinbarungen des Kyoto-Protokolls erlauben den Staaten, im Rahmen des „Clean Development Mechanism“ einen Teil ihrer Emissionsreduktionsverpflichtungen durch den Ankauf von Emissionsgutschriften aus anderen Staaten zu erfüllen. Dies darf jedoch nicht dazu führen, dass einzelne Staaten bzw. Gruppen

von Emittenten sich darauf verlassen, dass andere Akteure die notwendigen Maßnahmen zur Emissionsminderung und/oder zur aktiven Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre vornehmen werden.

Die Modellierung im Rahmen dieses Projekts nutzt die gängigen Regeln der THG-Bilanzierung auf nationaler und internationaler Ebene. Die Entwicklung der Transformationspfade aller Sektoren zielte mit den projektbeteiligten Unternehmen und Verbänden darauf ab, dass jeder Sektor bzw. jede Verbrauchsgruppe die durch das eigene Verhalten verursachten THG-Emissionen weitestgehend zu vermeiden bzw. zu reduzieren versucht. Auch in der Diskussion lag der Fokus auf Maßnahmen, um die für Deutschland bilanzierten CO₂-Emissionen zu reduzieren bzw. durch zusätzliche natürliche und/oder technische Senken aktiv auszugleichen. Zusätzlich sollen auch die Möglichkeiten des europäischen Binnenmarkts und der globalen Märkte für Energieträger, Rohstoffe und Produkte sowie ggf. Emissionsminderungszertifikate genutzt werden.

Wo ökonomisch vorteilhaft und ökologisch nicht nachteilig, können daher über sektorale und nationale Maßnahmen hinaus auch nationale, europäische und/oder internationale Ausgleichsmechanismen genutzt werden, um verbleibende Restemissionen einer Akteursgruppe durch andere Akteure bzw. in anderen geographischen Räumen auszugleichen. Langfristig sollten Emissionsgutschriften nur noch aus Negativemissionen generiert werden dürfen.

„Bilanzierungsprinzip“: Quell- vs. Verursacherprinzip

Nach den derzeit gültigen Standards bei der Bilanzierung von Treibhausgasemissionen wird das „Quellprinzip“ angewendet, beispielsweise im jährlich an die UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) und die Europäische Union zu übermittelnden „Nationalen Inventarbericht über die Treibhausgasemissionen“ sowie im Rahmen des kontinuierlichen nationalen Monitorings durch die Bundesregierung. Dabei werden Emissionen nach ihrem „Entstehungsort“ bilanziell demjenigen Sektor oder Staat zugeordnet, in dem Treibhausgase physisch in die Atmosphäre entweichen, beispielsweise durch Umwandlung oder Endverbrauch von Energieträgern sowie durch Industrieprozesse. Emissionen aus vorgelagerter Wertschöpfung werden hierbei nur dann erfasst, wenn sie ebenfalls im Bilanzierungsraum entstehen.

¹ Das genannte Minderungsziel wurde im März 2015 in Vorbereitung der Pariskonferenz (Dezember 2015) als „Intended Nationally Determined Contribution of the EU and its Member States“ beim NDC-Registry der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) gemeldet und im Oktober 2016 als NDC gemeldet bzw. bestätigt.

² Die EU-Lastenteilungsentscheidung (Effort Sharing Decision) von 2009 für den Zeitraum 2013 bis 2020 sowie die EU-Klimaschutzverordnung (Effort Sharing Regulation) von 2018 für den Zeitraum 2021 bis 2030.

Durch das Quellprinzip ergeben sich jedoch Probleme bei der Analyse notwendiger Maßnahmen zur Verringerung von Emissionen bzw. bei der Verbuchung erreichter Minderungserfolge – sowohl im nationalen Monitoring als auch bei internationalen Bilanzierungen. Schwierigkeiten bei der verantwortungsgerechten Zuordnung von Treibhausgasemissionen bzw. Minderungserfolgen ergeben sich beispielsweise durch „indirekte Emissionen“ sowie durch „graue Emissionen“, welche zwar maßgeblich durch die Nachfrage aus einem Sektor bzw. einem Staat beeinflusst werden, bilanziell dagegen aber einem anderen Sektor bzw. Staat zugeordnet sind.

So ist der Stromverbrauch privater Haushalte in der Energiebilanz zwar den Haushalten zugeordnet, die meisten hierdurch verursachten Emissionen entstehen jedoch bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe in Kraftwerken und sind deshalb dem Sektor Energiewirtschaft zugeordnet. In den Verbrauchssektoren wird die Nutzung von Strom mit null Emissionen ausgewiesen, etwa bei der strombasierten Erzeugung von Raumwärme im Gebäudesektor oder für den elektrischen Verkehr auf der Schiene und der Straße. Auch Emissionen der zur Gebäudeversorgung eingesetzten Fernwärme werden nicht dem Gebäude- sondern dem Energiesektor zugeschlagen. In den Verbrauchssektoren können daher neben den in der Quellbilanz ausgewiesenen „direkten Emissionen“ (im Gebäudesektor durch den Energieträgereinsatz zur Gebäude-integrierten Wärmebereitstellung, im Verkehrssektor durch die Verbrennung von Kraftstoffen im Straßen-, Schienen- und nationalen Luft- und Seeverkehr) auch erhebliche „indirekte Emissionen“ entstehen. Zudem können auch „graue Emissionen“ entstehen, etwa die Treibhausgasemissionen aus Herstellung, Errichtung und Instandsetzung von Gebäuden, die dem Sektor Industrie zugeordnet werden. Auch auf internationaler Ebene entstehen indirekte THG-Emissionen (etwa beim Stromimport) oder/und graue Emissionen (beispielsweise beim Import von Gütern oder Rohstoffen).

Bei Anwendung des Quellprinzips werden zudem auch bei klimaneutraler Bereitstellung eines Rohstoffs oder Energieträgers die negativen Emissionen der Erzeugung nicht auf denjenigen Sektor oder Staat übertragen, welcher diese beauftragt bzw. finanziert hat. Beim Import von Powerfuels (aus EE-Strom mit nachhaltigen CO₂ produzierte gasförmige oder flüssige Energieträger oder Rohstoffe), werden nach heutigen Bilanzierungsregeln die beim Verbrauch entstehenden Emissionen im Letztverbrauchersektor bzw. -staat ausgewiesen, die bei der Erzeugung vorgenommene CO₂-Minderung bleibt in der THG-Bilanz des Letztverbrauchers unberücksichtigt.

Nach dem „**Verursacherprinzip**“ (auch „Verbraucherprinzip“) dagegen werden THG-Emissionen der gesamten vorgelagerten Wertschöpfungskette beim Verbraucher bilanziert. Diese beinhalten auch Emissionen aus dem Bezug von Strom und Wärme aus der öffentlichen Versorgung in einen Endverbrauchssektor sowie internationale Energieträgerimporte (bspw. Stromimporte). Zudem müssen die Vorkettenemissionen von Gewinnung, Raffinerie und Transport von Energieträgern berücksichtigt werden. Gegenüber dem Quellprinzip ist eine verursachergerechte THG-Bilanzierung deutlich komplexer umzusetzen, da hierzu eine allumfassende internationale Bilanzierung und Zuordnung der Emissionen zur Umlegung auf alle nachfolgenden Wertschöpfungsstufen bis zum Letztverbraucher erfolgen muss; regionale oder sektorale Systemgrenzen sind dabei nicht zulässig.

Für eine aussagekräftige, verantwortungsgerechte Bilanzierung von Emissionen ist das Quellprinzip nicht ausreichend, da die Nichtberücksichtigung außerbilanzieller Emissionen zu falschen Anreizen führen kann. Damit die Konsumententscheidungen der Verbrauchsebenen (Haushalt, Gruppe, Sektor, Branche, Region, Nation, Kontinent) zur Erreichung der Klimaziele beitragen, müssen die damit verbundenen THG-Emissionen durch bilanzielle Zuordnung zur letztverbrauchenden Instanz „eingepreist“ werden. Hierdurch können klimafreundliche Optionen wirtschaftlich vorteilhaft(er) gegenüber THG-intensiven Optionen werden.

Im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität wird bei den Modellierungen grundsätzlich das im Rahmen der internationalen Treibhausgas-Berichterstattung übliche Quellprinzip verwendet. Davon abweichend wird jedoch der Import von Powerfuels mit einem CO₂-Faktor von Null ausgewiesen (basierend auf der Annahme, dass solche klimafreundlich erzeugten synthetischen Energieträger und Rohstoffe nur gehandelt werden, wenn in einem angepassten Bilanzierungsmechanismus die Weitergabe der bei der Erzeugung erzielten CO₂-Minderung durch Zertifikate ermöglicht wird). Zudem wird für ausgewählte einzelne Bereiche zusätzlich zur Quellbilanz eine verursacherorientierte Darstellung von Emissionen als Ergänzung erarbeitet, teilweise etwa für die oben genannten Beispiele für indirekte Emissionen aus dem Gebäude, Industrie und Verkehrssektor sowie der Energiewirtschaft. In der qualitativen Diskussion der sektorspezifischen Transformationspfade und möglicher Maßnahmen zur THG-Minderung werden dagegen soweit möglich auch Vorkettenemissionen berücksichtigt.

Die Rolle von klimaneutralen Gasen und Flüssigkeiten im Rahmen der dena-Leitstudie

Schon die dena-Leitstudie Integrierte Energiewende hat gezeigt: Auch bei einer weitreichenden Steigerung der Energieeffizienz in allen Sektoren und einer umfassenden Elektrifizierung werden in einem klimaneutralen Energie- und Wirtschaftssystem weiterhin Gase und Flüssigkeiten als Energieträger und Grundstoffe für verschiedenste Anwendungen benötigt. So sind beispielsweise aus heutiger Perspektive für manche Anwendungsbereiche wie Flugverkehr oder maritimer Schiffsverkehr keine batterieelektrischen Antriebe absehbar. In der Industrie werden zukünftig klimaneutrale Grundstoffe zur stofflichen Verwendung benötigt, sei es als Ausgangsprodukte für die Chemieindustrie oder als Reduktionsmittel in der Stahlindustrie. Und es gibt weitere Einsatzgebiete, bei denen eine vollständige, alle heutigen Anwendungen umfassende Elektrifizierung nicht plausibel scheint – insbesondere mit Blick auf die große Zahl bestehender technischer Anlagen in Gebäuden und Fahrzeugen. Für diese Anwendungen müssen zur Erreichung der Klimaziele klimaneutrale gasförmige und flüssige Energieträger bereitstehen.

Zusätzlich kann mit dem Aufbau eines internationalen Handels für klimaneutrale Energieträger und Grundstoffe die Transformation zu Klimaneutralität abgesichert werden und gegebenenfalls sogar beschleunigt verlaufen, wenn klimaneutrale Gase und Flüssigkeiten schneller und in größeren Mengen verfügbar sein sollten.

Grundsätzlich gibt es in der dena-Leitstudie – wie in vielen anderen Studien – Übereinstimmung, dass klimaneutrale Gase und Flüssigkeiten für die Erreichung der Klimaziele notwendig sind. Über das genaue Verhältnis von gasförmigen und flüssigen Energieträgern zu elektrischer Energie, zum Einsatz in den verschiedenen Anwendungsgebieten und im zeitlichen Verlauf sowie zur Gewichtung von nationaler und internationaler Produktion und Handel wird in der Fachöffentlichkeit intensiv diskutiert, und es besteht weiterer Erkenntnisbedarf.

Begriffe und Optionen: Bereitstellung und Verwendung von klimaneutralen Gasen und Flüssigkeiten

In den Verbrauchssektoren Gebäude, Industrie und Verkehr sowie der Energiewirtschaft wird auch zukünftig eine bestimmte Menge an gasförmigen und flüssigen Energieträgern und Grund-

stoffen benötigt. Zur Erreichung der Klimaziele müssen diese vollständig klimaneutral hergestellt sein. In der Diskussion hierzu wird eine Vielzahl an Begriffen genutzt, die jeweils verschiedene Herstellungs- und Anwendungsoptionen betonen und im fachlichen Diskurs nicht immer trennscharf sind. Der Verwendung der Begriffe in der dena-Leitstudie liegt folgendes Verständnis zugrunde:

Klimaneutrale Gase und Flüssigkeiten

Klimaneutrale Gase und Flüssigkeiten umfassen Gase und Flüssigkeiten biogenen Ursprungs und solche, die durch Elektrolyse von Wasserstoff mit erneuerbarem Strom und gegebenenfalls weitergehenden Syntheseschritten hergestellt sind.

Klimaneutral bedeutet dabei, dass im Grundsatz bei ihrer Verwendung nur so viel CO₂ emittiert wird, wie bei der Herstellung aus der Atmosphäre entnommen wird. Bei biogenen Energieträgern geschieht dies durch natürliche Prozesse, bei synthetischen Energieträgern (außer bei Wasserstoff) muss CO₂ zugeführt werden, das an anderer Stelle abgeschieden wird. Trotzdem ist die Beschreibung dieser Gase und Flüssigkeiten als „klimaneutral“ nicht vollständig exakt. Denn bei der Verarbeitung und beim Transport dieser Energieträger entstehen Emissionen in geringerem Umfang, welche allerdings nach bestehenden Methoden umfassend dokumentiert und verifiziert werden können.³ In der dena-Leitstudie wird vereinfachend durchgängig der Begriff klimaneutrale Gase und Flüssigkeiten verwendet. Denn in den Szenariorechnungen der Studie werden bei Herstellung in Deutschland die Vorkettenemissionen nach Quellprinzip in den Herstellungssektoren bilanziert (z. B. im Landwirtschaftssektor). Der Einsatz der Energieträger ist dadurch bilanziell klimaneutral.

Auch bei Importen werden Vorkettenemissionen in den Herkunftsländern bilanziert. Allerdings sind – abweichend vom Quellprinzip – die bei der Herstellung verursachten Negativemissionen nicht im Herstellungsland, sondern am Einsatzort bilanziert. Innerhalb dieses, für die Studie gewählten Bilanzrahmens, sind importierte Powerfuels bei Verwendung in Deutschland bilanziell klimaneutral.

In der Übergangsphase bis 2045 können neben klimaneutralen Energieträgern auch CO₂-arme Energieträger eine Rolle spielen, etwa blauer Wasserstoff. Außerdem kann der CO₂-Fußabdruck von Energieträgern durch die Beimischung von klimaneutralen Energieträgern wie Biomethan absenkt werden.

³ Weitere Umweltauswirkungen mit Blick auf Wasser- und Landnutzung werden vor allem durch die Wahl der Ausgangsstoffe und Produktionskonzepte bestimmt und sollen durch allgemeinere über den Energiesektor hinausgehende Nachhaltigkeitsanforderungen, wie z. B. Vorgaben zum Gewässerschutz oder zur guten landwirtschaftlichen Praxis, weitestgehend vermieden werden.

Um klimaneutrale Energieträger und Grundstoffe zu erzeugen, sind grundsätzlich zwei unterschiedliche Routen zu unterscheiden, diese sind die **biogene und synthetische Erzeugung**.

Biogene Gase und Flüssigkeiten

Biogas ist ein aus biogenen Roh- oder Reststoffen gewonnenes Gasgemisch, das in Deutschland bisher meist zur Verstromung und in KWK-Anlagen zum Einsatz kommt. Aus der Aufreinigung von Biogas wird **Biomethan**, das analog zu Erdgas (fossilem Methan) eingesetzt und den bestehenden Erdgasnetzen beigemischt wird. Aktuell ist Biogas das am weitesten verbreitete klimaneutrale Gas.

Die Herstellung von **biogenen Flüssigkeiten** basiert ebenfalls auf biogenen Rohstoffen oder Reststoffen. Breit im Einsatz sind beispielsweise Ethanol als Teil von Benzin sowie Fettsäuremethylester als Beimischung in Dieselmotorkraftstoff.

Das Potenzial von Biomasse ist durch Flächenverfügbarkeit begrenzt. Biomasse wird aber auch im Jahr 2045 noch eine wichtige Rolle spielen. Bei der Beimischung biogener Gase oder Flüssigkeiten in die bestehenden Energieinfrastrukturen reduziert der biogene Ursprung die Gesamtemissionsbilanz des Endprodukts um die Menge, die vorher der Atmosphäre entnommen wurde.

Powerfuels: Synthetische Gase und Flüssigkeiten

Den Begriff **Powerfuels** hat die dena im Jahr 2018 in der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende geprägt, um die Bandbreite aller mit erneuerbarem Strom (Power) hergestellten Gase und Flüssigkeiten (fuels) abzubilden. Dieser Sammelbegriff umfasst also **grünen Wasserstoff** ebenso wie daraus erzeugte Derivate. Powerfuels können als Energieträger sowie als Grundstoffe (Feedstock) für die Industrie zum Einsatz kommen. Dazu zählen neben Wasserstoff (H_2) auch gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffe (C_xH_y), wie **Methan, Benzin, Diesel** oder **Kerosin** sowie beispielsweise **Ammoniak** (NH_3) und **Methanol** (CH_3OH). Nicht unter den Begriff Powerfuels fallen also biogene Gase und Flüssigkeiten, der blaue Wasserstoff⁴ und der graue Wasserstoff⁵. Den grundsätzlichen Unterschied zwischen Wasserstoff und allen weiteren Powerfuels macht der zusätzliche Energieaufwand aus, der durch die weitere Synthesestufe und ggf. für die CO_2 -Abscheidung und Bereitstellung anfällt.

Weitere Begriffe im Kontext

PtG (Power-to-Gas): Die Herstellung synthetischer Gase durch strombasierte Erzeugung von Wasserstoff (Wasserstoff-Elektrolyse), der anschließend ggf. durch eine chemische Reaktion mit Kohlenstoffdioxid zu Methan weiterverarbeitet werden kann (Methanisierung), wird als PtG bezeichnet.

PtL (Power-to-Liquid): Die Herstellung synthetischer flüssiger Energieträger und Grundstoffe durch Synthetisierung von durch Elektrolyse erzeugtem Wasserstoff, beispielsweise zu Benzin, Diesel und Kerosin oder Methanol wird PtL genannt. Dieser Begriff legt den Fokus auf die Herstellungsart (Power-to-Liquid; Umwandlung von Strom in Flüssigkeiten). Bei der Verwendung von erneuerbarem Strom entspricht PtL der Kategorie flüssige Powerfuels.

E-Fuels und Synfuels: In der Fachöffentlichkeit sind unterschiedliche Definitionen für den Begriff E-Fuels gebräuchlich. Die dena definiert E-Fuels analog zu Powerfuels als „auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte gasförmige und flüssige Kraftstoffe wie Wasserstoff, Methan, synthetische Otto- und Dieselmotorkraftstoffe inklusive Kerosin“ (vgl. dena/LBST (2017): E-Fuels Study).⁶ Mit der Bezeichnung wird das Einsatzgebiet als Kraftstoff, etwa für den Flugverkehr, herausgestellt. Synfuels bezeichnet die durch Syntheseschritte entstehenden Energieträger aufbauend auf Wasserstoff. Begrifflich werden Synfuels häufig mit E-Fuels und Powerfuels gleichgesetzt. Wasserstoff selbst ist jedoch kein Synfuel.

Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBOs): Auf europäischer Ebene wird im Entwurf der Erneuerbare-Energien-Richtlinie REDIII vom 14. Juli 2021 ähnlich der hier gewählten Unterscheidung differenziert: Die Bezeichnung Renewable fuels of non-biological origin (RFNBO) entspricht den Powerfuels. Für Kraft- und Brennstoffe auf biogener Basis werden andere Bezeichnungen verwendet. In der aktuell geltenden REDII sind RFNBO bislang nur auf die Nutzung im Verkehrssektor beschränkt.

⁴ Wird durch die Spaltung von Erdgas in Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff mit Hilfe von Dampfreformierung gewonnen. Anfallendes Kohlenstoffdioxid wird abgeschieden und anschließend gespeichert (CCS). Blauer Wasserstoff ist dabei nicht klimaneutral.

⁵ Wasserstoff, der aus fossilen Brennstoffen wie Erdgas oder Kohle unter Inkaufnahme von dabei entstehenden THG-Emissionen erzeugt wird. Das bisher meistverwendete Verfahren ist die Dampfreformierung.

⁶ Ludwig-Bülow-Systemtechnik GmbH (LBST) und Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2017.

Die Rolle von klimaneutralen Gasen und Flüssigkeiten in der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität

Um einen möglichst robusten und realistisch umsetzbaren Transformationspfad zur Klimaneutralität zu erreichen, wurden im Rahmen der dena-Leitstudie Abwägungen zu den Herausforderungen in den einzelnen Verbrauchssektoren und der Energiewirtschaft getroffen. Dazu zählen Annahmen zu den Entwicklungsgeschwindigkeiten und zu den nötigen Transformationsschritten zur Erreichung der Klimaziele in den Jahren 2030, 2040 und 2045. Passend zu den Veränderungen in den Verbrauchssektoren und dem Einsatz neuer Technologien müssen parallel auch die zugehörigen Infrastrukturen entwickelt werden. Für eine verstärkte Wasserstoffnutzung braucht es beispielsweise ein neues Wasserstoffnetz, das u. a. durch Umwidmung existierender Gasnetze sukzessive und in Koordination mit den Veränderungen in den Verbrauchssektoren entsteht.

Erreichung der Klimaziele 2030

Bis 2030 werden in der dena-Leitstudie klimaneutrale Energieträger und Grundstoffe für die Verwendung in den einzelnen Sektoren und die Erreichung der Klimaziele genutzt. Diese haben insbesondere biogenen Ursprung. Powerfuels kommen auch, aber in geringen Mengen zum Einsatz.

Im **Gebäudesektor** werden im Jahr 2030 insgesamt 32 TWh klimaneutrale Energieträger eingesetzt. Der Großteil davon in Form von Biomethan für die Gasnachfrage. Die im Vergleich zu 2020 von 354 TWh auf 250 TWh sinkende Gasnachfrage im Gebäudesektor wird damit in Teilen klimaneutral gedeckt. Wasserstoff spielt mit einem Anteil von 5 TWh eine untergeordnete Rolle und kommt im Rahmen der im Gasnetz zulässigen Beimischungsgrenzen zum Einsatz. Der Bedarf an flüssigen Energieträgern geht bis 2030 im Vergleich zu 2020 um rund 52 Prozent auf 87 TWh zurück, wird im Jahr 2030 aber noch vollständig mit Energieträgern fossilen Ursprungs gedeckt.

Auch in der **Industrie** nimmt 2030 die Nachfrage nach Methan mit einem Verbrauch von 146 TWh (davon 121 TWh energetisch, 24 TWh stofflich) weiterhin eine wichtige Rolle ein. Zum Teil ist Methan bereits durch Stromanwendungen und Wasserstoff substituiert. 16 TWh des verwendeten Methans sind biogenen Ursprungs. Wasserstoff ersetzt zum Beispiel in der Stahlindustrie die Koks Kohle und dient als Ersatz von fossilem Gas und Kohle zur Gewinnung von Prozesswärme bei Hochtemperaturprozessen. Der Bedarf an klimaneutralem und CO₂-armem Wasserstoff in der Industrie beträgt 51 TWh (24 TWh energetisch, 27 TWh).

Klimaneutrale flüssige Energieträger kommen noch nicht zum Einsatz, der Bedarf an Ölen als Energieträger sinkt jedoch gegenüber 2018 um rund die Hälfte.

Im **Verkehrsbereich** werden 2030 rund 32 TWh klimaneutrale flüssige Energieträger und 13 TWh Biomethan sowie 9 TWh Wasserstoff als gasförmige Energieträger eingesetzt. 28 TWh der klimaneutralen flüssigen Energieträger sind biogenen Ursprungs. Zusätzlich werden 4 TWh flüssige Powerfuels überwiegend für die Luftfahrt eingesetzt. Wasserstoff kommt vor allem bei schweren LKWs zum Einsatz. Die Gesamtmenge der flüssigen Energieträger sinkt von 744 TWh im Jahr 2018 auf 446 TWh im Jahr 2030 und damit um rund 40 Prozent und wird durch den Einsatz der genannten klimaneutralen Energieträger defossilisiert.

Klimaneutralität im Jahr 2045

Von 2030 bis zur Klimaneutralität im Jahr 2045 nehmen Powerfuels in der dena-Leitstudie eine immer größere Rolle ein.

Im **Gebäudesektor** sinkt bis 2045 die absolute Nachfrage nach gasförmigen und flüssigen Energieträgern durch Elektrifizierung und die Effizienzsteigerungen durch Sanierung stark ab. Um die Klimaneutralität zu erreichen, werden die dann noch benötigten gasförmigen und flüssigen Energieträger weitgehend durch biogene Energieträger und Powerfuels bereitgestellt. Im Jahr 2045 werden rund 30 TWh biogene Gase eingesetzt, die rund 75 Prozent der gesamten methanbasierten Gasnachfrage im Gebäudesektor abdecken. Die Wasserstoffnachfrage steigt bis 2045 im Gebäudesektor auf insgesamt 79 TWh. Der Gesamtbedarf an flüssigen Energieträgern geht gegenüber heute um 94 Prozent zurück, auf nur noch 11 TWh. Diese sind zu etwa 80 Prozent synthetisch und zu etwa 20 Prozent biogen.

In der **Industrie** kommen bis 2045 weitgehend Powerfuels und biogene klimaneutrale Energieträger zum Einsatz. So wird etwa der sehr geringe Ölverbrauch der Industrie (0,4 TWh) primär durch synthetische Energieträger gedeckt. Es werden 33 TWh gasförmige biogene Energieträger eingesetzt, die 55 Prozent des energetischen Bedarfs an methanbasierten Gasen decken. Der energetische Wasserstoffeinsatz in der Industrie steigt bis 2045 auf 88 TWh. Dazu kommt ein stofflicher Bedarf von 103 TWh Wasserstoff und 87 TWh importierter organischer Flüssigkeiten (davon 51 TWh synthetisches grünes Naphtha und 36 TWh fossiles Naphtha, dessen Emissionen in der Gesamtbilanz durch Senken kompensiert werden). Für die Chemieindustrie werden zusätzlich etwa 50 TWh grünes Methanol importiert (nicht als Energieträger bilanziert). Der stoffliche Kohlenstoffbedarf der Industrie wird über diese Importe und den Einsatz von BECCU in Deutschland gedeckt.

2045 kommen im **Verkehrssektor** 147 TWh klimaneutrale flüssige Energieträger zum Einsatz. Davon entfällt mit 138 TWh das Gros auf flüssige Powerfuels. 108 TWh davon werden für die Luftfahrt verwendet, die ohne den Einsatz von Powerfuels die Klimaziele nicht erreichen könnte. Der Anteil biogener flüssiger Kraftstoffe geht zurück und liegt noch bei 9 TWh. Klimaneutrale biogene Gase kommen mit 12 TWh zum Einsatz. Der Verbrauch von Wasserstoff als gasförmigem Powerfuel steigt bis 2045 auf rund 59 TWh an.

Für die Strom- und Wärmeerzeugung in der **Energiewirtschaft** werden rund 128 TWh eingesetzt. Die dafür benötigten wasserstofffähigen Kraftwerke haben deutlich reduzierte Volllaststunden und dienen zur Ergänzung und Absicherung der volatilen Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien. Weitere 2 TWh Wasserstoff werden für den restlichen Umwandlungssektor benötigt.

Insgesamt kommen im Jahr 2045 in allen Verbrauchssektoren 458 TWh grüner Wasserstoff und 198 TWh synthetische flüssige Energieträger zum Einsatz. Die Gesamtmenge an Powerfuels beträgt damit rund 657 TWh.

Die energiesystemische Optimierung in den Modellierungen der dena-Leitstudie hat ergeben, dass der Import von Powerfuels kostengünstiger ist als eine rein nationale Erzeugung. Trotzdem verringert sich die Abhängigkeit Deutschlands von Energieimporten im Zuge der Transformation. Die Importanteile des Primärenergiebedarfs sinken von 75 Prozent im Jahr 2019 auf 41 Prozent im Jahr 2045.⁷ Grüner Wasserstoff und damit der Großteil der verwendeten Powerfuels wird mehrheitlich innerhalb Europas produziert. Flüssige Powerfuels stammen aus weiter entfernten Regionen des mittleren Ostens oder Südamerika und Australien. Dort gibt es sehr gute Standortbedingungen für die erneuerbare Energien-Erzeugung und die besseren Transportmöglichkeiten dieser Energieträger gegenüber Wasserstoff kommen zum Tragen.

Der Aufbau internationaler Wertschöpfungsketten für Powerfuels sollte auf Basis einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit erfolgen und könnte damit zu den Sustainable Development Goals (SDG) beitragen. Handelsbeziehungen sollten fair entwickelt, Nachhaltigkeitsstandards etabliert und überwacht sowie transparente Nachweissysteme eingeführt werden.

Tab. 3 Verwendung klimaneutraler Gase und Flüssigkeiten in den Sektoren der dena-Leitstudie

	2030				2045			
	Biogen		Powerfuels		Biogen		Powerfuels	
	gasförmig	flüssig	gasförmig ^a	flüssig	gasförmig	flüssig	gasförmig	flüssig
Gebäude	26 TWh	–	5 TWh H ₂	–	30 TWh	2 TWh	79 TWh H ₂	9 TWh
Industrie, energetisch	16 TWh	0	24 TWh H ₂	0	33 TWh	0	88 TWh H ₂	
Industrie, stofflich	0	0	27 TWh H ₂	0	0	0	103 TWh H ₂	51 TWh grünes Naphtha
Verkehr	13 TWh	28 TWh	9 TWh H ₂	4 TWh	12 TWh	9 TWh	59 TWh H ₂	138 TWh
Energie	42 TWh	0			28 TWh	0	130 TWh H ₂	
Summe	125 TWh		69 TWh		114 TWh		657 TWh	

⁷ EWI-Gutachterbericht, 2021.

^a Die im Jahr 2030 verwendete Wasserstoffmenge besteht zum Großteil aus grünem, zu einem kleinen Teil auch aus blauem Wasserstoff. Der blaue Wasserstoff wird in den Folgejahren vollständig durch grünen Wasserstoff ersetzt.

Projektbeteiligte Unternehmen und Institutionen

Neben den unten mit Logo abgebildeten Partnern haben alle hier aufgeführten Unternehmen und Institutionen bis zum Abschluss an der Studie mitgewirkt, sich dabei konstruktiv eingebracht und an der Finanzierung beteiligt. Aus unterschiedlichen Gründen verzichten sie auf die Aufführung ihres Logos. Aus Gründen der Transparenz sind sie hier aber alle als Mitwirkende aufgeführt.

Der Bundesverband Wärmepumpe (BWP) hat an der Studie mitgewirkt und sie finanziell unterstützt, stellt sein Logo an dieser Stelle aber nicht zur Verfügung. Stiebel ELTRON hat die Studie mitfinanziert und bis zum Ende begleitet, trägt jedoch den Endbericht aufgrund der Annahmen und Ergebnisse nicht mit.



- 50Hertz Transmission GmbH
- Amprion GmbH
- Aurubis AG
- Automobil-Club Verkehr e.V. ACV
- bayernets GmbH
- BayWa r.e. renewable energy GmbH
- BMW (VDA)
- BPW Bergische Achsen Kommanditgesellschaft (VDA)
- Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. BBS
- Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft BDL
- Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.
- Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V. GdW
- Bundesverband energieeffiziente Gebäudehülle e.V. BuVEG
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. BWP
- Bundesvereinigung Bauwirtschaft BVB
- Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e.V. figawa
- consulting4drive (VDA)
- Daimler AG (VDA)
- Deutsche Wohnen Technology GmbH
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. DVGW
- e-bility GmbH
- EDF
- EnBW Energie Baden-Württemberg AG
- Encavis AG
- Energienetze Bayern GmbH & Co. KG
- EnergieServicePlus GmbH/LEG
- Energieversorgung Mittelrhein AG
- EnviTec Biogas AG
- E.ON SE
- Erdgas Schwaben GmbH
- Evonik Industries AG
- EWE Netz GmbH
- EWS Elektrizitätswerke Schönau eG
- GASAG AG
- Gasunie Deutschland Transport Services GmbH
- GETEC WÄRME & EFFIZIENZ GmbH
- Goldbeck Solar GmbH
- GRTgaz Deutschland GmbH
- Hansewerk AG (E.ON Konzernticket)
- HeidelbergCement AG (BSS)
- Hydrogenious Technologies GmbH
- IAV GmbH (VDA)
- IG GmbH/Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e.V. BDH
- inetz GmbH
- Institut für Wärme und Mobilität e.V. IWO
- Kraftblock
- MAHLE International GmbH (VDA)
- MicrobEnergy GmbH (Viessmann Werke)
- Mineralölwirtschaftsverband e.V. MWV
- Mittelständische Energiewirtschaft Deutschland e.V. MEW
- MVV Energie AG
- ONTRAS Gastransport GmbH
- Open Grid Europe GmbH OGE
- Repräsentanz Transparente Gebäudehülle GbR RTG
- RWE AG
- Salzgitter Flachstahl GmbH
- Schleswig-Holstein Netz (E.ON Konzernticket)
- Siemens AG
- Stiebel Eltron GmbH & Co. KG
- Swobbee GmbH
- TEAG Thüringer Energie AG
- TenneT TSO GmbH
- terranets bw GmbH
- Thyssengas GmbH
- ThyssenKrupp Steel Europe AG
- TransnetBW GmbH
- UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e.V.
- UPM GmbH
- VELUX Deutschland GmbH
- Verband der Automobilindustrie e.V. VDA
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. VDZ (BBS)
- Viessmann Werke GmbH & Co. KG
- VNG AG
- Vonovia SE
- WELTEC BIOPOWER GmbH
- Wermuth Asset Management GmbH
- Wintershall Dea GmbH
- Zentraler Immobilien Ausschuss e.V. ZIA
- Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke ZVEH
- Zentralverband Deutsches Baugewerbe ZDB (BVB)
- Zentralverband des Deutschen Handwerks ZDH
- Zentralverband Sanitär Heizung Klima ZVSHK (BVB)
- Zukunft Gas GmbH

Autorinnen und Autoren der projektbeteiligten Gutachterinnen und Gutachter



ef.Ruhr GmbH

Emil-Figge-Straße 76
44227 Dortmund
www.efruhr.de
Dr.-Ing. Marco Greve
Jonas von Haebler
Maik Tretschock
Dr.-Ing. Christian Wagner

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI)

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a
50827 Köln
www.ewi.uni-koeln.de
Berit Hanna Czock
Max Gierkink
Arne Lilienkamp
Michael Moritz
Lena Pickert
Tobias Sprenger
Dr. Johannes Wagner
Jonas Zinke

Forschungsinstitut für Wärmeschutz (FIW) München

Lochhamer Schlag 4
82166 Gräfelfing
www.fiw-muenchen.de
Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fh ISE)

Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
www.ise.fraunhofer.de
Dr. Christoph Kost
Dr. Harry Wirth

Institut für technische Gebäude- ausrüstung (ITG) Dresden Forschung und Anwendung GmbH

Tiergartenstraße 54
01219 Dresden
www.itg-dresden.de
Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz
Dr. Bernadetta Winiewska

Jacobs University Bremen (JUB)

Campus Ring 1
28759 Bremen
www.jacobs-university.de
Christine Brandstätt, M. Sc.
Prof. Dr. Gert Brunekreeft
Dr. Marius Buchmann
Martin Palovic, M.A.
Dr. Anna Pechan

Öko-Institut e. V.

Postfach 17 71
79017 Freiburg
www.oeko.de
Anke Benndorf
Dr. Hannes Böttcher
Dr. Klaus Hennenberg
Judith Reise

Prognos AG

Goethestraße 85
10623 Berlin
www.prognos.com
Hans Dambeck
Jens Hobohm
Sebastian Lübbers
Christoph Thormeyer

Stiftung Umweltenergierecht (SUER)

Friedrich-Ebert-Ring 9
97072 Würzburg
www.stiftung-umweltenergierecht.de
Dr. Hartmut Kahl
Dr. Markus Kahles
Johanna Kamm
Hannah Scheuing

Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie & Hans-Ertel-Zentrum für Wetter- forschung, Klimamonitoring & Diagnostik (Meteorologische Einordnung)

Jun.-Prof. Dr. Stephanie Fiedler
Linh Ho

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (WI)

Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org
Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick
Annika Tönjes
Dr. Johannes Venjakob

Mitglieder des Beirats der dena-Leitstudie

Wissenschaft

Prof. Dr. Christian Flachsland

Professor of Sustainability an der Hertie School of Governance, Research Fellow am Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)

Dr. Oliver Geden

Senior Fellow EU/Europa der Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP), Leitautor für Arbeitsgruppe III & Mitglied des Kernautorenteams für Synthesebericht Intergovernmental Panel on Climate Change

Dr. Katrin Goldammer

Geschäftsführerin des Reiner Lemoine Instituts, Expertin für Energiewirtschaft und Energietechnik

Prof. Dr. Veronika Grimm

Inhaberin des Lehrstuhls für Volkswirtschaftslehre, insbesondere Wirtschaftstheorie, an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Wirtschaftsweise

Prof. Dr. rer. pol. habil. Georg Hirte

Professur für Volkswirtschaftslehre, insbesondere Verkehrspolitik und Raumwirtschaft, TU Dresden

Dr. Brigitte Knopf

Generalsekretärin des Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC), Mitglied im Expertenrat für Klimafragen

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Mitglied des Vorstands, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Mitglied des Wasserstoffrates

Dr. Felix Matthes

Forschungskordinator Energie- und Klimapolitik, Öko-Institut e.V.

Prof. Dr. Julia Pongratz

Inhaberin des Lehrstuhls für Physische Geographie und Landnutzungssysteme, Ludwig-Maximilians-Universität München, Joint Group am MPI für Meteorologie

Prof. Dr. Dr. Ortwin Renn

Wissenschaftlicher Direktor, Institut für Transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS), Inhaber des Lehrstuhls „Technik- und Umweltsoziologie“ an der Universität Stuttgart

Prof. Dr. Dr. h.c. Christoph M. Schmidt

Präsident des Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) in Essen, Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftspolitik und Angewandte Ökonometrie an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaft der Ruhr-Universität Bochum, Vizepräsident von acatech, Co-Vorsitzender des Deutsch-Französischen Rates der Wirtschaftsexperten

Dr. Astrid Schulz

Senior Scientist Klima und Energie, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

Prof. Dr.-Ing. Semih Severengiz

Fachbereich Elektrotechnik und Informatik, Hochschule Bochum, Labor für Nachhaltigkeit in der Technik, Experte für nachhaltige Mobilität

Simon Schäfer-Stradowsky

Geschäftsführer, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM), Jurist und Experte für innovatives Energie- und Klimaschutzrecht

Politik

Bundestagsfraktionen

Ralph Lenkert, MdB

Die Linke

Klaus Mindrup, MdB

SPD

Carsten Müller, MdB

CDU

Prof. Dr. Martin Neumann, MdB

FDP, Prof. Technische Gebäudeausrüstung, HS Magdeburg-Stendal

Dr. Julia Verlinden, MdB

Bündnis 90/Die Grünen

Lisa Badum, MdB

Bündnis 90/Die Grünen

Bundesministerien

Stephanie von Ahlefeldt

Leiterin der Abteilung III Energiepolitik Strom & Netze, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Klaus Bonhoff

Leiter der Abteilung für Grundsatzangelegenheiten,
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Berthold Goeke

Leiter der Unterabteilung Klimaschutzpolitik
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und
nukleare Sicherheit

Prof. Dr.-Ing. René Haak

Referatsleiter, Globaler Wandel und Klimaforschung,
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Christine Hammann

Bauwesen, Bauwirtschaft und Bundesbauten,
Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat

Thorsten Herdan

Leiter der Abteilung II – Energiepolitik – Wärme und Effizienz,
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Dr. Eva Ursula Müller

Wald, Nachhaltigkeit, Nachwachsende Rohstoffe
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

Jakob Freiherr von Weizsäcker

Chefökonom und Leiter der Grundsatzabteilung,
Bundesministerium der Finanzen

Frank Wetzel

Leiter „Innovation, Industrie, Energie und Verkehr“,
Bundeskanzleramt

Ministerien der Länder**Dr. Martin Gude**

Abteilungsleiter Energie und Klima,
Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz, Thüringen

Gundela Nostiz

Abteilungsleiterin Energie und Klimaschutz,
Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen
und Klimaschutz

Anselm Sprandel

Abteilungsleiter Energie und Klima, Behörde für Umwelt, Klima,
Energie und Agrarwirtschaft, Freie und Hansestadt Hamburg

Michael Theben

Abteilungsleiter Klimaschutz, Ministerium für Wirtschaft,
Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-
Westfalen

Zivilgesellschaft**Umweltverbände****Christoph Bals**

Politischer Geschäftsführer, Germanwatch e. V.

Tina Löffelsend

Programme Manager, European Climate Foundation,
Direktion Deutschland

Sabine Nallinger

Vorständin, Stiftung 2 Grad

Prof. Dr. Kai Niebert

Präsident, Deutscher Naturschutzring

Viviane Raddatz

Bereichsleitung des Fachbereichs Klimaschutz & Energiepolitik,
WWF Deutschland

Carolyn Schenuit

Geschäftsführerin, Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft

Gewerkschaften**Stefan Körzell**

Mitglied der Geschäftsführung, Deutscher Gewerkschaftsbund

Verbraucher**Dr. Thomas Engelke**

Teamleitung Energie und Bauen, Geschäftsbereich Verbraucher-
politik des Bundesverbands Verbraucherzentrale

Kommunen/Städte**Deliana Bungard**

Referatsleiterin, Allgemeines Umweltrecht, Abfallwirtschaft,
Immissionsschutz, Urheberrecht, Deutscher Städte- und
Gemeindebund

Helmut Dedy

Hauptgeschäftsführer, Deutscher Städtetag (repräsentiert
durch Detlef Raphael)

Prof. Dr. Hans-Günter Henneke

Geschäftsführendes Präsidialmitglied,
Deutscher Landkreistag, Berlin

Wirtschaft**Holger Lösch**

Stellvertretender Hauptgeschäftsführer,
Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.

Glossar und Begriffsdefinitionen

Afa: Absetzung für Abnutzung: Abschreibung, durch welche die Anschaffungs- und Herstellungskosten des abnutzbaren Anlagevermögens auf die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer verteilt wird.

AFOLU: Agriculture, Forestry and Other Land Use: LULUCF und Landwirtschaft

Albedo: Rückstrahlvermögen von nicht selbst leuchtenden Oberflächen, so beispielsweise der Erdoberfläche. Je höher die Albedo ist, desto mehr Strahlung wird reflektiert, je niedriger die Albedo ist, desto mehr Strahlung wird absorbiert.

Amortisationszeit: Zeit, bis alle Bau-, Betriebs- und Entsorgungskosten einer Investition vollständig gedeckt sind. Bsp.: Die Zeit nach welcher die Energiekosteneinsparung durch eine Sanierung die Investitionskosten übertrifft.

ATG: Atomgesetz

BAFA: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle

BECCS: Bio-Energy Carbon Capture and Storage: Durch die technische Abscheidung und Speicherung der Emissionen bei der Verbrennung von biogenen Energieträger können negative Emissionen erzielt und gleichzeitig Energie und Wärme gewonnen werden.

BEHG: Brennstoffemissionshandels-Gesetz

BEV: Battery Electric Vehicle: Elektroauto mit Batterieelektrischem Antrieb

BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz

Blauer Wasserstoff: Wird durch die Spaltung von Erdgas in Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff mit Hilfe von Dampfreformierung gewonnen. Anfallendes Kohlenstoffdioxid wird abgeschieden und anschließend gespeichert (CCS) oder weiterverwendet (CCU)

BMBF: Bundesministerium für Bildung und Forschung

BMU: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

BMWi: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

CBAM: Carbon Border Adjustment Mechanism: Mechanismus, mit dem auf außereuropäische Produkte ein CO₂ Preis erhoben wird. Der CBAM dient zum Schutz der Wettbewerbsfähigkeit bei einseitigen Klimaschutzauflagen.

Carbon Leakage: Verlagerung von CO₂-Emissionen durch Standortwechsel, bspw. EU-ETS: EU-Unternehmen verlagern Produktion ins Nicht-EU-Ausland mit weniger strengen Klimaschutzauflagen und konterkarieren damit Effekte des EU-ETS.

CCfD: Carbon Contracts for Difference: Differenzverträge, die zur Absicherung gegen Preisschwankungen durch festgelegte Preise dienen. Dies sorgt insbesondere bei kostenintensiven Investitionen, beispielsweise in der Industrie, für langfristige Planungssicherheit.

CCS: Carbon Capture and Storage: Bezeichnet verschiedene Verfahren, in denen CO₂ an Kraftwerken abgeschieden und anschließend eingelagert werden. Durch Verbrennung von Biomasse und anschließendem CCS kann dabei der Atmosphäre netto CO₂ entzogen werden.

CCU: Carbon Capture and Utilization: Abscheidung von Kohlenstoff in Kraftwerken unter anschließender Weiterverwendung des Kohlenstoffdioxids oder Kohlenstoffs, beispielsweise für E-Fuels.

CDR: Carbon Dioxide Removal: umfasst verschiedene Techniken zur technischen Entnahme von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid. (→ NET). Dies wird beispielsweise durch Direct Air Capture Verfahren (DAC) erreicht.

CO₂: Kohlenstoffdioxid

CO₂ä: Kohlenstoffdioxid-Äquivalente

CVD: Clean Vehicle Directive: EU-Richtlinie zum Einsatz alternativer Antriebe.

DAC: Direct Air Capture: Technologien zur technischen Abscheidung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre

DEHSt: Deutsche Emissionshandelsstelle

Dekarbonisierung: Reduzierung des Einsatzes von kohlenstoffbasierten Energieträgern auf null, bspw. im Bereich Wärmever-sorgung eine komplette Umstellung auf CO₂-freie Alternativen.

DRI: Direct Reduced Iron: Eisenschwamm, der durch eine direkte Reduktion von Roheisen zu Stahl gewonnen wird. Dieser Vorgang wird beispielsweise mit Wasserstoff durchgeführt.

DRI/EAF: Direct reduced iron/electric arc furnace (Lichtbogenofen)

DSM: Demand Side Management: Konzept zur Laststeuerung, um die Stromnachfrage zu flexibilisieren und Kosten zu senken.

DWD: Deutscher Wetterdienst

EE: Erneuerbare Energien

EED: Energieeffizienz-Richtlinie

EEG 2021: Erneuerbare-Energien-Gesetz 2021

EnEff-Netzwerke: Energieeffizienz-Netzwerk

Energiesprong: Innovatives Sanierungsprinzip, das auf einen digitalisierten Bauprozess, standardisierte Lösungen und eine kurze Sanierungszeit durch vorgefertigte Modulbauweise setzt

Energy-Only-Markt: In einem Energy-Only-Markt richtet sich die Vergütung nur nach tatsächlich erzeugter Strommenge.

ENTSO-E: European Network of Transmission System Operators for Electricity: Europäischer Verband, in dem alle Übertragungsnetzbetreiber Pflichtmitglieder sind.

ENTSO-G: European Network for Transmission System Operators for Gas: Verband, der Betreiber von Fernleitungsnetzen für Erdgas in Europa.

EPBD: Energy Performance of Buildings Directive: EU-Richtlinie für Energieeffizienz von Gebäuden.

ERAA: European Resource Adequacy Assessment: Assessment, mit welchem Stromsystem jährlich hinsichtlich der sicheren Bedarfsdeckung der nächsten 10 Jahre bewertet wird.

ETR: Energy Transition

ETS: Emission-Trading-System: Emissionshandelssystem

EU-ETS: European Emission-Trading-System

EZFH: Ein- und Zweifamilienhäuser

FCEV: Fuel Cell Electric Vehicles: Brennstoffzellenfahrzeuge

Flexumer: Verbraucher (Prosumer), der Stromverbrauch und -Erzeugung flexibel einsetzen kann.

F&E: Forschung und Entwicklung

GEG: Gebäudeenergiegesetz

GHD: Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Grüner Wasserstoff: Wird durch die Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff mithilfe von Elektrolyse mit erneuerbarem Strom gewonnen.

GuD: Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk

Gt: Gigatonne = 1 Milliarde Tonnen

H₂: Wasserstoff

H₂-ready: Gasinfrastruktur und -Technologien, die auch für den teilweise bis gänzlichen Ersatz durch Wasserstoff geeignet sind.

IKT: Informations- und Kommunikationstechnologien

IMSys: intelligentes Messsystem: Messsystem, welches aus einer modernen Messeinrichtung und einem Kommunikationsmodul, dem Smart Meter Gateway, besteht.

iSFP: individuelle Sanierungsfahrpläne

Investment Leakage: Verlagerung von Investitionen aufgrund von besseren Rahmenbedingungen.

IoT – Internet of Things: Netzwerk von technischen Objekten, die über das Internet mit Systemen oder anderen Geräten verbunden sind und so Daten austauschen können.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change: Weltklimarat

IPCEI: Important Projects of Common European Interest: Strategische Förderprojekte der EU

KEP: Kurier-Express-Paket-Dienstleistungen

KfW: Kreditanstalt für Wiederaufbau

KI: Künstliche Intelligenz

KSG: Klimaschutzgesetz

KSpG: Kohlendioxid-Speicherungsgesetz

KUP: Kurzumtriebsanlage

KVBG: Kohle-Verstromung-Beendigungs-Gesetz

kWh: Kilowattstunde

KWK: Kraft-Wärme-Kopplung

KWKG: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

LCBT: Low-Carbon Breakthrough Technologies: Neue, CO₂-arme Produktionsverfahren, insbesondere neue Industrieprozesse.

Level Playing Field: Auf einem ebenen Spielfeld (Level Playing Field) sind die Wettbewerbsbedingungen für alle Teilnehmer (Akteure, Prozesse, Energieträger, etc.) gleich.

Lock in-Risiko: Risiko, dass Infrastruktur an einen bestimmten Energieträger gebunden ist und ein Wechsel spät oder gar nicht stattfinden kann.

LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carriers: flüssige organische Wasserstoffträger

LoRaWAN: Long Range Wide Area Network: Netzwerk, das energieeffizientes Senden von Daten über lange Strecken ermöglicht. LoRaWAN können die Daten mehrerer hundert Sensoren innerhalb eines Netzwerks verarbeitet werden.

LT-LEDS: Long-Term Low Emission Development Strategies

LULUCF: Land Use, Land Use Change and Forestry: Landnutzung, Landnutzungsveränderung und Forstwirtschaft

MFH: Mehrfamilienhäuser

Mitigation: Gezielte Abschwächung von negativen Folgen eines Vorgangs.

MIV: motorisierter Individualverkehr

mMe: moderne Messeinrichtung

Modal Split: Verteilung des Transportaufkommens auf verschiedene Verkehrsträger oder Verkehrsmittel.

Mt: Megatonne = 1 Million Tonnen

NECP: National Energy and Climate Plan; Nationaler Energie und Klimaplan

NDC: Nationally Determined Contributions: Nationale Klimaschutzziele, die im Rahmen des Pariser Klimaabkommens von den Vertragsstaaten regelmäßig aktualisiert werden.

NEP: Netzentwicklungsplan

NET: Negative Emissions Technologies: Technologien, die negative Emissionen schaffen (z. B. DAC). Diese werden für Klimaneutralität nötig sein, um unvermeidbare Restemissionen auszugleichen.

NWS: Nationale Wasserstoffstrategie

ÖV: Öffentlicher Verkehr

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle: Plug-in-Hybrid

Powerfuels: Gasförmige und flüssige Energieträger einschließlich Wasserstoff, die mithilfe von Power-to-X-Technologien auf Basis erneuerbarem Strom erzeugt werden.

PPA – Power Purchase Agreements: langfristige Stromlieferverträge

Prosumer: Verbraucher (Consumer), der gleichzeitig Produzent (Producer) ist.

PtG – Power to Gas: Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse und synthetischem Methan durch anschließende Methanisierung des Wasserstoffs.

PtL - Power to Liquid: Herstellung von flüssigen Energieträgern auf Basis von grünem Wasserstoff.

PtX – Power to X: umfasst alle Technologien zur Herstellung synthetischer Brenn-, Kraft- und Grundstoffe aus elektrischer Energie.

PV: Photovoltaik

P2H: Power to Heat: Umwandlung von Strom in Wärme

QSM: Querschnittsmodul

Quellprinzip: Prinzip, nach welchem Emissionen nach ihrem Entstehungsort bilanziell demjenigen Sektor oder Staat zugerechnet werden, in dem Treibhausgase physisch in die Atmosphäre entweichen.

RED II: Renewable Energy Directive II: EU Richtlinie für Erneuerbare Energien

SAF: Sustainable Aviation Fuel: nachhaltiger Flugtreibstoff

SDGs: Sustainable Development Goals: Nachhaltige Entwicklungsziele der Vereinten Nationen

SEM: Sektormodul

SEP: Systementwicklungsplan

Shared Economy: Wirtschaft des Teilens: Geteiltes Nutzen von Ressourcen

Sensitivität: Untersuchung eines Einzelaspekts eines Szenarios, indem der hierfür relevante Parameter variiert werden, bspw. zur Erhöhung der Robustheit der Erkenntnisse der Hauptanalyse.

Szenario: Eigenständige, in sich konsistente Zukunftsprojektion (Storyline, Narrativ), für die eine Vielzahl an Parametern definiert und abgestimmt werden, welche in Gesamtheit den Transformationspfad ergeben.

THG: Treibhausgas-Emissionen: Umfasst alle durch Treibhausgase (bspw. Methan und Kohlenstoffdioxid) verursachten Emissionen.

Türkiser Wasserstoff: Wird durch die Spaltung von Methan (Erdgas) in festen Kohlenstoff und Wasserstoff durch Methanpyrolyse gewonnen.

TWh: Terrawattstunde = 1 Milliarde kWh

TYNDP: Ten Year Network Development Plan

UNCTAD: United Nations Conference on Trade and Development

UBA: Umweltbundesamt

Verursacherprinzip: Prinzip, nach welchem ausgestoßene Emissionen beim letztverbrauchenden Akteur bilanziert werden, auch wenn die Emissionen nicht am Ort des Letztverbrauchs physisch in die Atmosphäre abgegeben werden.

WP: Wärmepumpe

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	THG-Minderungspfad nach Sektoren im Gesamtzeitraum 2018 bis 2050 (in Jahrfünften)	14
Abb. 2	Energiebedarf und -nutzung gesamt	16
Abb. 3	Projektstruktur	26
Abb. 4	Methodik Hauptszenario und Pfadausprägungen	28
Abb. 3.1	Innovationsintensität	53
Abb. 3.2	Wirksamkeit und Verfügbarkeit der Innovationen	57
Abb. 5.1	Die drei Säulen der klimaneutralen sozialen Marktwirtschaft	90
Abb. 6.1	THG-Minderungspfad im Gebäudesektor	107
Abb. 6.2	Energiebedarf und -verwendung im Gebäudesektor	108
Abb. 6.3	Indikator „Anteil der seit 2020 vollsanierten Wohngebäude“ (in Bezug auf gesamten Wohngebäudebestand)	111
Abb. 6.4	Indikator „Elektrische Wärmepumpen (in Wohngebäuden)“	112
Abb. 6.5	Indikator „THG-neutrale Brennstoffe“ (biogen + synthetisch, exklusive feste Biomasse)	114
Abb. 6.6	Entwicklung der heißen Tage	118
Abb. 7.1	Historische THG-Emissionen des Industriesektors und Sektorziele bis 2030	136
Abb. 7.2	THG-Minderungspfad im Industriesektor	138
Abb. 7.3	Endenergieverbrauch nach Energieträger und Verwendung nach Branchen	141
Abb. 7.4	Stofflicher Einsatz von Energieträgern	142
Abb. 7.5	Produktionsmengenentwicklung im Sektor Industrie	143
Abb. 7.6	Neue emissionsarme Produktions- und Verfahrenstechnologien (Low Carbon Breakthrough Technologies, LCBT)	147
Abb. 7.7	Funktionsweise CO ₂ -Differenzverträge (Carbon Contracts for Differences, CCfD)	149
Abb. 7.8	Verbrauch synthetischer Energieträger und Strom in der Industrie	152
Abb. 8.1	THG-Minderungspfad im Verkehrssektor	164
Abb. 8.2	Energieverbrauch nach Energieträger & Verkehrsträger	165
Abb. 8.3	Indikator „Elektromobilität, Batteriebetriebene Pkw“	167
Abb. 8.4	Indikator „Wasserstoff“	168
Abb. 8.5	Indikator „Synthetische Flüssigkraftstoffe“	169
Abb. 9.1	THG-Minderungspfad im Energiesektor (Strom- & zentrale Wärmeerzeugung)	181
Abb. 9.2	Einsatz Primärenergieträger und Verwendung Endenergieträger (gesamt)	182
Abb. 9.3	Stromerzeugung (netto)	183
Abb. 9.4	Indikator „Stromerzeugung (Erneuerbare Energien)“	185
Abb. 9.5	Indikator „Produktion von Powerfuels (H ₂ , synth. Methan, PtL) heimisch“	191
Abb. 9.6	Indikator „Import von Powerfuels (H ₂ , synth. Methan, PtL) aus Europa“	192
Abb. 9.7	Indikator „Import von Powerfuels (H ₂ , synth. Methan, PtL) von außerhalb Europa“	192
Abb. 9.8	Indikator „Regelbare Gas-Kraftwerke (Erdgas, H ₂ -Kraftwerke)“	198
Abb. 10.1	Landnutzungskategorien in Deutschland und ihre absoluten CO ₂ -Emissionen sowie relative CO ₂ -Emissionen bestimmter Landnutzungsformen im Jahr 2018	212
Abb. 10.2	THG-Emissionen und Senken bis 2045	215
Abb. 10.3	Senkenwirkung von CCU/S-Prozessen	221
Abb. 10.4	Geringere Senkenleistung von LULUCF führt zu höherem Bedarf von BECCS und Notwendigkeit von DAC	223
Abb. 10.5	Der CO ₂ -Kreislauf des klimaneutralen Deutschlands 2045	226

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Kumulierte THG-Emissionen	15
Tab. 2	Kernindikatoren des Szenarios Klimaneutralität 2045 (KN100)	20
Tab. 3	Verwendung klimaneutraler Gase und Flüssigkeiten in den Sektoren der dena-Leitstudie	300

