

Guy P. Brasseur · Daniela Jacob · Susanne Schuck-Zöllner
(Hrsg.)

Klimawandel in Deutschland

Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Hrsg.

Prof. Dr. Guy P. Brasseur
ausführend für: Helmholtz-Zentrum hereon
GmbH,
Climate Service Center Germany, Hamburg
derzeit: Max-Planck-Institut für
Meteorologie, Hamburg

Prof. Dr. Daniela Jacob
Helmholtz-Zentrum hereon GmbH,
Climate Service Center Germany, Hamburg

Susanne Schuck-Zöllner
Helmholtz-Zentrum hereon GmbH,
Climate Service Center Germany, Hamburg



ISBN 978-3-662-66695-1 ISBN 978-3-662-66696-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-66696-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über ► <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en) 2017, 2023. Dieses Buch ist eine Open-Access-Publikation.
Open Access Dieses Buch wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.
Die in diesem Buch enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.
Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheneinhabers sind zu beachten.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Simon Shah-Rohlf's
Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany



Minderungsansätze in der Energie- und Kreislaufwirtschaft

*Daniela Thrän, Ottmar Edenhofer, Michael Pahle, Eva Schill,
Michael Steubing und Henning Wilts*

Inhaltsverzeichnis

- 33.1 Minderungsziele und -politiken – 430**
- 33.2 Energieeinsparung durch Erhöhung der Energieeffizienz – 431**
- 33.3 Ausbau der erneuerbaren Energien – 432**
- 33.4 Emissionshandel und Besteuerung von Klimagasen – 434**
- 33.5 Kreislaufwirtschaft – 435**
- 33.6 Schlussbemerkung – 436**
- 33.7 Kurz gesagt – 436**
- Literatur – 436**

33.1 Minderungsziele und -politiken

Klimagase – allen voran Kohlendioxid (CO₂) – werden bei der Nutzung von fossilen Rohstoffen freigesetzt. Über 800 Mio. t CO₂-Äquivalente umfassten die Emissionen im Jahr 2018 in Deutschland (Umweltbundesamt 2020). Dabei nimmt die Energiebereitstellung für Stromversorgung, Verkehr, Gebäude und Industrieprozesse mit 80 % der Emissionen eine Schlüsselrolle ein.

Die Notwendigkeit zum Klimaschutz wurde bereits im Jahr 1992 auf der Umweltkonferenz von Rio de Janeiro formuliert. Mit dem Kyoto-Protokoll von 1997 folgte die vertragliche Vereinbarung, die Klimagasemissionen bis 2012 zu mindern. In den Jahren 2000/2001 wurden in Deutschland Maßnahmen zum Ausbau der erneuerbaren Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz) und der Energieeffizienz von Gebäuden (Energieeinsparverordnung) eingeführt. Auf europäischer Ebene wurden Flottenverbrauchs-senkungen von Pkws sowie Beimischungsquoten für Biokraftstoffe vereinbart, um die energiebedingten

Klimaemissionen zu senken. Im Jahr 2005 wurde außerdem das europäische Emissionshandelssystem eingeführt.

Trotz dieser Bemühungen gingen die Klimaemissionen in den verschiedenen Sektoren nur mäßig zurück (Abb. 33.1). Die sinkenden Emissionen in den 1990er-Jahren waren vor allem durch den Zusammenbruch der kohlenstoffintensiven DDR-Industrie verursacht, ab dem Jahr 2008 stagnierten die Emissionen. Die ambitionierten nationalen Minderungsziele von 1995 und 1997 wurden verfehlt. Die Politik steuerte nur zögerlich nach. Auch auf EU-Ebene sanken die Emissionen kaum (1990: 4,9 Gt. 2015: 3,9 Gt) (EEA 2020). International kam es zwischen 1990 und 2015 sogar zu einer verstärkten Nutzung von fossilen Energieträgern und zu einem deutlichen Anstieg der Klimagasemissionen (1990: 35 Gt. 2015: 50 Gt; Climate Watch).

Mit dem Abkommen von Paris im Jahr 2015 wurde ein neuer internationaler Anlauf genommen, die Klimagasemissionen zu begrenzen, und verein-

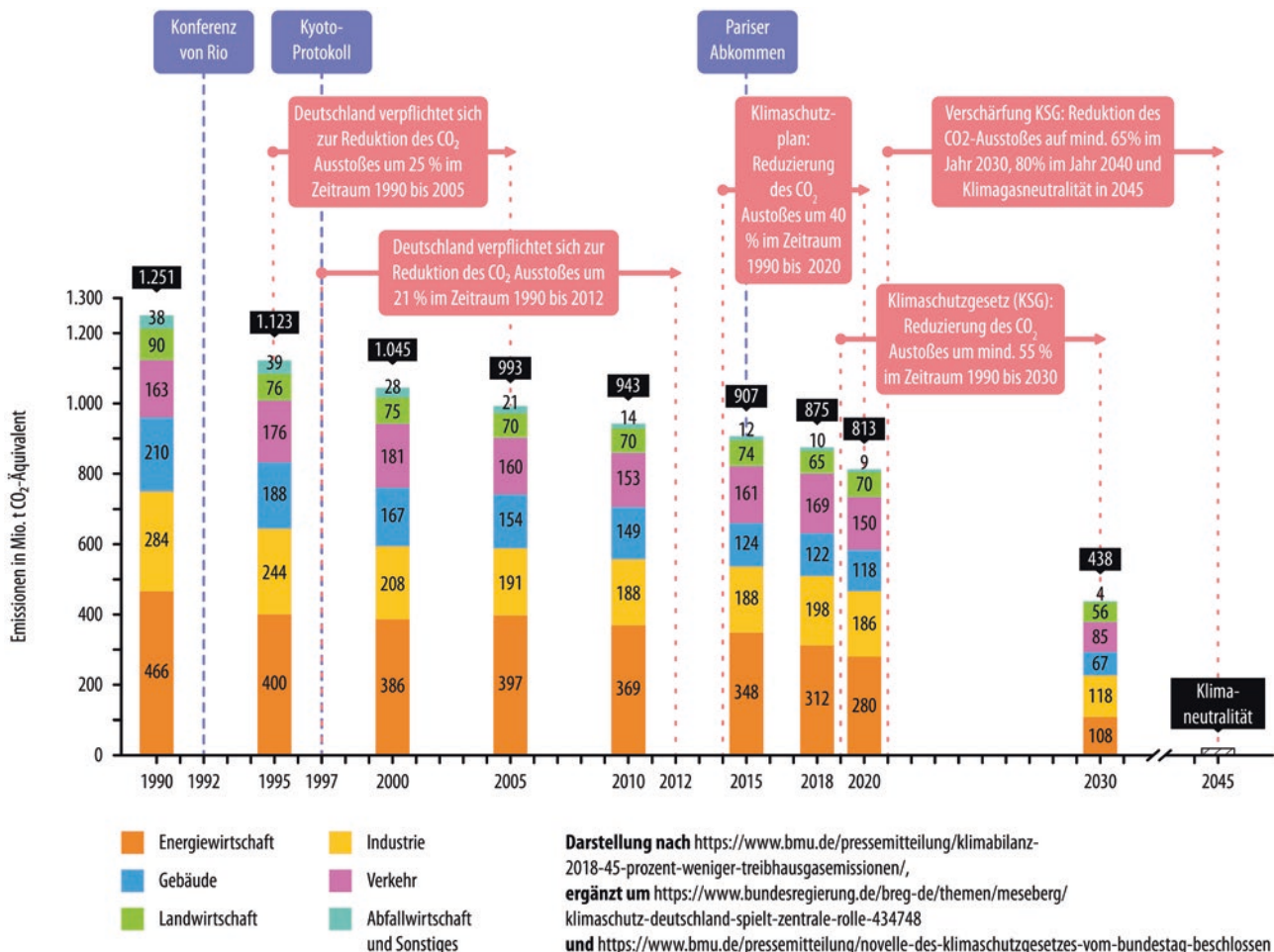


Abb. 33.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland (Sektorenabgrenzung nach Klimaschutzplan 2050). (© Grafik: UFZ Leipzig, 2020)

bart, dass die Erderwärmung dauerhaft (deutlich) unter 2 °C gegenüber 1990 gehalten werden soll. Daraus lässt sich die maximal emittierbare Klimagasmenge (sogenanntes Budget) ableiten. Der Weltklimarat IPCC schätzt diese für den Zeitraum 2010 bis 2050 auf ca. 600 Mrd. t CO₂. Deutschland sollte – so die Empfehlung des Sachverständigenrates für Umweltfragen – nicht mehr als 1 % bis maximal 1,2 % dieses Budgets in Anspruch nehmen (WBGU 2009). Dies erfordert eine unmittelbare und umfassende Minderung in allen Wirtschaftssektoren und Lebensbereichen.

In Deutschland wurden bereits im Jahr 2011 langfristige Klimaschutzziele verabschiedet, die grundsätzlich damit in Einklang stehen. Zur Untersetzung wurde im Jahr 2016 der Klimaschutzplan verabschiedet; 2019 folgte das Klimaschutzgesetz¹, das eine Emissionsminderungsquote von 55 % im Jahr 2030 gegenüber 1990² erstmals gesetzlich fest schreibt. Außerdem wurde im selben Jahr ein Klimaschutzpaket beschlossen, das die Erreichung dieses Ziels sicherstellen soll. Es beinhaltet die Ausweitung des CO₂-Preises und Fördermaßnahmen in allen Energiesektoren, wie zum Beispiel Kaufprämien für Elektroautos und Austauschprämien für Ölheizungen. Das gesetzte Ziel von maximal 751 Mio. t CO₂ im Jahr 2020 wurde trotz reduzierter Emissionen infolge der Covid-19-Krise nicht erreicht. Im Juli 2021 wurde schließlich das Klimaschutzgesetz verschärft und sieht jetzt eine Emissionsminderungsquote von 65 % bis 2030, von 88 % bis 2040 und Klimaneutralität bis spätestens 2045 vor (KSG 2021). Auch die Bundesländer und Kommunen verabschieden zunehmend Minderungsziele und -politik. Für die dauerhafte Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2 °C werden die nächsten 10 Jahre als entscheidend angesehen.

Während verschiedene Studien Wege in ein klimaneutrales Deutschland bis 2045 aufzeigen, wurde auf nationaler Ebene noch kein verbindlicher Fahrplan vorgelegt. Den Studien ist gemein, dass für eine schnelle und umfassende Energiewende die folgenden Elemente zentral sind: 1) Energieeinsparung durch Erhöhung der Energieeffizienz, 2) Umstieg auf erneuerbare Energien, 3) Emissionshandel und Besteuerung von Klimagasen und 4) Senkung der Energie- und Stoffflüsse in einer weitergehenden Kreislaufwirtschaft. Die zusätzliche aktive Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (s. ► Kap. 35) kann die nachfolgend beschriebenen Elemente ergänzen und nicht ersetzen.

33.2 Energieeinsparung durch Erhöhung der Energieeffizienz

Ein wichtiger Baustein der Energiewende beruht auf der Energieeinsparung, auch durch Steigerung der Energieeffizienz, also Verbesserung des Verhältnisses zwischen erzieltm Nutzen und eingesetzter Energie, in allen Sektoren. Dem liegt zugrunde, dass nicht verbrauchte Energie klimaneutral und umweltfreundlich ist und keine Kosten verursacht.

Deutschland hat im Jahr 2019 seinen jährlichen Primärenergieverbrauch seit 2008 um circa 10 % und seit 1990 um nahezu 15 % auf 12.815 Petajoule reduziert (aktualisiert nach BMWi 2018). Ursachen dafür sind technologische Fortschritte in der Nutzung erneuerbarer und fossiler Energieträger sowie in Übergangstechnologien. Dies umfasst den erfolgreichen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung, da bei Wasserkraft, Windenergie und Fotovoltaik die Endenergie der Primärenergie gleichgesetzt wird, die Effizienzsteigerungen in fossilen Kraftwerken sowie eine zunehmende Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung, d. h. beispielsweise die Abwärmenutzung aus Kraftwerken, aber auch die Nutzung von Blockheizkraftwerken.

Der Endenergieverbrauch hat sich in den gleichen Zeiträumen kaum verringert und liegt seit 1990 bei circa 9000 Petajoule. Betrachtet über die einzelnen Sektoren zeigen sich wesentliche Unterschiede. Die bedeutendsten Reduktionen des Endenergieverbrauches im letzten Jahrzehnt wurden im Sektor der privaten Haushalte erreicht. Auch wenn der Endenergieverbrauch für Klimakälte gestiegen ist (38 Petajoule in 2016), wurde im weit bedeutenderen Segment der Raumwärme eine Reduzierung um circa 8 % gegenüber 2008 (2772 Petajoule) erreicht. Im Industriesektor sind die Verbräuche nach einer Reduzierung von circa 13 % bis 2008 ungefähr konstant (2650 Petajoule in 2018). Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung konnte stetig auf 1350 Petajoule im Jahr 2018 reduziert werden. Im Sektor Verkehr steigt der Endenergieverbrauch hingegen seit 1990 stetig und liegt 2018 bei circa 2700 Petajoule (Datenquelle BMWi 2018).

Mit dem Ziel, den Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 gegenüber 2008 um 20 % zu senken und bis 2050 zu halbieren, hat Deutschland im Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE, 2014) eine umfassende Strategie auf den Weg gebracht. Die darin initiierte energetische Sanierung im Gebäudebestand umfasst seit über 10 Jahren Maßnahmen zur Wärmedämmung der Gebäudeaußenhülle, zum Austausch von Fenstern und Außentüren und zur Erneuerung von Heizungen im Wohnungs- und Nichtwohnungsbau mit einem Investitionsvolumen von circa 40 Mrd. € pro Jahr (BMWi 2018). Nach Abzug der Reduzierung der CO₂-Emissionen, die durch Klimaerwärmung

1 Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften (Bundes-Klimaschutzgesetz 2019 – KSG 2019), BGBl I 48/2019.

2 § 3 Abs. 1 KSG 2019.

Tab. 33.1 Übersicht über wichtige Kennwerte erneuerbarer Energien in Deutschland

Energie-träger	Nut-zung	Kraftwerks-/ Kraftstofftyp	Installierte Leistung 2019 [Megawatt]	Durchschnittliche Anlagengröße [Megawatt]	Energiebereitstellung 2019			Quelle	
					Strom [Twh] ^a	Wärme [Twh] ^a	Kraftstoff [Petajoule]		
Sonne	Strom- und Wärmeerzeugung	Photovoltaik	49.016	0,86 ^b	47,5	--	--	1, 3, 4	
		Solarthermie	14.400 ^c	0,0006	--	8,5	--	1, 2	
Windenergieanlagen onshore		53.333	1,78	101,3	k.A.	--	1, 5		
Windenergieanlagen offshore		7.507	4,83	24,7	k.A.	--	1, 5		
Geo-thermie		Tiefe Geothermie	385	10,08	0,2	1,3	--	1, 7	
		Oberflächennahe Geothermie	4.400	0,01	--	14,7	--	1, 7	
Wasser-kraft		Lauf- und Speicher-wasserkraftwerke ^d	5.612	0,79	20,2	--	--	1	
Bio-masse		Bioenergieanlagen	8.919	0,42 ^e	50,4	147,5 ^f	--	1, 8	
		Kraftstoffe		Produktionskapazität [m³ i.N./t*a]^g	Anlagengröße [m³ i.N./t*a]^g				
			Biokraftstoffe konventionell	4,7 Mio. t Biodiesel/-ethanol 853 Mio. m ³ i.N. Biomethan	500 - 650.000 t 3,9 Mio. m ³ i.N.	--	--	111	6
	Biokraftstoffe fortschrittlich		>0	--	--	--	1,6	6	
Strom-basiert	E-fuels	Power-to-gas	34,5 Mio. m ³ i.N.	750.000 m ³ i.N.	--	--	0,5	6	
		Power-to-liquid	720t	240t	--	--	>0	6	

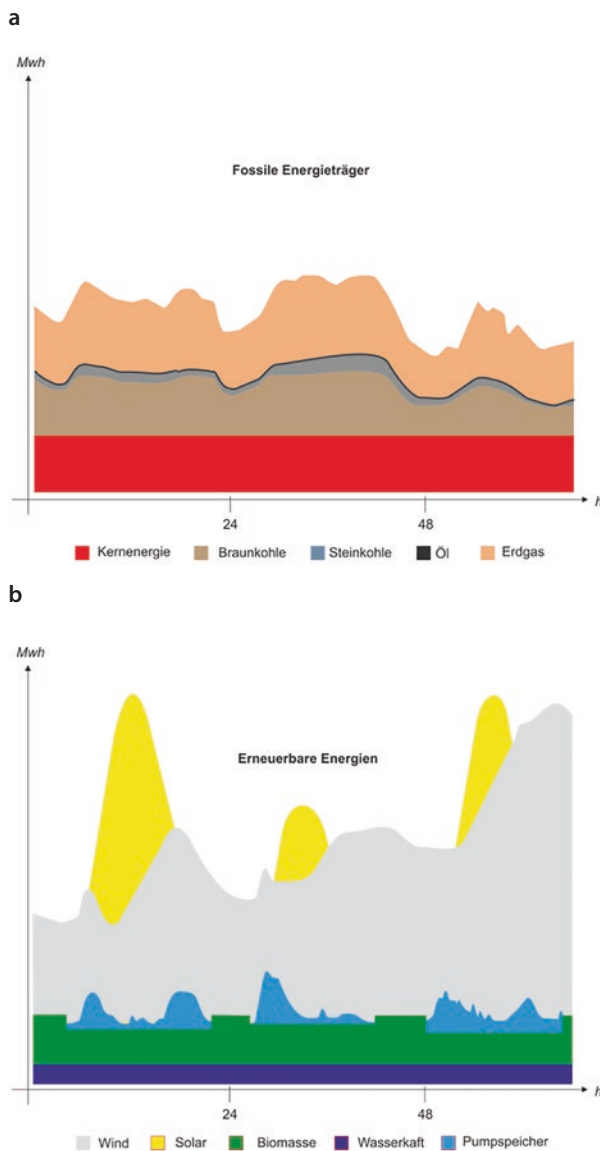
-- : nicht zutreffend oder keine ausreichende Datenlage
a) Terrawattstunden; b) nur Freiflächenanlagen; c) Stand 2017; d) inkl. Pumpspeicherkraftwerken mit natürlichem Zufluss; e) bezogen auf Biogas-anlagen; f) inkl. Einzelfeuerungsanlagen; g) Kubikmeter im Normzustand/Tonnen pro Jahr
Quellen: 1) AGEE-Stat 2020; 2) BSW-Solar 2018; 3) AEE 2020; 4) BNetaA 2020; 5) Fraunhofer IEE 2020; 6) Naumann et al. 2019; 7) Bundesverband Geothermie 2020; 8) Daniel-Gromke et al. 2017

und Wetter entstehen, konnte im gleichen Zeitraum jedoch keine signifikante Reduzierung im Wohngebäude-sektor mehr beobachtet werden (Stede et al. 2020), obwohl eine solche im vorhergehenden Jahrzehnt zu beobachten war. In einem ähnlichen Zeitraum wurde im produzierenden Gewerbe jährlich circa 1 Mrd. € jährlich in Wärmetauscher, Wärmepumpen, Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmedämmung von Anlagen und Produktionsgebäuden, den Austausch der Heizungs- und Wärmetechnik sowie effiziente Netze investiert. Weiteres Optimierungspotenzial liegt im Energiemanagement. Dazu müssen die Energieströme systematisch und digital erfasst, gesteuert und möglichst in ein Energie- oder Umweltmanagementsystem eingebunden werden. Um eine schnelle Energiewende zu erreichen und die erneuerbaren Energien wirksam einzuführen, müsste die Energieeffizienz deutlich gesteigert werden. Mit Einführung des NAPE 2.0 wurde dazu das Ziel formuliert, den Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2030 gegenüber 2008 um 30 % zu senken (BMWi 2019). Im Rahmen eines Dialogprozesses „Roadmap Energieeffizienz 2050“ sollen sektorübergreifende Pfade zur Erreichung des Reduktionsziels, d. h. der Halbierung des Primärenergieverbrauches, bis 2050 erarbeitet werden.

33.3 Ausbau der erneuerbaren Energien

Die Bereitstellung von erneuerbaren Energien erfolgt vor allem über solare Strahlungsenergie und Erdwärme in Form von verschiedenen Energieträgern (Tab. 33.1). Die jeweiligen Systeme unterscheiden sich im Energieertrag, der durchschnittlichen Anlagengröße und in der Art der bereitgestellten Energieträger. Da alle erneuerbaren Energien nur geringe Energiedichten (Energieertrag je Fläche) aufweisen, ist eine weiträumige Verteilung der Erzeugungsanlagen notwendig. In der Folge kann dies zu Landnutzungskonkurrenzen (z. B. mit der Landwirtschaft und/oder dem Naturschutz) und teilweise Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung führen, hier vor allem im Bereich des Ausbaus der Windenergie an Land.

Im Jahr 2019 betrug der Anteil erneuerbarer Energieträger am Brutto-Endenergieverbrauch 17 %. Sektorenübergreifend ist Biomasse der wichtigste erneuerbare Energieträger (52 %), vor Wind (28 %) und Sonne (12 %). Damit verbunden war in diesem Jahr eine Klimagasvermeidung von insgesamt ca. 202 Mio. t CO₂-Äquivalenten (Umweltbundesamt 2019).



■ **Abb. 33.2** Schematischer Vergleich der Stromerzeugung im a fossilen und b erneuerbaren System im Verlauf von 48 h

Erneuerbare Energien wurden insbesondere im Stromsektor erfolgreich eingeführt: Dort stieg der Anteil seit dem Jahr 2000 von 6 auf heute über 42 %. In den Sektoren Wärme und Verkehr wurden die Anteile auch erhöht (von 4 auf 14 %, bzw. von 0,5 auf knapp 6 %), allerdings stagniert die Entwicklung hier seit 2010 auf diesem Niveau (AGEE-Stat 2020).

Weil die Gesteungskosten von Wind- und Fotovoltaikstrom inzwischen häufig niedriger als die von Strom aus fossilen Energieträgern sind, wird ihr weiterer starker Ausbau erwartet. In einem dann zunehmend strombasierten System können neben Strom und Wärme auch Kraftstoffe aus erneuerbar produziertem Strom, sogenannte *e-fuels*, gewonnen werden. Hierunter werden mithilfe von Strom durch Elektrolyse ge-

nerierter Wasserstoff (grüner Wasserstoff) sowie gasförmige oder flüssige Kohlenwasserstoffe (*power-to-x* bzw. *e-fuels*) verstanden, deren vielfältige Einsatzmöglichkeiten eine verstärkte Sektorkopplung zwischen den Bereichen Strom, Wärme und Verkehr ermöglichen. Grüner Wasserstoff kann neben verschiedenen Anwendungen im Verkehr und in den CO₂-intensiven Bereichen wie der Grundstoffindustrie, der Stahlerzeugung und Metallverarbeitung oder der Zementherstellung eingesetzt werden (BMW 2020). Die Herstellung von *e-fuels* ist mit hohen Umwandlungsverlusten und Kosten verbunden, weshalb diese bei ambitionierten Klimazielen vor allem in den Bereichen erwartet wird, die nur schwer auf nichtfossile Energieträger umstellbar sind, wie z. B. im Flug- oder Schwerlastverkehr (Kreidelmeyer et al. 2020).

Der Umbau von wenigen hundert zentralen angebotsabhängigen Großkraftwerken hin zu Millionen dezentralen dargebotsabhängigen Erzeugungsanlagen führt zu grundlegend veränderten Stromerzeugungsprofilen (■ Abb. 33.2) und erfordert einen Ausbau des Stromnetzes auf allen Ebenen (Übertragungs- und Verteilnetz). Um die Kosten des physisch notwendigen Ausbaus zu minimieren, müssen sowohl auf der Erzeugungs- als auch auf der Nachfrageseite intelligente Lösungen eingesetzt werden. Erzeugungssseitig müssen regelbare erneuerbare Energien (Bioenergie, Wasserkraft) und Speichertechnologien flexibel eingesetzt werden, um Schwankungen der Erzeugung durch Wind- und Sonnenenergie auszugleichen. Es stehen verschiedene Speichertechnologien (mechanisch, elektrisch, elektro-chemisch, chemisch, thermisch) mit unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich Speichervolumen, Reaktionszeit, Ladezyklen und Einsatzgebiet zur Verfügung, die allerdings wegen der hohen Investitionskosten und demgegenüber einer nur geringen Zahl an Vollbenutzungsstunden oft noch nicht wirtschaftlich sind (Kunz 2019). Durch *demand side management* kann auf der Nachfrageseite dazu beigetragen werden, die Netzstabilität zu gewährleisten. Insbesondere in der Industrie können durch die (zeitliche) Flexibilisierung von Produktionsprozessen auch Kosten gespart werden, wenn diese am jeweiligen Stromangebot ausgerichtet werden. Neue Informations- und Regeltechnik sind notwendig, um den Ausgleich zwischen Stromerzeugung und -verbrauch stets in Echtzeit kontrollieren und steuern zu können (Kunz 2019). Der Einsatz von Bioenergie wird auch künftig in allen Energiesektoren erwartet, jedoch zunehmend in den Anwendungen, in denen günstiger Strom aus Wind und Fotovoltaik nicht nutzbar ist (Thrän et al. 2020).

Die Bundesregierung hat für den Anteil der erneuerbaren Energien am Brutto-Endenergieverbrauch bis 2030 verbindliche Ziele festgelegt. Das Ziel für das Jahr 2020 von mindestens 18 % wurde knapp erreicht (s. o.). Zur Erreichung des Ziels „Netto-Null“ muss

dieser Anteil jedoch noch um ein Vielfaches gesteigert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen Hemmnisse für den weiteren Ausbau abgebaut werden. Dies betrifft unter anderem Fragen zur Verteilungsgerechtigkeit der Anlagen in der Fläche, den Stromtrassenausbau zwischen Regionen mit hoher Erzeugungsleistung und den Regionen mit den höchsten Lasten und der weiteren Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Effekte auf den Energiebedarf haben auch die technischen Konzepte zur CO₂-Entnahme, weil die Abscheidung, der Transport und die Einlagerung von CO₂ energieaufwendig ist. Sie sind bisher nicht Teil der deutschen Klimapolitik, werden aber für die dauerhafte Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2 °C als zunehmend notwendig erachtet (► Kap. 31).

33.4 Emissionshandel und Besteuerung von Klimagasen

Der Ausbau der erneuerbaren Energien reduziert die Klimaemissionen jedoch nur indirekt. Wozu das führen kann, wurde erstmals in den Jahren 2010 bis 2013 ersichtlich: Während die erneuerbaren Energien weiter ausgebaut wurden, sanken die Emissionen nicht. Diese Entwicklung, die als Paradoxon der Energiewende bekannt wurde (Agora Energiewende 2014), macht deutlich, dass eine direkte Bepreisung der Klima- bzw. CO₂-Emissionen für effektiven Klimaschutz essenziell ist. Ein solches Instrument ist zudem kosteneffizient und setzt dauerhafte Anreize für Innovationen und Investitionen in CO₂-arme Technologien.

Die CO₂-Bepreisung im deutschen Stromsektor und für die energieintensive Industrie erfolgt durch den 2005 eingerichteten europäischen Emissionshandel (EU-ETS, *European Union Emissions Trading System*). Zwischen den Jahren 2012 und 2017 waren die Preise im EU-ETS jedoch relativ niedrig und lagen beständig unter 10 €/t. Anstatt auf eine Reform des EU-ETS zu setzen, hat die Bundesregierung die sogenannte Kohlekommission ins Leben gerufen, die letztendlich einen ordnungsrechtlichen Ausstieg aus der Kohle nach Vorbild des Atomausstiegs empfohlen hat. Das entsprechende Gesetz wurde im August 2020 beschlossen und sieht die schrittweise Stilllegung aller Kohlekraftwerke bis zum Jahr 2038 sowie eine Zahlung von Entschädigungen in Milliardenhöhe für die Kraftwerksbetreiber vor.

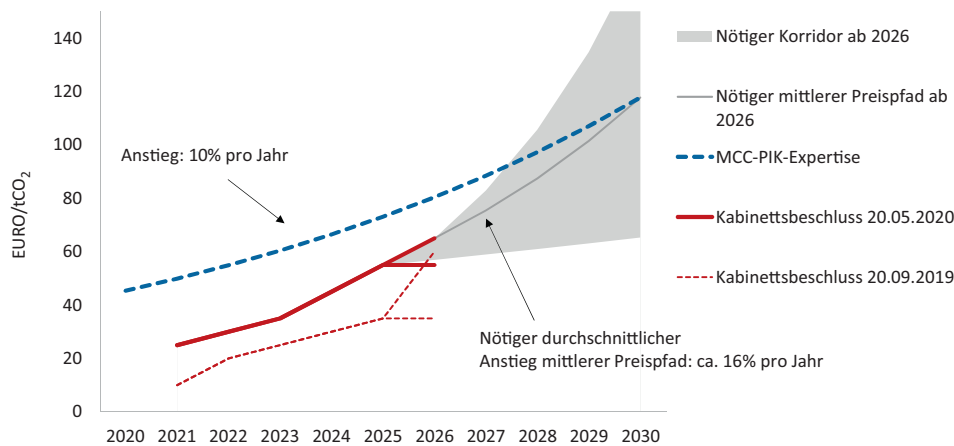
Diese Instrumentierung des Kohleausstiegs hat jedoch im Vergleich zu einem CO₂-Preis getriebenen Ausstieg mehrere gravierende Nachteile (Edenhofer und Pahle 2019): Einerseits wurde – dem Verursacherprinzip widersprechend – der Ausstieg mit erheblichen Kompensationszahlungen „erkauft“. Andererseits kommt es damit zu zwei erheblichen Verlagerungs-

effekten: dem Rebound Effekt (der Verlagerung von Emissionen ins Ausland, in dem es keinen Emissionshandel gibt) und dem Wasserbett-Effekt im EU-ETS. Letzterer bedeutet, dass durch den Kohleausstieg weniger nachgefragte Zertifikate einfach anderswo verwendet und damit die Emissionen unter dem Strich nicht oder nur teilweise reduziert werden. Auch die Löschung von Zertifikaten durch die sogenannte Marktstabilitätsreserve (MSR) ab dem Jahr 2023 ändert daran nur wenig (Pahle et al. 2019). Zur Behebung dieses Problems ist grundsätzlich eine zusätzliche nationale Löschung oder ein Mindestpreis im EU-ETS notwendig.

Vor diesem Hintergrund wurde die nationale Löschung von Zertifikaten in das Gesetz zum Kohleausstieg aufgenommen. Eine solche Löschung ist jedoch mit hohen Kosten und Unsicherheiten hinsichtlich der exakt zu löschenden Menge verbunden. Zudem führt sie zu komplexen Rückkopplungen auf den Zertifikatspreis, die dessen Volatilität erhöhen (Pahle 2020). Diese Maßnahme schafft also bestenfalls Abhilfe auf Zeit. Gleichzeitig wird der Kohleausstieg durch den jüngsten Anstieg des CO₂-Preises und die damit verbundene Reduktion der Kohleemissionen (DEHSt 2020) immer mehr zur Makulatur – auch angesichts der nun anstehenden Verschärfung der EU Klimaziele im Kontext des Green Deals, die aller Voraussicht nach den CO₂-Preis noch weiter anheben wird. Ob dies auch tatsächlich der Fall sein wird, kann zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht mit absoluter Sicherheit gesagt werden. Diese Sicherheit könnte jedoch der bereits erwähnte Mindestpreis bieten – und bei ausreichender Höhe für einen fristgerechten Ausstieg aus der Kohle sorgen.

In den nicht durch den EU-ETS abgedeckten Sektoren Verkehr, Gebäude und der restlichen Industrie gab es einen CO₂-Preis in der Vergangenheit nicht. Dies änderte sich erst mit dem Klimaschutzprogramm 2030, das im September 2019 von der Bundesregierung beschlossen wurde, und die Einführung eines nationalen Emissionshandelssystems (nEHS) in diesen Sektoren im Jahr 2021 nach sich zog. Es startet mit einem Preis von 25 €/t, der auf 55 €/t bis zum Jahr 2025 ansteigt. In dieser Zeit werden die Zertifikate nicht gehandelt und zum Festpreis ausgegeben. Erst im Jahr 2026 beginnt der Handel in einem Preiskorridor von 55 bis 65 €/t. Die Weiterführung dieses Korridors ab dem 2027 ist noch offen; darüber wird im Lauf der nächsten Jahre entschieden.

Im Vorfeld des Klimaschutzpakets wurden verschiedene Studien für die Ausgestaltung des nationalen CO₂-Preises durchgeführt, unter anderem von Autorinnen und Autoren dieses Kapitels (Edenhofer und Pahle 2019). Laut dieser Studie hätte der anfängliche Preis bei 50 €/t liegen und auf 130 €/t bis zum Jahr 2030 ansteigen sollen (■ Abb. 33.3). Zumindest in den ersten Jahren ist der Preis daher deutlich zu niedrig. Für die



■ **Abb. 33.3** Preisfade im Brennstoffemissionshandel. (Quelle: Edenhofer et al. 2020)

zweite Hälfte des Jahrzehnts wird sich zeigen, ob der Preiskorridor beibehalten bzw. ob der Preis auf das notwendige Niveau zur Erreichung der Klimaziele ansteigen wird. Diese Unsicherheit kann allerdings langfristige Investitionen hemmen (Edenhofer et al. 2020).

Mit Blick in die Zukunft ist der Anschluss an die europäische Ebene von zentraler Bedeutung. Im Klimaschutzprogramm 2030 zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 strebt die Bundesregierung eine Ausweitung des EU-ETS auf alle Sektoren an, die letztendlich auch das deutsche Emissionshandelssystem umfassen würde und dessen Einrichtung ein wesentlicher Zwischenschritt hin zu einer einheitlichen europäischen CO₂-Bepreisung war. Im Rahmen ihrer Vorschläge für die Umsetzung des Green Deal hat die EU Kommission im Juli 2021 eine solche Ausweitung in Form eines separaten Emissionshandelssystems vorgeschlagen, das in grober Orientierung am deutschen System die Sektoren Gebäude und Straßenverkehr umfasst. Ein wesentlicher Grund dafür war, die Sektoren Industrie und Energiewirtschaft aus politischen Gründen weiterhin separat regulieren zu können (Pahle et al. 2020).

33.5 Kreislaufwirtschaft

In enger Verbindung zu der Notwendigkeit der Emissionsminderung stehen Ressourcenfragen. Ein Kerntreiber der Klimagasemissionen ist die überwiegend lineare Struktur unserer Produktions- und Konsummuster: Produkte werden hergestellt, durchlaufen eine oft nur kurze Nutzungsdauer und werden anschließend entsorgt. Vor diesem Hintergrund ist die Transformation zur Kreislaufwirtschaft, wie sie beispielsweise die EU Kommission in ihrem Aktionsplan Kreislaufwirtschaft als strategisches Ziel definiert hat (Europäische Kommission 2020), nicht nur ein zentraler Ansatz zur Vermeidung von Abfällen oder zur Re-

duktion von Materialkosten, sondern auch eine Strategie für erfolgreichen Klimaschutz.

In der Abfallwirtschaft hat Deutschland in der Vergangenheit mit dem Verbot der Deponierung unbehaltener Abfälle wichtige Beiträge zum Klimaschutz geleistet, auch durch das gesteigerte Recycling wurden ca. 56 Mio. t CO₂-Emissionen pro Jahr eingespart (Umweltbundesamt 2011). Doch das Konzept der Kreislaufwirtschaft geht weit über das klassische Abfallmanagement hinaus. Kreislaufwirtschaft ist ein umfassendes Konzept, bei dem schon beim Produktdesign und der Nutzung von Produkten die möglichst optimale Rückgewinnung von Rohstoffen berücksichtigt werden soll. Modellierungen zeigen, dass konsequent umgesetzte Kreislaufwirtschaft Treibhausgasemissionen für Schlüsselmaterialien wie Kunststoffe, Zement und Stahl langfristig um mehr als 50 % reduzieren könnte (Material Economics 2019).

Angesichts dieser Potenziale ist die Geschwindigkeit der Transformation gerade in Deutschland niedrig: Betrachtet man beispielsweise die *circular material use rate* als einen der Leitindikatoren der Europäischen Kommission für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in den einzelnen Mitgliedsstaaten, so zeigt sich nahezu eine Stagnation: Seit 2010 konnte der Anteil der recycelten Materialien nur von 11 % auf 11,6 % in 2017 gesteigert werden; 2017 lag Deutschland dabei erstmals unterhalb des Durchschnitts der EU 28 Mitgliedsstaaten, deutlich hinter beispielsweise dem Spitzenreiter Niederlande mit 29,9 % (Eurostat 2020).

Treibhausgaseminderung durch Kreislaufwirtschaft bedeutet dabei auch, Stoffkreisläufe auf unterschiedlichen Ebenen zu reduzieren und zu schließen:

- Die Möglichkeiten der Abfallvermeidung sind lange noch nicht ausgeschöpft, z. B. fallen in Deutschland jährlich ca. 10 Mio. t vermeidbare Lebensmittelabfälle an (Noleppa und Carlsburg 2015).
- Wiederverwendung, Reparatur oder re-manufacturing von Produkten sind häufig mit besonders

hohen Klimagaseinsparungen von bis zu 70 % verbunden; sie erfordern aber auch komplexe Systeme zur Redistributionslogistik und oft auch neue Geschäftsmodelle.

- Gleichzeitig bieten auch Technologien wie das chemische Recycling Chancen zur Reduktion von Klimagasemissionen, wenn die richtigen Abfallströme den jeweils besten Verwertungsverfahren zugeführt werden (IN4climate.NRW 2020).

Angesichts dieser Komplexitäten gewinnen Strategien auf Ebene einzelner Regionen und Städte zunehmend an Bedeutung, in denen einzelne Bausteine für den Übergang zur Kreislaufwirtschaft mit den Akteuren vor Ort entwickelt, getestet und optimiert werden – so beispielsweise in Kiel mit einer *zero waste strategy*, die das Restabfallaufkommen langfristig um mehr als 70 % reduzieren soll (Landeshauptstadt Kiel 2020).

Die CO₂-Bepreisung setzt zwar Anreize für eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs bzw. deren Wiederverwendung, indem sie entsprechende Produkte verteuert. Allerdings kann die eher indirekte Wirkung über den Preis durch weitere Anpassungen der politischen und strukturellen Rahmenbedingungen – etwa in Bezug auf Obsoleszenz und Reparierbarkeit von Produkten – wesentlich direkter adressiert werden.

33.6 Schlussbemerkung

Das vorliegende Kapitel hat am Beispiel Deutschland aufgezeigt, dass eine deutlich schnellere Emissionsreduktion von Klimagasen erforderlich ist, um den Klimawandel ausreichend zu begrenzen. Dazu müssen die Möglichkeiten von Energieeffizienz, erneuerbaren Energien, CO₂-Bepreisung und Kreislaufwirtschaft gemeinsam angegangen und ausgeschöpft werden. Aber auch das Politikdesign muss sich weiterentwickeln: Die Unterstützung klimafreundlicher Maßnahmen war als Einstiegshilfe erfolgreich. Für die breite Etablierung und ein höheres Ambitionsniveau ist nun die Kombination von Marktmechanismen und verbindlichen Zielen für Klimagasreduktionen – und behelfsweise auch erneuerbare Energien bzw. Sanktionen für fossile Energien – notwendig. Solche Politiken sind mit größeren Widerständen verbunden, hinter denen oft Verteilungsfragen stehen. Diese zu überwinden erfordert die Etablierung einer integrierten Politik, die zwischen den Bereichen Klima, Wirtschaft, und Soziales gezielt nach Synergien sucht (► Kap. 31). Ein Beispiel hierfür sind Bürgerwindparks, bei denen Kommunen sowie Anwohner und Anwohnerinnen an Windparks beteiligt werden und dadurch, zumindest teilweise, für die negativen Folgen des Windparks entschädigt werden. Auch werden die Maßnahmen nur erfolgreich sein, wenn sie in verbindliche internationale Maßnahmen und Stra-

tegien eingebettet sind. Das betrifft sowohl die Umsetzung des Pariser Abkommens als auch des europäischen *Green Deals*. Letztendlich muss sich jede klimapolitische Maßnahme in letzter Konsequenz daran messen lassen, ob sie die internationale Entwicklung befördert oder nicht.

33.7 Kurz gesagt

Die schnelle und umfassende Emissionsminderung in der Energie- und Kreislaufwirtschaft ist der Schlüssel für die Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2 °C. In Deutschland werden entsprechende Politiken seit den 1990er-Jahren verfolgt, allerdings erst in jüngster Vergangenheit mit dem notwendigen Nachdruck und der notwendigen Orientierung hin zu mehr Marktmechanismen. Wesentliche Handlungsfelder sind Energieeinsparung und erhöhte Energieeffizienz, Umstieg auf erneuerbare Energien, Bepreisung von Klimagasen sowie eine Reduzierung und Schließung der Stoffkreisläufe. In allen Handlungsfeldern sind Grundlagen geschaffen, jedoch bleibt der Großteil des Weges noch zugehen, um Klimaneutralität zu erreichen. Für einen schnellen Fortschritt spielen neben der Überwindung der technischen, ökonomischen und organisatorischen Herausforderungen auch Verteilungsfragen und die Einbettung in internationale Maßnahmen eine zunehmende Rolle.

Literatur

- AEE [Agentur für Erneuerbare Energien] (2020) Föderal Erneuerbar. Bundesländer mit neuer Energie. Länder-Übersicht. ► https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/kategorie/solar/auswahl/988-installierte_leistun/bundesland/D/#goto_988. Zugriffen: 5. Okt. 2020
- AGEE-Stat [Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik] (2020) Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. ► https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=26
- Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) (2021) ► <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>. Zugriffen: 7. Sept. 2021
- BMWi [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie] (2018) Energieeffizienz in Zahlen, Berlin
- BMWi [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie] (Hrsg) (2019) Energieeffizienzstrategie 2050, Berlin
- BMWi [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie] (Hrsg) (2020) Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende, Berlin
- BNetzA [Bundesnetzagentur] (2020) Marktstammdatenregister, Erweiterte Einheitenübersicht, Stromerzeugungseinheiten, Solare Strahlungsenergie, Freifläche, Berlin
- Bundesverband Geothermie (2020) Geothermie in Zahlen. ► <https://www.geothermie.de/geothermie/geothermie-in-zahlen.html>. Zugriffen: 5. Okt. 2020

- BSW-Solar [Bundesverband Solarwirtschaft e. V.] (2018) Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie). ► https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/bsw_faktenblatt_st_2018_2.pdf. Zugegriffen: 5. Okt. 2020
- Climate Watch (o. J.) Historical GHG emissions. ► <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Zugegriffen: 7. Okt. 2020
- Daniel-Gromke J, Rensberg N, Denysenko V, Trommler M, Reinholz T, Völler K, Beil M, Beyrich W (2017) Anlagenbestand Biogas und Biomethan -Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH [DBFZ] (Hrsg), Leipzig
- DEHSt [Deutsche Emissionshandelsstelle] (Hrsg) (2020) Treibhausgasemissionen 2019, Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2019). ► https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2019.pdf;jsessionid=E3747A325DF6F-2927B2DAB29D422F836.2_cid284?__blob=publicationFile&v=3. Zugegriffen: 16. Okt. 2020
- Edenhofer O, Pahle M (2019) The German coal phase out: buying out polluters, not (yet) buying into carbon pricing. EAERE Magazine N5 Spring 2019, S 11–14
- Edenhofer O, Flachsland C, Kalkuhl M, Knopf B, Pahle M (2019) Optionen für eine CO₂-Preisreform, MCC-PIK-Expertise für den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change [MCC] gGmbH (Hrsg). ► https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Working%20Paper/2019_MCC_Optionen_f%C3%BCr_eine_CO2-Preisreform_final.pdf. Zugegriffen: 7. Okt. 2020
- Edenhofer O, Kalkuhl M, Ockenfels A (2020) Das Klimaschutzprogramm der Bundesregierung: Eine Wende der deutschen Klimapolitik? *Perspekt Wirtsch* 21(1):4–18
- Europäische Kommission (2020) EU circular economy action plan, a new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe. ► <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>. Zugegriffen: 16. Okt. 2020
- EEA [European Environment Agency] (2020) EEA greenhouse gas – data viewer. ► <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>. Zugegriffen: 7. Okt. 2020
- Eurostat (2020) Circular material use rate. ► https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm030/default/table?lang=en. Zugegriffen: 15. Sept. 2020
- Fraunhofer IEE [Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Systemtechnik] (2020) Windmonitor. ► http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/index.html. Zugegriffen: 5. Okt. 2020
- IN4climate.NRW (2020) Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven, Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy, Gelsenkirchen
- Kreidelmeyer S, Dambeck H, Kirchner A, Wunsch, M (2020) Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe“. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. [Prognos AG] (Hrsg), Basel
- Kunz, C (2019) Energiespeicher: Technologien und ihre Bedeutung für die Energiewende. RENEWS Spezial, Nr. 88/2019, Agentur für Erneuerbare Energien e. V. (Hrsg), Berlin
- Landeshauptstadt Kiel (2020) Zero Waste-Konzept, Gemeinsam Abfälle vermeiden und Ressourcen schonen, Projekt gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Kiel
- Material Economics (2019) Industrial transformation 2050, pathways to net-zero emissions from EU heavy industry
- Naumann K, Schröder J, Oehmichen K, Etzold H, Müller-Langer F, Remmele E, Thuncke K, Raksha T, Schmidt P (2019) Monitoring Biokraftstoffsektor, DBFZ Report Nr. 11, 4. Überarbeitete und erweiterte Aufl. Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH [DBFZ] (Hrsg), Leipzig
- Noleppa S, Carlsburg M (2015) Das grosse Wegschmeissen, Vom Acker bis zum Verbraucher: Ausmaß und Umwelteffekte der Lebensmittelverschwendung in Deutschland. ► https://www.wwf.de/fileadmin/user_upload/WWF_Studie_Das_grosse_Wegschmeissen.pdf. Zugegriffen: 3. Nov. 2020
- Pahle (2020). Schriftliche Stellungnahme zum Thema „Ökologische Aspekte des Kohleausstiegs“ Fachgespräch des Umweltausschusses des Bundestags, 15. Juni 2020 ► https://www.bundestag.de/ausschuesse/a16_umwelt/oeffentliche_anhoerungen/oeffentliche-anhoerung-74-sitzung-kohleausstieg-697270
- Pahle M, Edenhofer O, Pietzcker R, Tietjen O, Osorio S, Flachsland C (2019) Die unterschätzten Risiken des Kohleausstiegs. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 62(6)
- Pahle M, Tietjen O, Osorio S, Knopf B, Flachsland C, Korkmaz P, Fahl U (2020) Die Anschärfung der EU-2030-Klimaziele und Implikationen für Deutschland. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 70(7/8)
- Stede J, Schütze F, Wietschel J (2020) Wärmemonitor 2019: Klimaziele bei Wohngebäuden trotz sinkender CO₂-Emissionen derzeit außer Reichweite, DIW Wochenbericht Nr. 40/2020
- Thrän D, Bauschmann M, Dahmen N, Erlach B, Heinbach K, Hirschl B, Hildebrand J, Rau I, Majer S, Oehmichen K, Schweizer-Ries P, Hennig C (2020) Bioenergy beyond the German „Energiewende“ – assessment framework for integrated bioenergy strategies, *biomass and bioenergy* 142 (2020)
- Umweltbundesamt (2011) Klimarelevanz der Abfallwirtschaft, Dessau-Roßlau
- Umweltbundesamt (2019) Netto-Bilanz der vermiedenen Treibhausgas-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2019, Dessau-Roßlau
- Umweltbundesamt (2020) Emissionen sinken 2018 um mehr als 31 Prozent gegenüber 1990, Dessau-Roßlau
- WBGU [Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen] (2009) Kassensturz für den Weltklima-vertrag – Der Budgetansatz. Sondergutachten, Berlin

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

