

Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO₂-Budget

2

Inhalt

2	Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO₂-Budget	37
2.1	Einleitung.....	38
2.2	Das CO ₂ -Budget als zentrale Messgröße für den Klimaschutz.....	39
2.2.1	Grundlagen und Funktionen des CO ₂ -Budgets.....	39
2.2.2	Einflussfaktoren auf die Berechnung des CO ₂ -Budgets.....	44
2.2.3	Größe des globalen CO ₂ -Budgets.....	46
2.2.4	Das CO ₂ -Budget für Europa, Deutschland und nationale Sektoren.....	48
2.3	Eckpunkte zur Einhaltung eines nationalen CO ₂ -Budgets.....	57
2.3.1	Um- statt Ausstieg: erneuerbare Energien anstelle fossiler Energieträger.....	57
2.3.2	Keine erneute Nutzung der Atomenergie.....	60
2.3.3	Die Rolle von negativen Emissionen – stark begrenzter Einsatz von CCS in Deutschland	62
2.3.4	Regulierungsbedarf bei der energetischen Nutzung von Stammholz	67
2.4	Governance: Schlüssel zur Einhaltung des CO ₂ -Budgets	71
2.4.1	Die Klimagovernance der EU	71
2.4.2	Nationale Klimagovernance.....	78
2.4.3	Bundes-Klimaschutzgesetz im Kontext des Pariser Klimaabkommens	84
2.5	Handlungsempfehlungen	87
2.6	Fazit.....	91
2.7	Literatur	93

Abbildungen

Abbildung 2-1	Zusammenhang zwischen CO ₂ -Emissionen und Temperaturänderung	41
Abbildung 2-2	Emissionspfade zur Einhaltung der Pariser Klimaziele in Deutschland (schematisch)	42
Abbildung 2-3	Das CO ₂ -Budget als Grundlage bestehender Klimaziele auf verschiedenen Ebenen	43
Abbildung 2-4	Globale Erderwärmung infolge nationaler Interpretationen eines „fairen Anteils am Reduktionsfortschritt“	49
Abbildung 2-5	Kumulative historische CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger, Zementherstellung und Gasabfackelung.....	50
Abbildung 2-6	Emissionsreduktion gemäß nationaler Klimaziele bzw. Paris-kompatiblem Budget für Deutschland	54
Abbildung 2-7	Schematische Darstellung eines gesamten Budget-kompatiblen Reduktionspfades inklusive Budgetaufteilung auf Sektoren	56
Abbildung 2-8	Verfahren, die unter „negativen Emissionen“ verstanden werden.....	63
Abbildung 2-9	Der Kohlenstoffgehalt von Wäldern in Abhängigkeit von ihrer Bewirtschaftung.....	70
Abbildung 2-10	Schematische Darstellung der Ambitions- und Umsetzungslücke in der Klimapolitik.....	72
Abbildung 2-11	Tatsächliche und projizierte Treibhausgasemissionen Deutschlands unter Berücksichtigung beschlossener klimapolitischer Maßnahmen (in Mt CO _{2eq}) ..	75
Abbildung 2-12	Klimapolitikzyklen auf deutscher, europäischer und internationaler Ebene	86
Abbildung 2-13	Empfehlungen zur Einführung, Anwendung und Einhaltung des CO ₂ -Budgets ..	88

Tabellen

Tabelle 2-1	Globale CO ₂ -Budgets aus dem IPCC-Sonderbericht	46
Tabelle 2-2	Emissionen je Sektor gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz und einer Treibhausgasneutralität aller Emissionen bis 2050	53
Tabelle 2-3	Auswahl klima- und energiepolitischer Ziele der EU bis 2030	73
Tabelle 2-4	Auswahl klima- und energiepolitischer Ziele Deutschlands	79

Kästen

Kasten 2-1	CO ₂ -Budget: Definition und Abgrenzung	40
Kasten 2-2	Berechnung eines Paris-kompatiblen CO ₂ -Budgets ab 2020 für die EU-28 und Deutschland	52
Kasten 2-3	Ambitionsücke und Umsetzungsücke in der Klimapolitik	72
Kasten 2-4	Klimapolitische Zielverfehlungen Deutschlands und ihre finanziellen Folgen	75
Kasten 2-5	Das CO ₂ -Budget als Maßstab politischer Klimaschutzmaßnahmen	80

Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO₂-Budget

Wie viel CO₂ darf Deutschland noch emittieren, um einen gerechten Beitrag zur Einhaltung des Pariser Klimaabkommens zu leisten? Will man den Klimawandel auf das vereinbarte, gerade noch beherrschbare Ausmaß begrenzen, ist eine Obergrenze für die global noch möglichen CO₂-Emissionen einzuhalten. Durch Aufteilung auf die Staatengemeinschaft kann nach Prinzipien der internationalen Verteilungsgerechtigkeit ein deutsches CO₂-Budget abgeleitet werden. Die derzeitigen deutschen Klimaziele erlauben Gesamtemissionen, die ein so ermitteltes nationales Budget überschreiten. Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz ergänzt die Bundesregierung bestehende Klimaziele durch Jahresemissionsgrenzen für Sektoren bis 2030. Dies entspricht nationalen Budgets, sagt jedoch zu wenig über das Ambitionsniveau bis 2050 aus. Diese Emissionsgrenzen sollten in ein Gesamtbudget bis 2050 eingebettet werden. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) empfiehlt der Bundesregierung daher ein mit dem Pariser Klimaabkommen kompatibles deutsches CO₂-Budget festzulegen und die Klimaziele entsprechend zu verschärfen. Das Budget sollte bestehende Ziele nicht ersetzen, sondern als übergreifende Bewertungsgrundlage dienen. Gleichzeitig ist es dringend erforderlich, Maßnahmen umzusetzen, die den Weg zur Klimaneutralität ermöglichen, zum Beispiel den Ausbau erneuerbarer Energien zu beschleunigen. Nur so kann die Nutzung fossiler Ressourcen rasch beendet werden. Um das Budget einzuhalten, müssen der Reduktionsfortschritt regelmäßig überprüft und Maßnahmen kontinuierlich fortentwickelt werden.

2.1 Einleitung

1. Mit der Ratifizierung des Klimaabkommens von Paris hat sich die Bundesrepublik Deutschland völkerrechtlich bindend zu den darin festgelegten Klimazielen bekannt (Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste 2018, S. 6). Die Erderwärmung soll nach Art. 2 des Pariser Klimaabkommens im Vergleich zum vorindustriellen Niveau auf deutlich unter 2 °C begrenzt werden und es sollen Anstrengungen unternommen werden, diese möglichst auf 1,5 °C zu limitieren. Damit verpflichten sich die Vertragsstaaten, darunter Deutschland, die nationalen Treibhausgasemissionen kontinuierlich abzusenken und spätestens in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts vollständig klimaneutral zu werden. Auch aus der Gesellschaft heraus wird zunehmend eine ambitioniertere Klimapolitik Deutschlands eingefordert (Infratest dimap 2019, S. 3 und 5). Nur wenn es gelingt, den Klimawandel auf das vereinbarte Niveau zu begrenzen, können elementar gefährdende Auswirkungen für die Umwelt und die Gesellschaften der Erde größtenteils verhindert werden (IPCC 2018b). Zum Beispiel würden die weitere Zunahme von wetterbedingten Extremereignissen und ihre Auswirkungen auf Infrastrukturen und Landnutzung begrenzt (COUMOU et al. 2013) und wichtige Kippunkte im Klimasystem der Erde nicht überschritten (SCHELLNHUBER et al. 2016) werden.

2. Wie aber lässt sich feststellen, wie groß ein angemessener nationaler Beitrag zur globalen Emissionsreduktion von Treibhausgasen sein muss? Wie lässt sich bewerten, ob Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) und die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms ausreichen, um einen angemessenen deutschen Beitrag zum Pariser Klimaabkommen zu liefern? Zwar ist Deutschland selbst verantwortlich, den eigenen Reduktionsbeitrag festzulegen, dabei ist es jedoch stets an die Pariser Klimaziele gebunden (Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste 2018, S. 6).

3. Um abzuschätzen, ob klimapolitische Ziele sowie Fortschritte bei der Reduktion von Emissionen Paris-kompatibel sind, eignet sich der Ansatz des CO₂-Budgets. Dieses Konzept beruht auf dem klimaphysikalischen Zusammenhang zwischen den CO₂-Emissionen und der Erderwärmung (WBGU 2009). Das CO₂-Budget bezeichnet die kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen, die ab einem gegebenen Zeitpunkt noch emittiert werden können, sodass die daraus resultierende Erwärmung der Erde eine bestimmte Temperaturschwelle nicht übersteigt. Das Konzept des CO₂-Budgets steht damit im

direkten Zusammenhang mit den Pariser Klimazielen. Es kann für die globale Ebene ermittelt und basierend auf normativen Annahmen der Verteilungsgerechtigkeit für die nationale und auch sektorale Ebene abgeleitet werden.

4. In der aktuellen politischen Diskussion wird eine Vielzahl unterschiedlicher Ziele und Maßnahmen diskutiert. Neben den Temperaturzielen des Klimaabkommens von Paris zählen dazu Emissionsreduktionsziele, die als prozentuale Reduktionen bis zu einem Zieljahr im Vergleich zu einem Basisjahr formuliert werden. Ebenso werden konkrete Zieljahre für die Beendigung der Emissionen aus einer bestimmten Quelle, wie der Kohleverstromung, diskutiert. Das Ziel der Treibhausgasneutralität der gesamten Volkswirtschaft wird für ein spezifisches Zieljahr verfolgt. Treibhausgasneutralität bedeutet, dass ein Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken besteht.

Klimaschutzziele werden zudem auf verschiedenen Ebenen gesetzt: global, europäisch, national, auf Ebene der Bundesländer sowie auf kommunaler und sektoraler Ebene. Die Ziele sind unterschiedlich ambitioniert, verbindlich und oft nicht ausreichend aufeinander abgestimmt. Die europäischen Klimaziele sind bis 2030 überwiegend als Treibhausgasbudgets operationalisiert. Die deutsche Klimapolitik basierte bisher auf Emissionsreduktionszielen. Diese werden durch das Bundes-Klimaschutzgesetz erstmals um sektorale Treibhausgasbudgets bis 2030 ergänzt. Es fehlt jedoch ein Paris-kompatibler Transformationspfad bis 2050, sowohl auf europäischer als auch auf deutscher Ebene.

5. In den verschiedenen Sektoren, beispielsweise der Stromerzeugung, der Wärmeversorgung und im Verkehr, wird eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen diskutiert. Dabei fehlt jedoch eine Gesamtbilanzierung. Es ist aber notwendig, dass die Wirksamkeit sektoraler Strategien stetig und wissenschaftlich überprüft wird, damit die Gesamtheit aller nationalen Maßnahmen einen ausreichenden Beitrag zur Einhaltung der Pariser Klimaziele leistet.

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen zeigt in diesem Kapitel, wie ein nationales CO₂-Budget abgeleitet werden kann und welche Schlussfolgerungen sich für die Emissionsreduktion in Deutschland und die Zielsetzung einzelner Sektoren ergeben. Der Budgetansatz eignet sich, um bestehenden und künftigen klimapolitischen Zielen Deutschlands zugrunde gelegt zu werden.

2.2 Das CO₂-Budget als zentrale Messgröße für den Klimaschutz

6. Mit der gescheiterten Klimakonferenz 2009 in Kopenhagen, bei der keine völkerrechtlich verbindliche Übereinkunft getroffen werden konnte, fand ein Paradigmenwechsel in der internationalen Klimadiplomatie statt (BODANSKY 2016; SACHS 2019). Anstelle verbindlich festgelegter Reduktionsverpflichtungen werden die nationalen Beiträge auf nationaler Ebene formuliert und konstant angepasst (Pledge-and-Review). Während das Klimaabkommen von Paris selbst völkerrechtliche Verbindlichkeit besitzt, sind die Nationalstaaten die entscheidenden Akteure bei der Festlegung ihrer eigenen Klimaziele (FALKNER 2016). Diese selbst gesetzten Klimaschutzziele werden als national festgelegte Beiträge (Nationally Determined Contributions – NDCs) beim Sekretariat des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) hinterlegt. Die Wirksamkeit dieses Ansatzes beruht auf der Annahme, dass Staaten ein Eigeninteresse daran haben, gegebene Zusagen auch einzuhalten, da sonst auf der internationalen Ebene ein Reputationsverlust droht (Naming and Shaming, s. JACQUET und JAMIESON 2016, S. 644). Das Abkommen sieht vor, dass die eingereichten NDCs alle fünf Jahre überarbeitet werden und anschließend jeweils in einer weltweiten Bestandsaufnahme (Global Stocktake) Bilanz über die damit verbundenen Reduktionsfortschritte gezogen wird (Art. 4 und Art. 14 Pariser Klimaabkommen). Dabei sind die Vertragsstaaten verpflichtet, die Ambition ihres Beitrags immer wieder zu steigern. Dieser Ratcheting-up-Mechanismus (Mechanismus zum Nachschärfen der NDCs) soll sicherstellen, dass die Lücke zwischen den Klimazielen von Paris und den nationalen Reduktionsbeiträgen schrittweise geschlossen wird.

Derzeit genügt die Summe der nationalen Klimaschutzbeiträge nicht, um das globale Temperaturziel einzuhalten. So reichen die bisher vorgelegten NDCs selbst bei vollständiger Umsetzung nur aus, um den globalen Temperaturanstieg auf rund 3 °C (2,4 °C – 3,8 °C) zu begrenzen (Climate Analytics und NewClimate Institute 2019). Bereits heute hat sich die mittlere oberflächennahe Lufttemperatur (Land und Ozeane) seit der Industrialisierung um 0,87 °C erwärmt, über Land sogar um 1,53 °C (IPCC 2019). Die Folgen einer weiteren Erwärmung wären disruptiv für gesellschaftliche, öko-

nomische und ökologische Abläufe, die elementar für das Gemeinwohl sind. Eine deutliche Erhöhung der klimapolitischen Anstrengungen auf globaler Ebene ist daher notwendig (ROGELJ et al. 2016a).

2.2.1 Grundlagen und Funktionen des CO₂-Budgets

7. Deutschland und die EU sind verpflichtet, die notwendigen Beiträge zu leisten, um die Pariser Klimaziele zu erreichen (s. Abschn. 2.4.1 und 2.4.2). Hierzu ist es notwendig, die Beiträge konkret zu bestimmen und kontinuierlich zu überprüfen. Das CO₂-Budget stellt einen sachgerechten Ansatz hierfür dar (s. Kasten 2-1).

Ziel- und Messgrößen in Klimapolitik und -wissenschaft

8. Je nach Diskussionszusammenhang werden in Klimawissenschaft und -politik verschiedene Ziel- und Messgrößen verwendet, die sich entweder auf die Temperatur, die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre oder die CO₂-Emissionen beziehen. Die Klimaziele von Paris wurden als maximale Erwärmungs- bzw. Temperaturziele formuliert. Der methodische Vorteil eines solchen Temperaturziels ist, dass es im direkten Zusammenhang mit den Folgen der Erderwärmung steht, weil die mittlere Temperatur der Erde eine zentrale Leitgröße für den Zustand des Erdsystems insgesamt ist. Somit gibt das Temperaturziel den Konsens der Weltgemeinschaft über das anzustrebende Schutzniveau wieder, wenngleich die Folgen der Erderwärmung regional sehr unterschiedlich auftreten und oft auch über Klimagrößen wie die Niederschlagsmenge oder Extremereignisse vermittelt werden. Damit aus einem globalen Temperaturziel jedoch Steuerungsgrößen wie die maximal zulässigen Emissionsmengen auf nationaler Ebene abgeleitet werden können, sind klimaphysikalische Umrechnungen der Erwärmung in emittierte CO₂-Mengen notwendig.

9. Zwischen der Gesamtmenge der über alle Zeiten hinweg kumulierten anthropogenen Emissionen des wichtigsten Treibhausgases CO₂ und der globalen Temperaturerhöhung besteht ein annähernd linearer Zusammenhang (s. Abb. 2-1). Ein Anteil von etwa 24 % aller anthropogenen Emissionen wird von den Meeren und etwa 30 % von der terrestrischen Biosphäre aufgenommen (LE QUÉREÉ et al. 2018, S. 2160). Der Rest verbleibt langfristig in der Atmosphäre und entfaltet dort mittelfristig eine proportionale Wirkung auf die Mitteltemperatur der Erde. Dieser Sachverhalt ist sowohl klimaphysikalisch aus dem Zusammenhang zwischen

Kasten 2-1: CO₂-Budget: Definition und Abgrenzung

Das vorliegende Kapitel zeigt auf der Basis des aktuellen Stands der Forschung, welche Gesamtmenge an CO₂ über die kommenden Jahrzehnte weltweit höchstens noch emittiert werden darf, damit die Ziele des Klimaabkommens von Paris zur Begrenzung der Erderwärmung eingehalten werden. Aus diesem globalen CO₂-Budget werden in einem zweiten Schritt plausible nationale und europäische CO₂-Budgets und damit entsprechende Emissionsobergrenzen abgeleitet. Diese Rechnungen beziehen sich auf das wichtigste Treibhausgas CO₂, obwohl auch andere menschlich verursachte Treibhausgase (wie z. B. Methan) und Aerosole zum Klimawandel beitragen (IPCC 2013). Diese Eingrenzung hat mehrere Gründe. CO₂-Emissionen reichern sich über lange Zeiträume kumulativ in der Atmosphäre an, sodass sich ein zeitübergreifender Budgetansatz zur Festlegung von maximalen Gesamtemissionen eignet. Andere Treibhausgase und Aerosole sind oft kurzlebiger und können daher in ihrer Wirkung auf das Klima über lange Zeiträume nicht wie CO₂ als eine sich stetig aufsummierende Gesamtmenge bilanziert werden.

Aus diesem Grund berichtet auch der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) in seinem Sonderbericht zum 1,5°-Ziel globale Emissionsbudgets als reine CO₂-Budgets (IPCC 2018b). Auf diesen Ergebnissen beruhen auch die in Abschnitt 2.2.4 durchgeführten Budgetberechnungen. Für Deutschland deckt der CO₂-Ausstoß mit etwa 88 % der gesamten Treibhausgasemissionen derzeit den größten Teil der klimawirksamen Emissionen ab („Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück. Große Minderungen im Energiesektor, Anstieg im Gebäudesektor und Verkehr“, Gemeinsame Pressemitteilung des Umweltbundesamtes und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit vom 16. März 2020). Ein Nachteil dieses Ansatzes ist, dass es Sektoren gibt – insbesondere die Landwirtschaft – die vorrangig andere Gase emittieren. Deren Klimaschutzbeitrag kann daher über ein CO₂-Budget nicht angemessen bewertet werden – dies erfordert eine ergänzende Behandlung. Für kürzere Zeiträume (z. B. einige Jahre) kann die Wirkung anderer Treibhausgase

rechnerisch in CO₂-Äquivalente (CO_{2eq}) übersetzt werden, also in die Menge emittierten CO₂ mit derselben Wirkung auf das Klima. In solchen Fällen kann von einem Treibhausgasbudget gesprochen werden.

Die hier besprochenen CO₂-Budgets sind aufgrund klimawissenschaftlicher Zusammenhänge aus Temperaturzielen abgeleitet. Damit nicht zu verwechseln sind jedoch politisch gesetzte CO₂- und Treibhausgasbudgets, welche Klimaziele darstellen oder durch die Ausgabe von Emissionszertifikaten begrenzt sind. Ein Beispiel dafür ist der Europäische Emissionshandel (European Union Emissions Trading System – EU ETS), das jährlich Budgets für mehrere Treibhausgase in bestimmten Sektoren definiert und einen Handel mit Emissionszertifikaten ermöglicht. Die Lastenteilungsentscheidung (Entscheidung Nr. 406/2009/EG) und die Klimaschutzverordnung (EU) 2018/842 weisen für nicht vom EU ETS erfasste Sektoren jährliche nationale Budgets in CO_{2eq} aus (Tz. 88; UBA 2019c). Die deutsche Klimapolitik basierte in der Vergangenheit vorrangig auf Reduktionszielen für ein bestimmtes Jahr. Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz wurden mit der europäischen Klimaschutzverordnung kompatible jährliche Treibhausgasbudgets erstmalig verbindlich festgeschrieben und bis 2030 auf die verschiedenen Sektoren aufgeteilt (Tz. 97). Der Unterschied zwischen einem politisch und einem klimawissenschaftlich definierten CO₂-Budget kann – sofern vorhanden – als Ambitionsücke bezeichnet werden. Gibt es einen Unterschied zwischen einem beabsichtigten und dem real resultierenden Budget, kann dieser als Umsetzungslücke bezeichnet werden (s. Kasten 2-3).

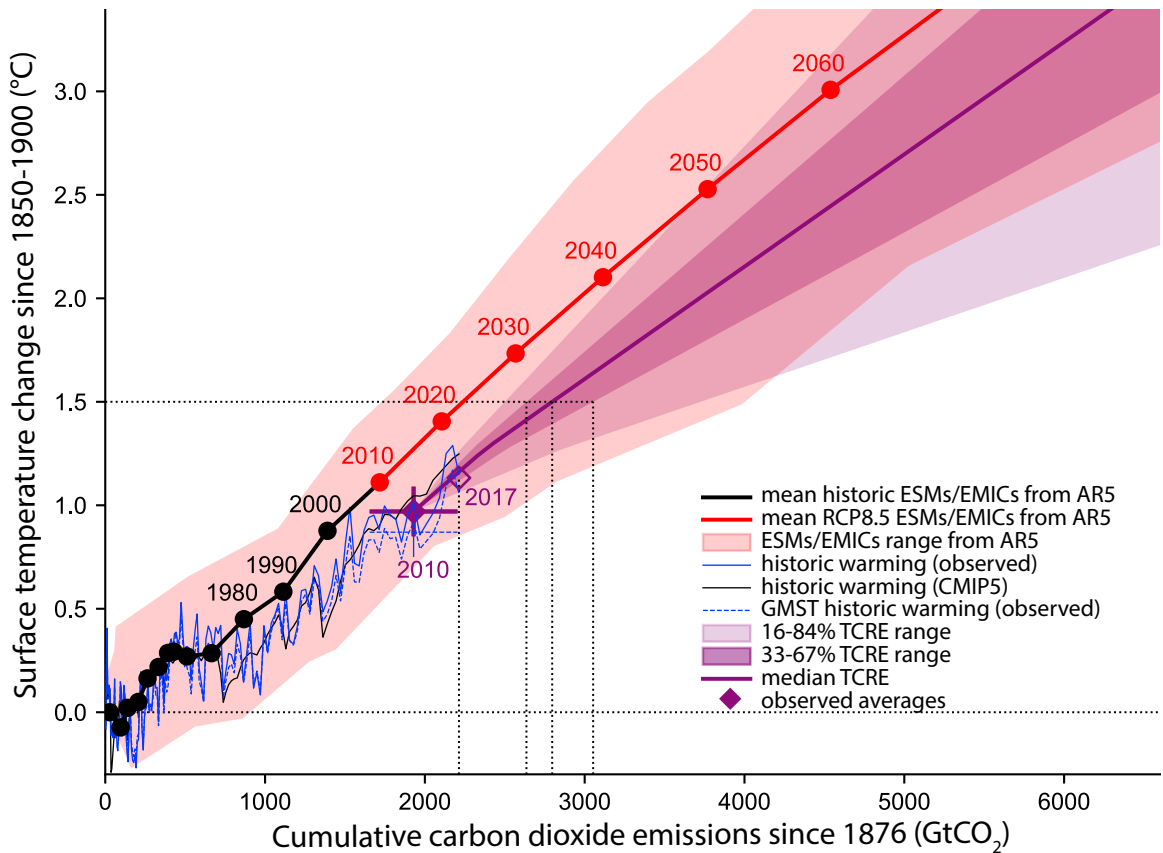
Insgesamt werden Klimabudgets – verstanden als übergreifende Bezeichnung für verschiedene Budgetansätze – immer häufiger als politische Steuerungsgröße eingesetzt. Dies ist positiv zu bewerten, da es Klimaschutzbemühungen transparenter und vergleichbarer macht. Häufig sind die festgelegten Mengen allerdings nicht ambitioniert genug, um das naturwissenschaftlich aus den Zielen des Klimaabkommens von Paris abgeleitete Budget erreichen zu können.

atmosphärischem CO₂-Gehalt, Strahlungsbilanz der Atmosphäre und Temperatur ableitbar als auch das Ergebnis von numerischer Simulation mit Klimamodellen

und Untersuchungen zum Verlauf der Erdgeschichte. Diese Größen können prinzipiell ineinander umgerechnet werden, die Stärke des Zusammenhangs zwischen

o **Abbildung 2-1**

Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und Temperaturänderung



Auf der X-Achse sind die kumulativen CO₂-Emissionen in Gt CO₂ seit 1876 abgebildet, auf der Y-Achse die Veränderung der bodennahen Lufttemperatur (°C) seit dem Zeitraum 1850 – 1900. Die schwarze Linie zeigt die von Erdsystemmodellen berechnete Erwärmung auf Basis historischer Emissionen. Die rote Linie zeigt die projizierte Erwärmung auf Grundlage eines Business-as-usual-Szenarios. Beide Verläufe entstammen dem Fünften Sachstandsbericht des IPCC (AR5).

Quelle: IPCC 2018b, Kap. 2, S. 105

kumulierten Emissionen und Erwärmung ist jedoch aufgrund der Komplexität des Klimasystems mit Unsicherheiten verbunden (s. Abb. 2-1; ALLEN et al. 2009). Obwohl die Unsicherheiten seit den 1970er-Jahren unverändert bestehen, ist durch die Forschung der genaue Wert der sogenannten Klimasensitivität, die als Maßstab dienende Größe der Veränderung der mittleren globalen Temperatur bei einer Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration, heute relativ genau eingegrenzt. Werden Temperaturziele definiert, die an Auswirkungen des Klimawandels geknüpft sind, ist dies also bei der Umrechnung in die zugehörigen Emissionsmengen mit verbleibenden Unsicherheiten verbunden.

10. Dagegen ist die atmosphärische Konzentration von Treibhausgasen, die sich einerseits in Emissionsmengen, andererseits in Temperaturveränderungen umrechnen lässt, sehr genau messbar. Sie stellt daher in der Wissenschaft insbesondere für die Berechnungen des IPCC neben dem damit verbundenen Strahlungsantrieb eine zentrale Rechengröße dar (IPCC 2018b; STEFFEN et al. 2015). Die atmosphärische Konzentration von Treibhausgasen wird jedoch nicht nur von menschlichen Emissionen beeinflusst, sondern auch von Rückwirkungen im Erdsystem, die sich darauf auswirken, wie Treibhausgase von der Atmosphäre aufgenommen und abgegeben werden. Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für die Änderung der Energiebilanz des Erdsystems als

Reaktion auf eine externe Störung, wobei ein positiver Strahlungsantrieb zu einer Erwärmung, ein negativer Strahlungsantrieb zu einer Abkühlung führt (SOLOMON et al. 2007, S. 21). Ein Beispiel für eine solche Störung ist eine erhöhte atmosphärische Treibhausgas-konzentration.

Aus klimapolitischer Perspektive ist die absolute Menge an maximal noch emittierbaren Treibhausgasen eine geeignete Größe, um Reduktionsfortschritte zu bewerten, da sie an der Ursache ansetzt (IPCC 2013; ROCKSTRÖM et al. 2017; WBGU 2009). Setzt man sie in Bezug zu den Emissionen in einem Basisjahr oder -zeitraum, so ergeben sich prozentuale Reduktionsziele.

Das Paris-kompatible CO₂-Budget als Grundlage von Klimapolitik

11. Auf diesem klimaphysikalischen Zusammenhang zwischen kumulierten CO₂-Emissionen und Temperaturerhöhung basiert der Ansatz des CO₂-Budgets. Da ein linearer Zusammenhang besteht, kann das zur Einhaltung eines Temperaturziels verfügbare CO₂-Budget mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung verbunden werden. Auf diese Weise kann es unter

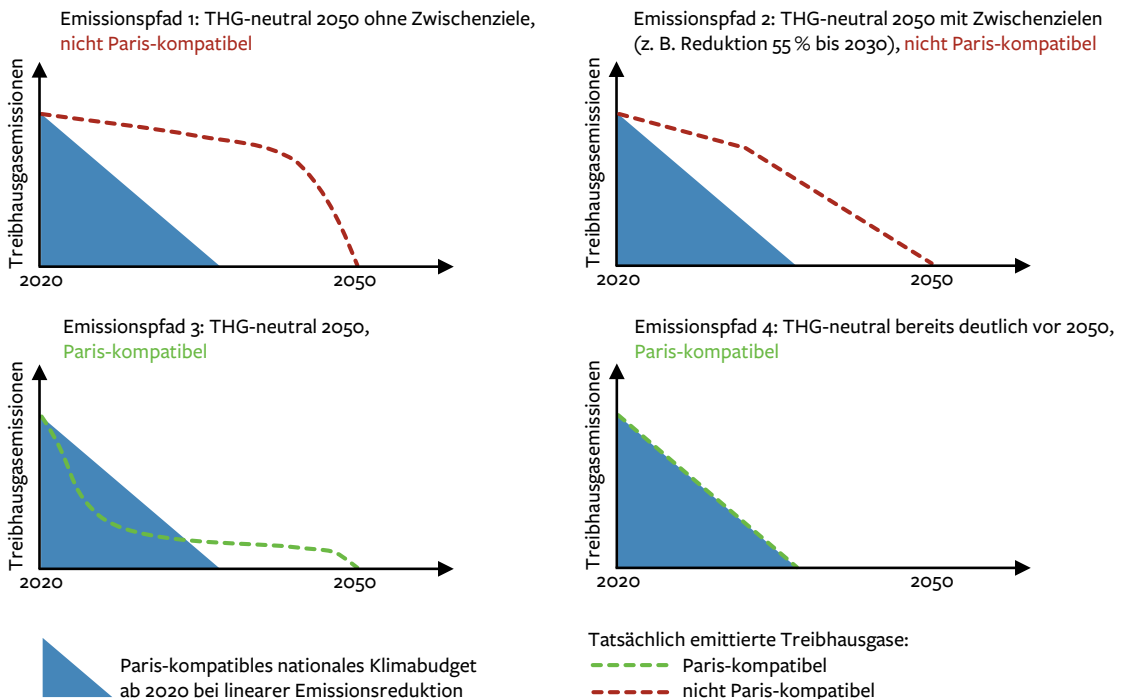
Einbezug der Unsicherheiten als belastbare Messgröße dienen.

12. Treibhausgasbudgets spielen in der Formulierung und Operationalisierung nationaler und europäischer Klimaziele zunehmend eine Rolle (s. Kasten 2-1). Zusätzlich bestehen prozentuale Reduktionsziele jährlicher Treibhausgasemissionen gegenüber einem Basisjahr (z. B. dem Jahr 1990). Auf europäischer Ebene wird im Rahmen des European Green Deals aktuell über die Umsetzung eines Treibhausgasneutralitätsziels für das Jahr 2050 diskutiert.

Prozentuale Reduktionsziele leiten sich von der Höhe der bisherigen jährlichen Emissionen ab. Wie Zieljahre für die Treibhausgasneutralität berücksichtigen sie aber nicht die akkumulierte Menge der künftigen – wenn auch sukzessive reduzierten – jährlichen Emissionen. Diese politischen Steuerungsansätze sind ohne entsprechende Zwischenziele nicht aussagekräftig, um eine Beurteilung des nationalen oder europäischen Beitrags zur Einhaltung der Pariser Klimaziele vornehmen zu können. Ein Gedankenspiel macht dies deutlich: Würde Deutschland beispielsweise erst 2045 damit beginnen, Treib-

o Abbildung 2-2

Emissionspfade zur Einhaltung der Pariser Klimaziele in Deutschland (schematisch)



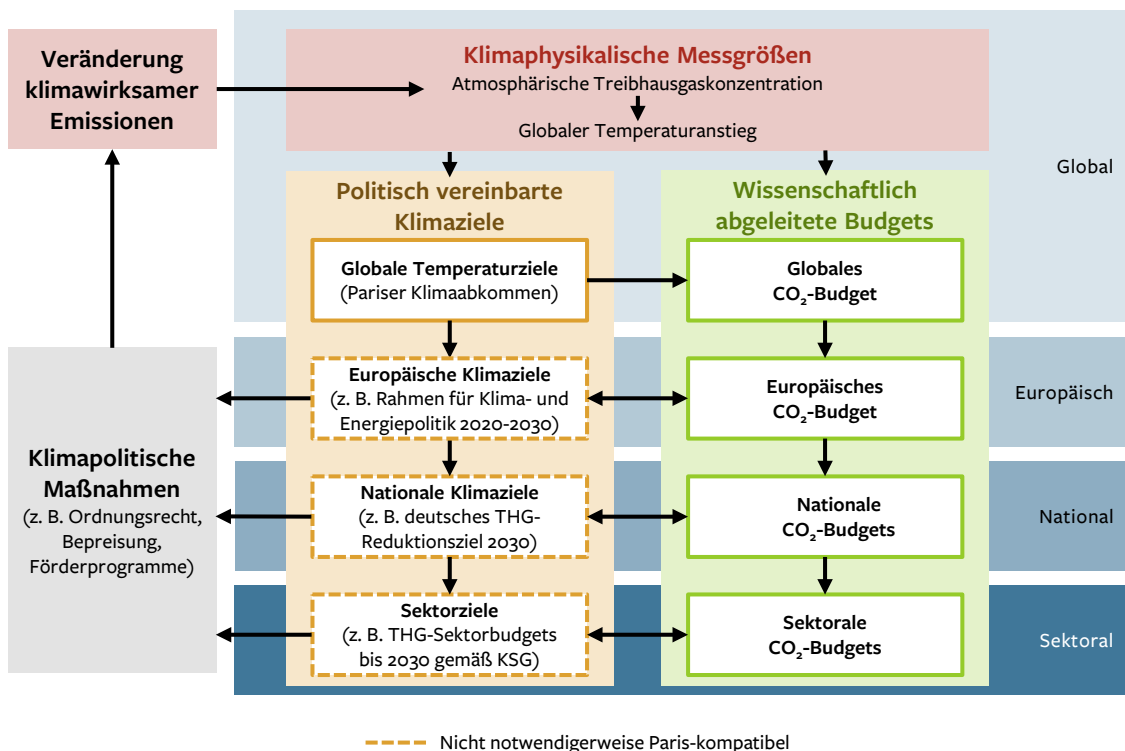
hausgase bis 2050 auf null zu reduzieren, so läge die Menge der insgesamt ausgestoßenen Treibhausgase deutlich über dem Deutschland zustehenden Treibhausgasbudget (Abb. 2-2, Emissionspfad 1; zum deutschen CO₂-Budget s. Tz. 33). Auch eine schrittweise Reduktion der Treibhausgasemissionen würde nicht notwendigerweise zur Einhaltung des Budgets führen (Abb. 2-2, Emissionspfad 2). Für eine Paris-kompatible, entsprechend rechtzeitige Senkung der Treibhausgasemissionen (Abb. 2-2, Emissionspfad 3 und 4) ist nicht allein der Zeitpunkt der Treibhausgasneutralität entscheidend, sondern die über den relevanten Zeitraum hinweg von allen Sektoren insgesamt emittierte Menge an Treibhausgasen.

Sektor- und jahresspezifische Treibhausgasbudgets, wie im Bundes-Klimaschutzgesetz festgelegt, sind daher grundsätzlich zu begrüßen. Um beurteilen zu können, ob die sich daraus ergebenden Emissionsreduktionspfade bis zur Treibhausgasneutralität einen angemessenen Beitrag zum Pariser Klimaabkommen leisten, bedarf es aber eines Abgleichs mit einem klimaphysikalisch begründeten Paris-kompatiblen CO₂-Budget.

13. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass europäische, nationale und regionale Klimaschutzziele so gewählt werden sollten, dass sie sich eindeutig auf das globale Temperaturziel beziehen lassen. Vor diesem Hintergrund empfiehlt der SRU die Überprüfung der Ziele mithilfe des Paris-kompatiblen CO₂-Budgets. Es kann auf unterschiedlichen Ebenen als Grundlage für die Klimapolitik eingesetzt werden (Abb. 2-3). Das globale CO₂-Budget besitzt eine klimaphysikalische Grundlage, da die Wirkung der Emissionen auf die globale Erwärmung bekannt ist. Es ist anschlussfähig an bestehende politische Steuerungsinstrumente wie den EU ETS sowie die Treibhausgasbudgets der EU-Klimaschutzverordnung (Tz. 88) und des deutschen Bundes-Klimaschutzgesetzes (Tz. 97) und kann auf eine beliebige Ebene skaliert werden (z. B. Sektoren, Unternehmen, Personen). Zudem lassen sich jahresspezifische Reduktionspfade für die absolute Emissionsmenge etablieren, die insgesamt dem nationalen CO₂-Budget zur Einhaltung der Pariser Klimaziele entsprechen. Hierbei ist zu beachten, dass das europäische und nationale CO₂-Budget sowie die sektoralen Budgets aus dem

o **Abbildung 2-3**

Das CO₂-Budget als Grundlage bestehender Klimaziele auf verschiedenen Ebenen



globalen CO₂-Budget auf der Basis auch normativer Überlegungen zur gerechten internationalen Lastenteilung und dem akzeptablen Risiko der Zielüberschreitung abgeleitet werden (Abschn. 2.2.2).

2.2.2 Einflussfaktoren auf die Berechnung des CO₂-Budgets

14. Um das globale Paris-kompatible CO₂-Budget zu bestimmen, müssen verschiedene methodische und normative Annahmen getroffen werden. Zudem spielen komplexe Einflussfaktoren eine Rolle. Im Folgenden wird zum besseren Verständnis ein Überblick über die Faktoren gegeben, welche die Berechnung und die Höhe des Budgets beeinflussen und daher zu verschiedenen Budgetgrößen führen können (s. a. ROGELJ et al. 2019).

Definition des CO₂-Budgets

15. *Beginn des Zeitraums:* CO₂-Budgets werden auf festgelegte Startpunkte bezogen, zum Beispiel die vorindustrielle Zeit oder ein bestimmtes Jahr (Tz. 29). Diese Zeitpunkte werden in verschiedenen Berichten nicht einheitlich gesetzt, was den direkten Vergleich der jeweils resultierenden Budgetzahlen erschwert und zu scheinbar verschiedenen Zahlenangaben führt (ROGELJ et al. 2019). Weiterhin ist zwischen dem verbleibenden CO₂-Budget ab einem definierten Zeitpunkt und dem im Verlauf jeweils aktuell noch verbleibenden Restbudget zu unterscheiden.

Einhaltung oder vorübergehende Überschreitung des Klimaziels: Budgetansätze unterscheiden sich dahingehend, ob der Budgetwert in einem Business-as-usual-Szenario für den Zeitpunkt der Überschreitung des maximal erlaubten Temperaturanstiegs ermittelt wird („Threshold Exceedance Budgets“) oder aus einem Verlauf, bei dem die Zieltemperatur knapp erreicht, aber nie überschritten wird („Threshold Avoidance Budgets“, s. ROGELJ et al. 2016b, S. 247; PETERS 2016). Grenzüberschreitungsbudgets umfassen auch Szenarien, die ein zeitweises Übertreffen des Temperaturziels erlauben, bevor die Temperatur wieder leicht absinkt und sich stabilisiert (RAHMSTORF 2017, S. 378 f.; ROGELJ et al. 2016b, S. 247). Generell sind die Budgets, die eine temporäre Überschreitung des Klimaziels zulassen, größer als solche, die diese vermeiden.

Unsicherheiten und Unterschiede bei der Berechnung des CO₂-Budgets

16. *Unterschiede in der Methodik der Bewertungsmodelle:* Die verwendeten Modelle zur Berechnung der CO₂-Budgets unterscheiden sich hinsichtlich der Modellierungs-

ansätze und dem Detailgrad und können zu unterschiedlichen Abschätzungen des Budgets führen (ROGELJ et al. 2016b, S. 248). Im Wesentlichen sind zwei sehr verschiedene Modelltypen in der Literatur vertreten:

- Erdsystemmodelle simulieren physikalische und biogeochemische Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre, den Landoberflächen der Erde und den Ozeanen und die aus vorgegebenen Emissionspfaden resultierenden mittleren Erwärmungswerte. Sie simulieren insbesondere den Kohlenstoffkreislauf der Erde und berücksichtigen verschiedene Rückkopplungseffekte im Erdsystem, welche die aus Emissionen resultierende Temperaturerhöhung beeinflussen.
- Integrierte Bewertungsmodelle (Integrated Assessment Models – IAMs) sind energie- und technologie-ökonomische Berechnungsmodelle, welche kostengünstige Pfade zur Einhaltung von Klimazielen und die zugehörigen Emissionsreduktionspfade berechnen. Dafür sind die ökonomischen Modelle mit vereinfachten Klimamodellen gekoppelt, welche meist keine räumliche Auflösung haben, aber die Erwärmung der Erde infolge von Treibhausgasemissionen adäquat wiedergeben. Die Modelle sind makroökonomisch meist in einer Anzahl von Weltregionen differenziert und können in ihre Evaluierung einzelne geophysikalische Randbedingungen einbeziehen.

Daneben können anstatt oder in Ergänzung zu modellierten Werten auch Daten über den beobachteten Verlauf der Erderwärmung und einige andere relevante Erdsystemgrößen verwendet werden. Dadurch kann die aus Modellen beobachtete Entwicklung näher eingegrenzt werden. Da jedoch auch Beobachtungsdaten regelmäßig Unsicherheiten aufweisen, wirken diese ebenfalls auf die Quantifizierung des Budgets (ROGELJ et al. 2019). Insbesondere sind Beobachtungsdaten oft nicht hinreichend flächendeckend oder stehen nicht über einen ausreichend langen Zeitraum zur Verfügung, um diese Unsicherheiten entscheidend zu reduzieren. Aus diesem Grund liefert die Einbeziehung von Beobachtungsdaten nicht zwingend ein besseres Ergebnis gegenüber der Analyselogik der numerischen Prozessmodelle. Belastbare Budgets entstehen aus der Zusammenschau aller Erkenntnisse, wie sie unter anderem der IPCC in seinen Sachstands- und Sonderberichten vornimmt.

Klimakühlender Effekt von Aerosolen: Aerosole sind Schwebeteilchen, die sich in verschiedenen Luftschich-

ten befinden und dort klimawirksam sind, wie zum Beispiel Mineralstaub, Rußpartikel, Meersalz oder organische Teilchen. Sie wirken auf die Temperatur teils erwärmend (insb. Rußpartikel), in der Summe überwiegend aber abkühlend (insb. Schwefeloxide). Vom Menschen emittierte Aerosole kompensieren schon heute einen Teil der Erderwärmung (RAMANATHAN und FENG 2008). Deshalb hängt die zukünftige Erderwärmung auch von der Entwicklung der anthropogenen Aerosolemissionen ab. Die genaue Bestimmung der Aerosolwirkung ist ebenso mit wissenschaftlichen Unsicherheiten verbunden wie deren künftige Entwicklung, zumal eine flächendeckende Abschätzung der Aerosollast nicht einfach ist. Auch diese Faktoren tragen zu Unsicherheiten bei der Bestimmung des Budgets bei (MYHRE et al. 2017, S. 2710 ff.).

Feedback-Effekte im Erdsystem: Klimaveränderungen haben Rückkopplungen im Erdsystem zur Folge, welche die Temperaturveränderung stärken oder abmildern können. Ein Beispiel hierfür ist die Wolkenbildung, ein weiteres ist der Kohlenstoffkreislauf, in dem der Kohlenstoff zwischen der Atmosphäre, dem Ozean und der Landbiosphäre ausgetauscht wird und dessen natürlicher Ablauf durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie durch Landnutzung gestört wird (LE QUÉREÉ et al. 2018). Da Rückkopplungen miteinander interagieren und teils komplexe, räumlich differenzierte Prozesse beteiligt sind, ist es nur mit Unsicherheit möglich, deren Effekt auf die Temperaturänderung abzuschätzen (IPCC 2018b, S. 2-16 f.). So gibt der neueste Sonderbericht des IPCC zum 1,5°-Ziel (SR1.5) Zahlen zum Kohlenstoffbudget für eine gegebene Temperaturerhöhung an. Der Bericht erwähnt jedoch, dass solche Feedbacks, insbesondere auch aus sich verändernden Eigenschaften des Permafrosts der nördlichen Breiten, die tatsächliche Größe der Budgets um circa 100 Gt CO₂ weiter mindern könnten (IPCC 2018b, Tab. 2.2).

Einbezug theoretischer künftiger CO₂-Extraktionen aus der Atmosphäre (sog. negative Emissionen): Die Größe des globalen CO₂-Budgets ist auch von Annahmen zur zukünftigen Rolle sogenannter negativer Emissionstechnologien und -praktiken abhängig (PETERS 2018a). Die meisten Emissionsreduktionspfade zur Erreichung der Klimaziele sehen sie in großem Umfang vor (s. Abschn. 2.3.3). Die meisten Optionen für negative Emissionen sind derzeit mit großen Unsicherheiten behaftet und bringen größtenteils erhebliche Zielkonflikte, beispielsweise mit der Nahrungsmittelerzeugung sowie dem Natur- und Artenschutz mit sich, oder beinhalten erhebliche finanzielle oder energetische Kosten. Auch sind wirksame Verfahren noch nicht

operationell verfügbar (FUSS et al. 2018). Aus diesen Gründen spielt die Anwendung von negativen Emissionstechnologien zur Erweiterung des CO₂-Budgets im Folgenden nur eine geringe Rolle.

Normative Entscheidungen zum Ambitionsniveau und zur Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung

17. Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung und Wahl des Temperaturziels: Die Ableitung der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen sowie der daraus resultierenden globalen Temperaturentwicklung aus den seit einem Bezugsjahr emittierten CO₂-Emissionen ist mit Unsicherheiten behaftet (Tz. 9). Daher wird in der wissenschaftlichen Praxis einerseits mit mittleren Werten gearbeitet, andererseits werden Korridore für das verbleibende Budget ausgewiesen. Je nachdem, wie sicher die Zielerreichung gewährleistet sein soll, muss von größeren oder kleineren Werten der Klimasensitivität, also der Reaktion des Klimasystems auf Änderungen in der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration, ausgegangen werden. Dies entspricht einer größeren bzw. kleineren Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung, wenn das Budget eingehalten wird. Daher wird die Einhaltung eines bestimmten Temperaturanstieges unter der Angabe von Wahrscheinlichkeiten berechnet. Der IPCC betrachtet Wahrscheinlichkeiten von 33, 50 und 67 % jeweils für Temperaturanstiege von 1,5 °C und 2 °C, für die das Budget berechnet werden kann, sodass sich allein aus der Kombination dieser Zielsetzungen sechs Berechnungsmöglichkeiten ergeben (IPCC 2018b). Die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die Temperaturziele eingehalten werden sollen, stellen eine normative Entscheidung dar. Das Erreichen des 1,5°-Ziels wird normalerweise mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % angegeben, das 2°-Ziel wird mit 67 %, also mit einer Zwei-Drittel-Wahrscheinlichkeit beschrieben. In beiden Fällen bleibt ein erhebliches Risiko einer Überschreitung des Temperaturziels trotz Einhaltung des Budgets bestehen. Im Folgenden werden CO₂-Budgets vorgestellt, die das gewählte Temperaturziel mit hoher Wahrscheinlichkeit erreichen. Dies entspricht auch dem verfassungsrechtlich vorgegebenen Vorsorgeprinzip (SRU 2019).

18. Aufgrund dieser Faktoren können ermittelte Größen des CO₂-Budgets voneinander abweichen. In der Wissenschaft werden deshalb auch Spannbreiten für das Budget ausgewiesen, welche diese Einflussfaktoren und Unsicherheiten abbilden. Für politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger sowie die öffentliche Diskussion wird jedoch oftmals ein einzelner Wert als Orientierung bzw. Leitlinie kommuniziert. Wird dieser Wert als Grundlage für weitere Entscheidungsprozesse

se verwendet, muss stets berücksichtigt werden, dass aufgrund der Unsicherheiten das tatsächliche Budget abweichen kann. Auch kann wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn im Laufe der Zeit zu einer Anpassung der Budgetwerte führen, wenngleich keine allzu tiefgreifende Revision des bestehenden Kenntnisstandes zu erwarten ist. Da das verbleibende Restbudget mit fortschreitender Zeit sinkt, die Unsicherheiten aber absolut gleich groß bleiben, nimmt der relative Einfluss der Unsicherheiten zu (PETERS 2018b; SCHLEUSSNER et al. 2018, S. 1).

2.2.3 Größe des globalen CO₂-Budgets

19. Eine erste breiter diskutierte Abschätzung des globalen CO₂-Budgets wurde 2009 im Jahr der 15. UN-Klimakonferenz der Vertragsparteien des UNFCCC in Kopenhagen (COP 15) vorgestellt (ALLEN et al. 2009) und im selben Jahr in Deutschland auch vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen empfohlen (WBGU 2009). Der Fünfte Sachstandsbericht des IPCC aktualisierte die Zahlen im Jahr 2013 (IPCC 2013).

20. Die derzeit aktuellsten Berechnungen im IPCC-Sonderbericht SR1.5 aus dem Jahr 2018 ermitteln ein im Vergleich dazu etwas höheres Budget (IPCC 2018b). Das globale CO₂-Budget ab dem Jahr 2018 für die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C wird für eine 50%ige Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung auf 580 Gt CO₂ und für eine 67%ige Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung auf 420 Gt CO₂ beziffert (Tab. 2-1). Soll der Temperaturanstieg mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 %

deutlich unter 2 °C bleiben (hier rechenmäßig interpretiert als 1,75 °C und damit die Mitte zwischen 1,5 °C und 2 °C), beträgt das globale Budget 800 Gt CO₂ ab 2018. Bleibt die derzeitige Emissionsrate von ungefähr 42 Gt CO₂ pro Jahr bestehen, so wäre dieses CO₂-Budget im Jahr 2037 aufgebraucht.

21. Die höheren CO₂-Budgets des IPCC-Sonderberichts zum 1,5°-Ziel basieren auf einer in mehreren Punkten veränderten und teilweise erweiterten Bewertung. Insbesondere werden nun zusätzlich zu den Ergebnissen der Klimamodellierung auch beobachtete Daten zum realen Verlauf der Erderwärmung in die Auswertung einbezogen. Im Fünften Sachstandsbericht zeigten die Klimamodelle als Funktion der kumulativen Emissionsmenge einen linearen Temperaturanstieg, der jedoch oberhalb der realen Temperaturentwicklung verlief. Daher berücksichtigt der Sonderbericht den realen Temperaturverlauf im Zeitraum zwischen 2005 bis 2016 als Ausgangspunkt. Die Einordnung des realen in den längerfristigen Temperaturverlauf ist noch unsicher, sodass die Größe des verbleibenden CO₂-Budgets für die Erreichung der Pariser Klimaziele weiterhin Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion bleibt und mittelfristig weiteren Aktualisierungen unterliegen könnte (ROGELJ et al. 2019; FUJIMORI et al. 2019). An den grundsätzlichen Aussagen zur Größenordnung des CO₂-Budgets zur Einhaltung der Pariser Klimaziele ändert dies jedoch vergleichsweise wenig.

22. Die Größe des globalen CO₂-Budgets ist wesentlich davon abhängig, welches Temperaturziel zugrunde gelegt wird (Tz. 17; Tab. 2-1). Das Pariser Klimaabkommen verschob die frühere Zielmarke von „unter 2 °C“ (SCHLEUSSNER et al. 2016). Die Vertragsstaaten verpflichten sich

o **Tabelle 2-1**

Globale CO₂-Budgets aus dem IPCC-Sonderbericht

Erderwärmung in °C	Verbleibendes CO ₂ -Budget (ohne zusätzliche Rückwirkungen im Erdsystem) in Gt CO ₂ ab 01.01.2018	
	50 % Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung	67 % Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung
1,5	580	420
1,75	1.040	800

SRU 2020; Datenquelle: IPCC 2018b, Tab. 2.2

in Art. 2 Abs. 1 lit. a des Abkommens dazu, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf „deutlich unter 2 °C“ („well below“) gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen sowie Anstrengungen zu unternehmen, die Erwärmung auf 1,5 °C zu beschränken. Art. 4 Abs. 1 legt fest, dass die Vertragsstaaten so bald wie möglich den Scheitelpunkt ihrer Treibhausgasemissionen erreichen und danach rapide Emissionssenkungen anstreben. Dies soll im Einklang mit den besten verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnissen erfolgen, was die Anwendung von CO₂-Budgets nahelegt. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts soll es einen Ausgleich zwischen anthropogenen Treibhausgasemissionen und -senken geben, also Treibhausgasneutralität erreicht werden.

Welche Temperaturobergrenze sich aus diesen Vorgaben ergibt, ist nicht ganz eindeutig. Teilweise wird aus der besagten Formulierung des Pariser Klimaabkommens gefolgert, dass das 1,5°-Ziel rechtsverbindlich zu erreichen sei (EKARDT 2018). Überwiegend wird in Anbetracht des Wortlauts, der ausdrücklich eine Begrenzung auf deutlich unter 2 °C festlegt und (lediglich) Anstrengungen zur Begrenzung auf 1,5 °C verlangt, eine Abstufung der Verpflichtungen der Vertragsstaaten vorgenommen (BODANSKY 2016; RAJAMANI und WERKSMAN 2018). Der Wortlaut des Art. 2 Abs. 1 lit. a des Pariser Klimaabkommens ist aufgrund seiner Unbestimmtheit letztlich beiden Auslegungen zugänglich: Das 1,5°-Ziel kann sowohl als Obergrenze angesehen werden, die von vornherein nicht überschritten werden soll, oder als Langfristziel, das nach einer vorübergehend zulässigen höheren Erwärmung (die allerdings deutlich unter 2 °C bleiben muss) anzustreben ist (MACE 2016). In jedem Fall aber kann dem Wortlaut die Aussage entnommen werden, dass Anstrengungen zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C unternommen werden müssen. Nicht zuletzt legt das in Art. 2 Abs. 2 des Pariser Klimaabkommens angeführte Prinzip der „gemeinsamen aber unterschiedlichen Verantwortung“ nahe, dass gerade von den Industriestaaten besondere Anstrengungen bei der Begrenzung der maßgeblich von ihnen mitverursachten Klimaerwärmung zu erwarten sind. In eine ähnliche Richtung weist Art. 4 Abs. 1, indem anerkannt wird, dass Entwicklungsländer noch Zeit benötigen, um ihr Emissionsmaximum zu erreichen. Die Industriestaaten sollten ihre Emissionen hingegen zeitnah reduzieren (Art. 4 Abs. 4).

Der IPCC-Sonderbericht zum 1,5°-Ziel liefert die wissenschaftliche Begründung dafür, warum zu erwartende Klimafolgen und damit auch der notwendige Anpassungsbedarf bei einer Erderwärmung von 1,5 °C im Vergleich zu 2 °C deutlich geringer ausfallen. So wird projiziert,

dass Risiken regionaler Wetterextreme, der Meeresspiegelanstieg, das Eintreten von Kippunkten im Erdsystem, Risiken für die Ökosysteme, Gesundheit, Ernährungssicherheit, Wasserverfügbarkeit, Sicherheit und Wirtschaftswachstum bei einer Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C in bedeutend geringerem Maße eintreten (IPCC 2018a). Das 1,5°-Ziel wird auch von Seiten der Zivilgesellschaft und gestützt durch die Wissenschaft vermehrt in den Fokus gerückt (Fridays for Future 2019; HAGEDORN et al. 2019).

Aus der Zusammenschau dieser Argumente ergibt sich für die Wahl des Temperaturziels als Grundlage für die Budgetberechnung folgende Überlegung: Das Ziel von „deutlich unter 2 °C“, also beispielsweise 1,75 °C, muss erreicht werden. Auch wenn Emissionspfade eingehalten werden, die eine maximale Erderwärmung von 1,75 °C bis 2050 wahrscheinlich gewährleisten, bleibt weiterhin die Verpflichtung bestehen, Anstrengungen für eine Begrenzung des Temperaturanstiegs auf höchstens 1,5 °C zu unternehmen. Das 1,5°-Ziel könnte daher als Langfristziel des Pariser Klimaabkommens verstanden werden (SCHLEUSSNER et al. 2016). Daher sollten direkt Emissionspfade angestrebt werden, die dieses Ziel erreichen. Alternativ kommt es zu einer temporären Überschreitung des Ziels, die nur durch Maßnahmen zur Temperaturreduktion ausgeglichen werden kann. Sowohl Emissionspfade zur Erreichung des 1,5°-Ziels als auch die langfristige Absenkung der globalen Temperatur bedingen großskalige negative Emissionstechnologien und -praktiken, die derzeit noch nicht zur Verfügung stehen (s. Abschn. 2.3.3).

23. Insgesamt ist in der Wissenschaft unbestritten, dass das verbleibende Restbudget knapp ist und nur eine kurze Zeitspanne verbleibt, um die Emissionen weltweit auf ein Netto-Null-Niveau zu senken und damit Treibhausgasneutralität zu erzielen (IPCC 2018b; ROCKSTRÖM et al. 2017). Der Handlungsdruck ist dementsprechend groß. Bestehende Unsicherheiten rechtfertigen keine politische Inaktivität (UNEP 1992, S. 3; HILLERBRAND 2009, S. 95). Angesichts der Folgen des Klimawandels muss unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten ein Budget bestimmt werden, das dem Vorsorgeprinzip entspricht und das als Grundlage für politische Entscheidungen dient, auch um klimapolitische Fortschritte bewerten zu können.

24. Zusammenfassend kann ein restliches globales CO₂-Budget, das sich auf die Begrenzung der Temperaturerhöhung auf maximal 1,5 °C bezieht, gut begründet werden. Für eine 50 %ige Wahrscheinlichkeit der Ziel-

Erreichung beläuft sich dieses auf 580 Gt CO₂ ab 2018 (Tz. 20). Für die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,75 °C mit einer 67 %igen Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung beträgt es 800 Gt CO₂ ab dem Jahr 2018. Dieses kann als maximales Budget aus den Vorgaben des Pariser Klimaabkommens abgeleitet werden. Werden keine Emissionen reduziert und weiterhin jährlich 42 Gt CO₂ emittiert, so verbleibt ab dem Jahr 2020 ein CO₂-Budget von 716 Gt CO₂.

2.2.4 Das CO₂-Budget für Europa, Deutschland und nationale Sektoren

25. Für die Berechnung eines nationalen Anteils am verfügbaren globalen Gesamtbudget sind einige Festlegungen zu der Frage notwendig, welche Kriterien im internationalen Vergleich für den nationalen Anteil gerecht und angemessen sind.

2.2.4.1 Die Ableitung nationaler CO₂-Budgets im Sinne einer fairen Emissionsreduktion

26. Das Klimaabkommen von Paris fordert von jedem Land einen NDC, der einen „fairen Anteil am Reduktionsfortschritt“ darstellen soll. Mindestens fünf verschiedene Interpretationen zur Ableitung nationaler Budgets können begründet zugrunde gelegt werden (ROBIOU DU PONT et al. 2016; IPCC 2014, S. 458; HÖHNE et al. 2014). Sie haben deutlich unterschiedliche Auswirkungen auf die daraus resultierenden nationalen CO₂-Budgets. Ein nationales Budget kann aus dem globalen Budget auf folgender Basis abgeleitet werden:

- Bevölkerungszahl: die Reduktion von Emissionen erfolgt je nach aktueller oder projizierter Einwohnerzahl eines Landes auf der Basis gleicher verbleibender Emissionsrechte pro Kopf.
- Relative ökonomische Leistungsfähigkeit: Staaten mit höherer Wirtschaftskraft pro Kopf müssen Emissionen schneller reduzieren als solche mit geringerer Wirtschaftskraft.
- Historisch kumulativer Anteil pro Kopf: Zusätzlich zur Einwohnerzahl werden die historischen kumulativen Emissionen des Landes auf der Basis zeitübergreifender Nutzungsrechte der Atmosphäre zur CO₂-Deponierung einberechnet.

- Entwicklungsrechte („greenhouse development rights“): Um für andere Staaten mit bislang geringerem Entwicklungs- und Wohlstandsniveau fossilbasierte Entwicklungsmöglichkeiten innerhalb des verbleibenden globalen Budgets zu ermöglichen, müssen Staaten mit einem hohem Bruttoinlandsprodukt (BIP), hohen historischen und unter einem Business-as-usual-Szenario auch weiterhin hohen Emissionen stärker reduzieren.
- Konstanter Anteil von Emissionen: Die prozentuale Verteilung der Treibhausgase auf heutiger Basis zwischen den Staaten bleibt bei der Emissionsreduktion konstant („grandfathering“). Das bedeutet, dass Staaten mit hohen Emissionen unabhängig von Bevölkerungsgröße und Wohlstand weiterhin mehr ausstoßen dürfen als Staaten mit bisher geringeren Emissionen.

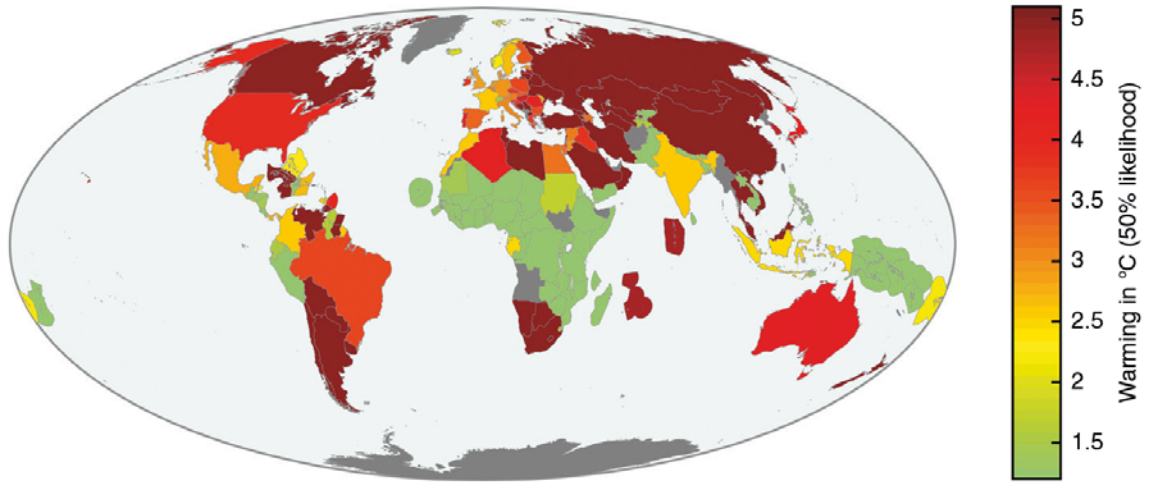
Wird das globale CO₂-Budget beispielsweise unter Vernachlässigung der historischen Emissionen in gleicher prozentualer Höhe auf Basis der Emissionswerte von 2014 verteilt, würden Europa 11 % zustehen, eine Verteilung pro Kopf würde dagegen einen Anteil von nur 6 % ergeben (RAUPACH et al. 2014).

Tatsächlich gaben im Rahmen der Umsetzung des Pariser Klimaabkommens viele Staaten durch diese unterschiedlichen Interpretationen im Resultat ein NDC an, dass für sie am wenigsten restriktiv erschien (ROBIOU DU PONT und MEINSHAUSEN 2018). Beispielsweise reichten viele Industriestaaten wie auch die EU der Logik eines konstanten Anteils von Emissionen folgend ihre klimapolitischen Ziele als prozentuale Emissionsreduktionsziele mit mäßigem Ambitionsniveau ein. Wenn alle Staaten das für sie eigennützigste und damit großzügigste Interpretationsmodell verfolgen, wie beispielsweise die EU, würde dies allerdings zu einer Erderwärmung von 3,2 °C führen (im Falle einer internationalen Übernahme des Interpretationsmodells von Indien: 2,6 °C; USA: 4 °C; China: 5,1 °C) (s. Abb. 2-4; ROBIOU DU PONT und MEINSHAUSEN 2018). Dennoch wird jeder einzelne Staat für sich argumentieren, dass der nationale Beitrag für die Einhaltung der Klimaziele angemessen und ausreichend ist.

27. Die in den NDCs formulierten Reduktionszusagen sind derzeit nicht ausreichend, um deren Effekt auf die Erderwärmung zu beziffern, da die meisten NDCs nur bis zum Jahr 2025 oder 2030 formuliert sind. Im Anschluss soll alle fünf Jahre im Rahmen des Mechanismus zur Ambitionssteigerung des Klimaabkommens von Paris

o **Abbildung 2-4**

Globale Erderwärmung infolge nationaler Interpretationen eines „fairen Anteils am Reduktionsfortschritt“



Die Karte zeigt die globale Erwärmung, wenn alle Staaten der Ambition eines bestimmten Staates folgen. Zugrunde gelegt werden drei Interpretationsmodelle von Verteilungsgerechtigkeit, die sich auf die Berücksichtigung historischer Emissionen, ökonomischer Leistungsfähigkeit und gleicher Emissionsrechte pro Kopf beziehen. Aus diesen drei Modellen wird jedem Staat das für sie großzügigste zugeteilt und so gezeigt, welche Erderwärmung dies zur Folge hat, wenn andere Staaten dieser Argumentation folgen würden.

Quelle: ROBIU DU PONT und MEINSHAUSEN 2018

(Ratcheting up Mechanism) eine erneute und ambitioniertere Zielfestlegung erfolgen. Um die Wirkung der derzeitigen und zukünftigen nationalen Reduktionsziele zu beziffern, müssen Emissionspfade auch über das Jahr 2030 hinaus abgeschätzt werden, da der Grad der Erderwärmung von den kumulativen Emissionen bis Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts oder darüber hinaus abhängt (ALLEN et al. 2009). Es gibt verschiedene Wege, kumulative Emissionspfade auch für die Zeit nach 2030 zu berechnen und dadurch Fortschritte in den nationalen Reduktionszusagen sichtbar zu machen (JEFFERY et al. 2018): Neben der Modellierung, beispielsweise mit IAMs (Tz. 16), eignet sich der Ansatz des CO₂-Budgets für die Evaluierung der NDCs. Werden nationale Anteile am globalen CO₂-Budget für jeden Staat abgeleitet, lassen sich die NDCs daran messen, ob sie im Einklang mit diesen Paris-kompatiblen nationalen CO₂-Budgets sind. Ein nationaler Beitrag, der gemessen am globalen Gesamtbudget unzureichend ist, bleibt angesichts des völkerrechtlich bindenden Bekenntnisses jedes Staates zu den Pariser Klimazielen sachlich und ethisch defizitär. Darüber hinaus ist in der Summe aller nationalen Budgets das globale CO₂-Budget einzuhalten.

2.2.4.2 Das CO₂-Budget für die EU und Deutschland ab 2020

28. Sowohl die EU als auch Deutschland haben Reduktionsziele und Maßnahmen zur Erreichung ihrer Klimaschutzziele festgelegt (Kap. 2.4). Um den Verpflichtungen aus dem Pariser Klimaabkommen gerecht zu werden und einen fairen Anteil an den notwendigen Emissionsreduktionen zu leisten, müssen diese Reduktionsziele und Maßnahmen im Einklang mit dem globalen CO₂-Budget (Abschn. 2.2.3) stehen.

Die Rolle historischer Emissionen

29. Deutschland hat einen höheren prozentualen Anteil an den historischen CO₂-Emissionen als beispielsweise die Staaten Afrikas und Lateinamerikas zusammen (Abb. 2-5). Die Auswirkungen des Klimawandels treffen dagegen in erheblichem Maße diejenigen Weltregionen, die zum einen wenig zum Klimawandel beigetragen haben und zum anderen aufgrund ihrer geringen Wirtschaftskraft nur begrenzte Möglichkeiten haben, sich an die Folgen anzupassen (World Bank 2013). Als ein technologisch führendes Industrieland mit einem hohen BIP und

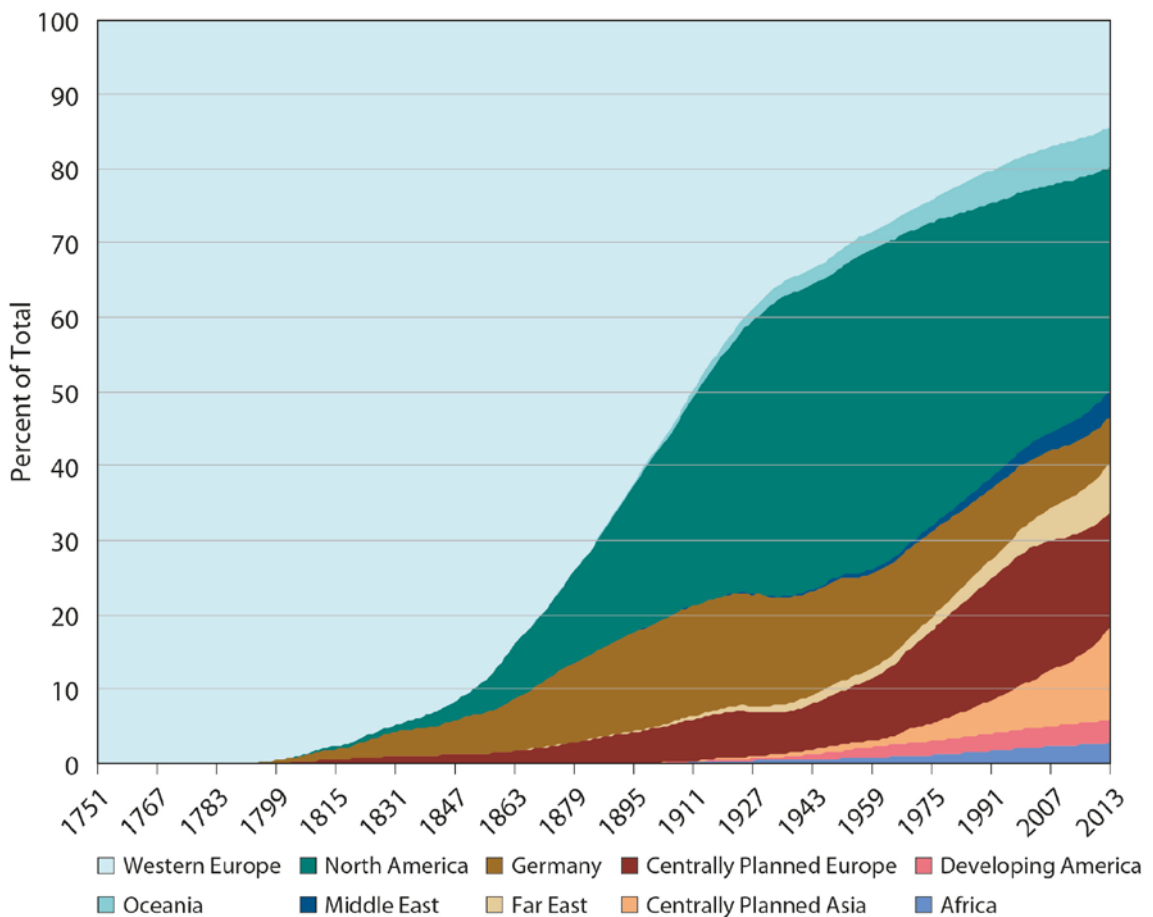
hohen historischen Emissionen sollte Deutschland daher bei der Transformation der Energieversorgung vorausgehen, seine national gesteckten Ziele eher früher als später erreichen und einen angemessenen Beitrag zu den Pariser Klimazielen leisten. Hierdurch erhalten Staaten mit geringerer Transformationskapazität größeren Spielraum und Deutschland kann als Vorreiter für andere Staaten die technologischen und ökonomischen Möglichkeiten des Übergangs demonstrieren (SRU 2016b, Kap. 1).

Bei der Verteilung des verbleibenden CO₂-Budgets auf einzelne Staaten bzw. Staatengemeinschaften ist die

Frage nach dem Beginn des Budgetzeitraumes zentral (Tz. 15). Als Beginn des Budgetzeitraumes könnte beispielsweise das Jahr 1990 gewählt werden, in dem der erste IPCC-Bericht die Staatengemeinschaft grundlegend über den Klimawandel informierte. In diesem Fall wären die auf Grundlage des Anteils an der Weltbevölkerung berechneten für die Zeit bis 2050 verfügbaren CO₂-Budgets sogar für eine maximale Erderwärmung von 2 °C bei einer 75%igen Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung beispielsweise für die USA, Deutschland und Russland bereits 2009 aufgebraucht gewesen (WBGU 2009, S. 25; MEINSHAUSEN et al. 2009).

o Abbildung 2-5

Kumulative historische CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger, Zementherstellung und Gasabfackelung



Quelle: MARCOTULLIO et al. 2018, S. 141, basierend auf BODEN et al. 2016

Die Rolle von Im- und Export

30. Üblicherweise werden Emissionen dem Staat zugerechnet, in dem ein Produkt hergestellt wird, auch wenn es für den Export bestimmt ist (Territorialprinzip). Damit können Staaten mit hohem Exportüberschuss argumentieren, dass sie in ihrer Emissionsbilanz benachteiligt werden. Insofern ist es sinnvoll, auch die Emissionsbilanz von Importen zu betrachten (Verbrauchsprinzip). Für Deutschland ist dieser Effekt allerdings gering: Im Jahr 2015 entfielen in Deutschland ungefähr 506 Mt CO₂ auf Importe und 579 Mt CO₂ auf Exporte (Statistisches Bundesamt 2019, S. 6). Damit gleichen sich beide Ströme weitgehend aus. Daher kann in der weiteren Betrachtung das Territorialprinzip für Deutschland angewandt werden. Für die EU ist dieser Effekt höher, verändert jedoch auch hier die Sachlage nicht grundlegend. Die CO₂-Emissionen nach dem Verbrauchsprinzip liegen um ungefähr ein Fünftel höher als die Berechnung nach dem Territorialprinzip (UNEP 2019a, S. 6, Abb. 2.4). Zugunsten der Einheitlichkeit wird im Folgenden auch bei der EU das Territorialprinzip zugrunde gelegt.

Ableitung eines Paris-kompatiblen CO₂-Budgets für die EU und Deutschland ab 2020

31. Wie oben dargestellt, bestehen prinzipiell fünf verschiedene Interpretationen, wie ein „fairer Anteil am Reduktionsfortschritt“ aussehen und damit das globale Budget auf die Staaten aufgeteilt werden kann (Tz. 26). Die EU und Deutschland haben in der Vergangenheit besonders stark zum Klimawandel beigetragen (Tz. 29). Unter den Industriestaaten hat sich jedoch weitestgehend die Position etabliert, dass die historischen Emissionen in den zukünftigen Bemühungen zum Klimaschutz keine Berücksichtigung finden sollen. Im internationalen Diskurs ist aber auch der Standpunkt anerkannt, dass aus Gründen der Verteilungsgerechtigkeit und um Entwicklungsrechte für Entwicklungs- und Schwellenländer zu gewährleisten, die Industriestaaten einen überdurchschnittlichen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten sollten. Deswegen wird der Ansatz vieler Industriestaaten, ihre NDCs in der Logik von „Grandfathering“ (Tz. 26) einzureichen, von Seiten der Entwicklungs- und Schwellenländer stark kritisiert.

32. Für die gut begründbare Ableitung eines Paris-kompatiblen CO₂-Budgets für die EU und Deutschland sollen folgende Annahmen getroffen werden. Werden zu eigenen Gunsten die historischen Emissionen und damit bereits akkumulierte „Klimaschulden“ bei Staaten mit geringeren Pro-Kopf-Emissionen vernachlässigt, sollte ein möglichst ambitioniertes Budget angenommen werden. Folglich sollte die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung mit 67 % statt mit 50 % angesetzt sowie ein Ziel von 1,5 °C

oder höchstens 1,75 °C als maximale Erwärmung festgelegt werden. Ein auf diesen Annahmen beruhendes CO₂-Budget impliziert noch immer eine Wahrscheinlichkeit von einem Drittel, dass das Ziel nicht erreicht wird, weil die Klimasensitivität des Erdsystems möglicherweise größer ist. Weiterhin soll hier ein gleiches Pro-Kopf-Emissionsrecht jeder Bewohnerin und jedes Bewohners der Erde angenommen werden, also der deutsche Anteil gemessen an der Weltbevölkerung zu einem gewählten Stichtag ermittelt werden. Zu beachten ist, dass dieser Anteil sich aufgrund einer schrumpfenden deutschen Bevölkerung sowie einer insgesamt wachsenden Weltbevölkerung in Zukunft sogar noch verringern und zu einem kleiner werdenden Budget führen würde, wenn er der Bevölkerungsentwicklung angepasst würde.

33. Daneben soll hier der Zeitpunkt als Beginn der globalen Budgetberechnung gewählt werden, an dem das Pariser Klimaabkommen geschlossen wurde. Das globale CO₂-Budget wird hier vereinfachend ab Januar 2016 auf die Staaten verteilt und das verbleibende Budget für die EU und Deutschland ab 2020 vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen abgeleitet (s. Kasten 2-2). Unter Vernachlässigung der historischen Emissionen und auf Grundlage des Anteils der deutschen Bevölkerung an der Weltbevölkerung im Jahr 2016 ergibt sich für Deutschland ein maximales Paris-kompatibles CO₂-Budget von 6,7 Gt CO₂ ab 2020. Würden weiterhin wie im Jahr 2019 jährlich 0,71 Gt CO₂ ausgestoßen, so wäre das verfügbare Budget bereits 2029 aufgebraucht. Dieses CO₂-Budget kann als gut begründete, Paris-kompatible Obergrenze angesehen werden. Der SRU empfiehlt aus den folgenden Gründen, ein ambitioniertes CO₂-Budget als Maßstab zugrunde zu legen, an dem sich Ziele und Maßnahmen zum Klimaschutz in Deutschland messen müssen:

- Art. 4 Abs. 3 des Pariser Klimaabkommens legt fest, dass die einzureichenden Klimaschutzbeiträge die „höchstmögliche Ambitionsstufe“ ausdrücken sollen („reflect its highest possible ambition“).
- Angesichts schwerwiegender Klimafolgen ist es außerdem geboten, das Vorsorgeprinzip anzuwenden. Zum erhöhten Risiko tiefgreifender Erdsystemänderungen ist unbedingt ein Sicherheitsabstand einzuhalten (SRU 2019).

Unabhängig davon besteht aus dem Pariser Klimaabkommen die fortwährende Verpflichtung, Anstrengungen zu unternehmen, die Temperaturgrenze von 1,5 °C einzuhalten. Je früher die Emissionen reduziert werden, desto

Kasten 2-2: Berechnung eines Paris-kompatiblen CO₂-Budgets ab 2020 für die EU-28 und Deutschland

Für die EU inklusive dem Vereinigten Königreich (fortfolgend EU-28) ergibt sich ein maximales Paris-kompatibles CO₂-Budget von 47,2 Gt CO₂ ab 2020, für Deutschland 6,7 Gt CO₂. Der Berechnungsbeginn ist 2016 (Referenzzeitpunkt: Pariser Klimaabkommen von Ende 2015). Historische Emissionen werden vernachlässigt.

1. Schritt:

- Globales CO₂-Budget ab 2018 mit einer 67 %igen Wahrscheinlichkeit, deutlich unter 2 °C (1,75 °C) zu bleiben: 800 Gt CO₂ (IPCC 2018b). Diese Zahl erreicht das 1,5°-Ziel mit etwas mehr als einem Drittel Wahrscheinlichkeit und eine Temperatur von etwa 1,65 °C mit 50 % Wahrscheinlichkeit.

2. Schritt:

- Berechnung des globalen CO₂-Budgets ab 2016 durch Addition der CO₂-Emissionswerte 2016 und 2017, die jeweils 41 Gt CO₂ betragen (FRIEDLINGSTEIN et al. 2019):
 $800 \text{ Gt CO}_2 + (2 \times 41 \text{ Gt CO}_2) = 882 \text{ Gt CO}_2$.

3. Schritt:

- Berechnung des Paris-kompatiblen CO₂-Budgets für die EU-28 gemäß einem Anteil an der Weltbevölkerung von derzeit 7 % (Eurostat 2018):
 $882 \text{ Gt CO}_2 \times 0,07 = 61,7 \text{ Gt CO}_2$ (ab 2016).
- Berechnung des Paris-kompatiblen deutschen CO₂-Budgets gemäß einem Anteil an der Weltbevölkerung von derzeit 1,1 %:
 $882 \text{ Gt CO}_2 \times 0,011 = 9,7 \text{ Gt CO}_2$ (ab 2016).

4. Schritt:

- Berechnung des CO₂-Budgets für die EU-28 ab 2020: 2016 wurden in der EU 3,6 Gt CO₂ emittiert und 2017 3,7 Gt CO₂ (EEA 2019a). Für 2018 und 2019 wird die Emissionshöhe von 2017 angenommen.
- CO₂-Budget für die EU-28 für 1,75 °C (67 %):
 $61,7 \text{ Gt CO}_2 - (3,6 \text{ Gt CO}_2 + 3 \times 3,7 \text{ Gt CO}_2) = 47,0 \text{ Gt CO}_2$ ab 2020.
- Das CO₂-Budget für die EU-28 wäre damit bei gleichbleibenden Emissionen im Laufe des Jahres 2032 verbraucht (47,0 Gt CO₂/3,7 Gt CO₂ = 12,7 Jahre von 2020 an). Bei linearer jährlicher Reduktion der Emissionen wäre dieses Budget im Jahr 2045 verbraucht.

Die analoge Berechnung für eine 50%-Wahrscheinlichkeit, das 1,5°-Ziel zu erreichen, ergibt ein CO₂-Budget für die EU-28 von 31,6 Gt CO₂ ab 2020. Es wäre bei gleichbleibenden Emissionen im Jahr 2028 verbraucht, bei linearer Reduktion der Emissionen im Jahr 2037.

- Berechnung des deutschen CO₂-Budgets ab 2020: Deutschland emittierte 801 Mt CO₂ im Jahr 2016, 787 Mt CO₂ im Jahr 2017, 755 Mt CO₂ im Jahr 2018 (UBA 2020) und voraussichtlich 706 Mt CO₂ im Jahr 2019 („Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück. Große Minderungen im Energiesektor, Anstieg im Gebäudesektor und Verkehr“, Gemeinsame Pressemitteilung des Umweltbundesamtes und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit vom 16. März 2020). Insgesamt ergeben die Emissionen von 2016 bis 2019 rund 3.049 Mt CO₂.
- CO₂-Budget für Deutschland für 1,75 °C (67 %): $9,7 \text{ Gt CO}_2 - 3,0 \text{ Gt CO}_2 = 6,7 \text{ Gt CO}_2$ ab 2020.
- Bei unverändertem Emissionsniveau wäre das berechnete deutsche CO₂-Budget im Jahr 2029 verbraucht, bei linearer Reduktion im Jahr 2038.

Die analoge Berechnung für eine 50%-Wahrscheinlichkeit, das 1,5°C-Ziel zu erreichen, ergibt für Deutschland ein CO₂-Budget von 4,2 Gt CO₂ ab 2020. Es wäre bei gleichbleibenden Emissionen bereits im Jahr 2026 verbraucht, bei linearer Reduktion im Jahr 2032.

Weitere Erläuterungen

Eine Gigatonne (Gt) CO₂ entspricht 1 Mrd. t CO₂, eine Megatonne (Mt) 1 Mio. t CO₂. Global werden derzeit circa 42 Gt CO₂ pro Jahr emittiert. Deutschland emittierte 2018 755 Mt CO₂, was einem Ausstoß von 9,1 t CO₂ pro Kopf jährlich entspricht (UBA 2020). Berücksichtigt man auch andere Treibhausgase wie Methan oder Lachgas, so wurden im Jahr 2018 in Deutschland 858 Mt sogenannter CO₂-Äquivalente (CO_{2eq}) ausgestoßen (UBA 2020).

Die genannten Zahlen berücksichtigen Europas und Deutschlands Anteil am internationalen Luft- und Schiffsverkehr nicht. Würden diese einbezogen, wären die jährlichen Emissionen höher und das CO₂-Budget früher aufgebraucht.

wahrscheinlicher ist es, dass der nationale Beitrag zur Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C noch ausreicht. Zum anderen macht eine frühere Emissionsminderung auch längere Umbau- und Ausstiegspfade bzw. Budgetverläufe in den Sektoren möglich, was in Anbetracht der Größe der erforderlichen sozio-technischen Transformation notwendig erscheint (Tz. 37).

2.2.4.3 Vergleich zwischen Paris-kompatiblem deutschen CO₂-Budget und Treibhausgasbudget gemäß der deutschen Klimaziele

34. Deutschland besitzt einen breiten klimapolitischen Zielkanon (vgl. Abschn. 2.4.2). Langfristziel ist dabei die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050. Bis zum Jahr 2030 sind jährliche Treibhausgasbudgets für die meisten Sektoren vereinbart worden. Nach 2030 ist der Minderungspfad bisher hingegen nicht unmittelbar mit festen

Emissionsmengen verbunden, aber unter bestimmten Annahmen lässt sich ein Budget auch für diesen Zeitraum errechnen. Insgesamt kann somit ein implizites Treibhausgasbudget der Bundesregierung abgeleitet und dem Paris-kompatiblen nationalen Budget gegenübergestellt werden. So kann analysiert werden, ob mit der nationalen Klimaschutzpolitik der nötige Beitrag zur Erreichung der globalen Pariser Klimaziele geleistet wird.

Berechnung eines Treibhausgasbudgets bis 2050 anhand der nationalen Klimaziele

35. Die Bundesregierung hat 2016 mit dem Klimaschutzplan 2050 für das Jahr 2030 sogenannte Sektorziele in den Handlungsfeldern Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie und Landwirtschaft beschlossen (BMU 2019a). Im Bundes-Klimaschutzgesetz wurden diese ergänzt durch den Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges. Die Sektorziele wurden im Gesetz bestätigt und durch jahresscharfe Sektorbudgets von 2020 bis 2030 konkretisiert, mit Ausnahme der Ener-

o Tabelle 2-2

Emissionen je Sektor gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz und einer Treibhausgasneutralität aller Emissionen bis 2050

	Emissionen 1990		Emissionen 2017		Emissionen gemäß KSG 2030		95%ige Minderung 2050	
	in Mt CO _{2eq}	anteilig	in Mt CO _{2eq}	anteilig	in Mt CO _{2eq}	anteilig	in Mt CO _{2eq}	anteilig
Landwirtschaft	90	7%	72	8%	58	11%	27	62%
Verkehr	163	13%	171	19%	95	17%	0	0%
Gebäude	210	17%	130	14%	70	13%	0	0%
Industrie	283	23%	193	21%	140	26%	14	31%
Energiewirtschaft	466	37%	328	36%	175	32%	0	0%
Abfallwirtschaft und Sonstiges	38	3%	10	1%	5	1%	3	6%
GESAMT (ohne LULUCF)	1.250	100%	904	100%	543	100%	44	100%

Abweichungen von 100% ergeben sich durch Rundungsungenauigkeiten.

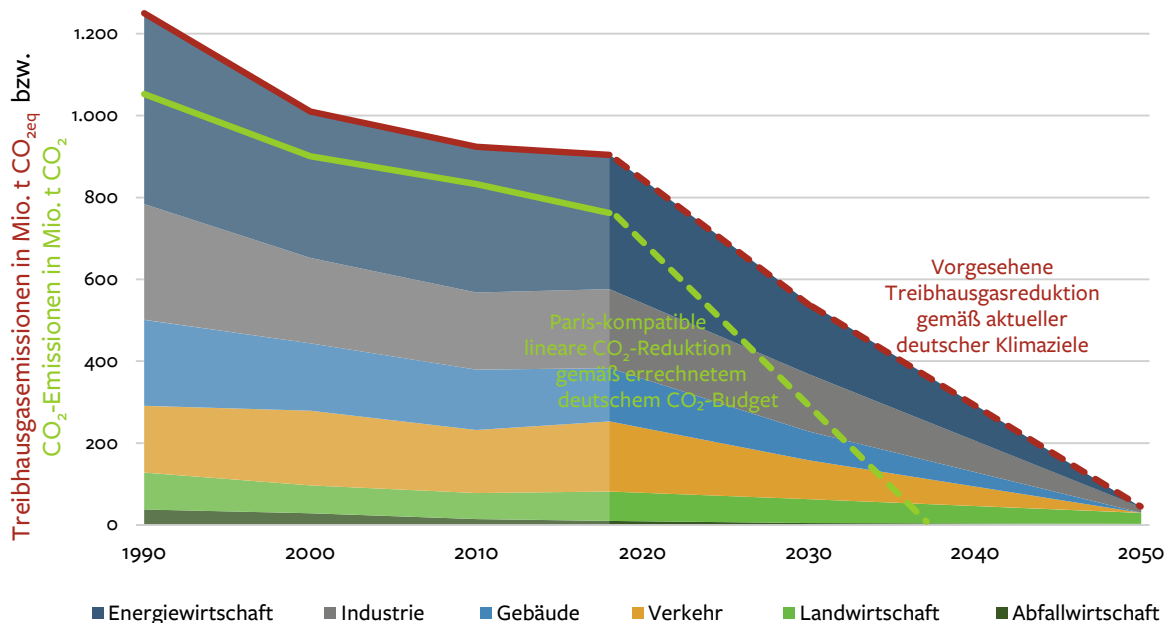
gewirtschaft, für die lediglich Jahresemissionsmengen in 2020, 2022 und 2030 gesetzt wurden. Um darüber hinaus bis 2050 sektorspezifische Budgets zu ermitteln, wird eine Berechnung unter folgenden Annahmen durchgeführt (s. Tab. 2-2):

- o Laut einer aktuellen Studie des Umweltbundesamtes (UBA) ist es möglich, dass die Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr und Gebäude bis zum Jahr 2050 keine Treibhausgasemissionen mehr ausstoßen (UBA 2019f, S. 338). Unvermeidbare Restemissionen treten hingegen in der Landwirtschaft, der Industrie und der Abfall- und Abwasserwirtschaft auf. Für diese Sektoren sind in Tabelle 2-2 die Mittelwerte über die in der UBA-Studie ermittelten, szenario-abhängigen Emissionswerte für 2050 angegeben (UBA 2019f, S. 339). Insgesamt verbleiben in 2050 43,3 Mt CO_{2eq}, die durch entsprechende Senken in Form negativer Emissionen (vgl. Abschn. 2.3.3) ausgeglichen werden müssen, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. Dies entspricht einer Emissionsreduktion um rund 96,5 % gegenüber 1990.

- o Ausgehend von den sektorspezifischen CO₂-Emissionen des Jahres 2017 werden in allen Sektoren die Emissionen gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz reduziert und die vorgesehenen Emissionsmengen bis zum Jahr 2030 sowie die Treibhausgasneutralität in 2050 erreicht. Ab 2030 wird ein linearer Reduktionspfad unterstellt (s. Abb. 2-6). Neben den hier gezeigten sind auch andere Verläufe bzw. Budgetaufteilungen zwischen den Sektoren möglich.
- o Eine wissenschaftliche Ungenauigkeit ergibt sich daraus, dass das aus dem Pariser Klimaabkommen abgeleitete nationale Budget lediglich CO₂-Emissionen umfasst, während die deutschen Klima- und Sektorziele sämtliche Treibhausgasemissionen einschließen (s. a. Kasten 2-1). Da in 2017 aber 88 % der deutschen Treibhausgasemissionen auf CO₂ entfielen (zwei Drittel der Nicht-CO₂-Emissionen stammen aus der Landwirtschaft und der Abfallwirtschaft) (UBA 2018b), wird vereinfachend das nationale Paris-kompatible CO₂-Budget mit dem deutschen Treibhausgasbudget, das aus den deutschen Klimazielen abgeleitet wird, verglichen.

o **Abbildung 2-6**

Emissionsreduktion gemäß nationaler Klimaziele bzw. Paris-kompatiblem Budget für Deutschland



Vergleich des berechneten deutschen Treibhausgasbudgets bis 2050 mit dem Paris-kompatiblen Budget

36. Aus den historischen Emissionen, den aktuellen Klimazielen 2030 sowie einer Treibhausgasneutralität 2050 (s. Tab. 2-2) lässt sich ein Budget von 15.268 Mt CO_{2eq} ab Anfang 2018 berechnen. Diesem wird das Paris-kompatible Budget für Deutschland gegenübergestellt. Dazu werden die erfassten CO₂-Emissionen der Jahre 2016 und 2017 von dem im Kasten 2-2 „Berechnung eines Paris-kompatiblen CO₂-Budgets ab 2020 für die EU-28 und Deutschland“ ermittelten deutschen Budget abgezogen, sodass für das Budget ab Anfang 2018 8.112 Mt CO₂ verbleiben. Dies bedeutet, dass das Treibhausgasbudget, das sich gemäß der aktuellen nationalen Klimaschutzziele ergäbe, nahezu doppelt so groß ist wie das CO₂-Budget, das nach der Rechnung des SRU zur Erfüllung des Pariser Klimaabkommens für Deutschland angemessen ist. Somit wäre die Erfüllung der nationalen Klima- und Sektorziele bei weitem nicht ausreichend, um den deutschen Beitrag für die Einhaltung der Pariser Klimaziele zu leisten. Der SRU betont in diesem Zusammenhang erneut nachdrücklich, dass eine Konkretisierung und deutliche Verschärfung der deutschen Klimaschutzziele dringend erforderlich ist (SRU 2016a, S. 4; 2016c, Abschn. 2; 2017b, S. 27).

Die Verteilung des Budgets auf die Sektoren erfolgt gemäß der politischen Ziele anhand der Verhältnisse der Sektoranteile, die als farbige Flächen in Abbildung 2-6 dargestellt sind. Demnach entfallen ab 2018 auf die Energiewirtschaft noch 33 %, auf die Industrie 24 %, auf den Gebäudesektor 13 %, auf den Verkehr 18 %, auf die Landwirtschaft 11 % und auf Abfall und Sonstiges 1 % des verbleibenden deutschen CO₂-Budgets. Ab 2050 dürften nur noch die angenommenen unvermeidbaren Restemissionen in der Landwirtschaft, in der Industrie und in der Abfall- und Abwasserwirtschaft weiterhin ausgestoßen werden, unter der Voraussetzung, dass sie durch entsprechende negative Emissionen kompensiert werden. Wird angenommen, dass die Emissionen aus dem Jahr 2017 in den nächsten Jahren konstant bleiben, ergäbe sich je nach Sektor noch eine sehr kurze Zeitspanne von acht bis zwölf Jahren ab Anfang 2018, wenn das Paris-kompatible Budget zugrunde gelegt wird. In den einzelnen Sektoren müssten die Emissionsreduktionen gegenüber der in der deutschen Klimapolitik derzeit vorgesehenen Minderungen nahezu doppelt so hoch ausfallen. Aus der Verschärfung der deutschen Klimaziele folgt somit zwingend auch eine Anpassung der Sektorziele.

Nicht-linearer Reduktionspfad und Budgetaufteilung auf Sektoren

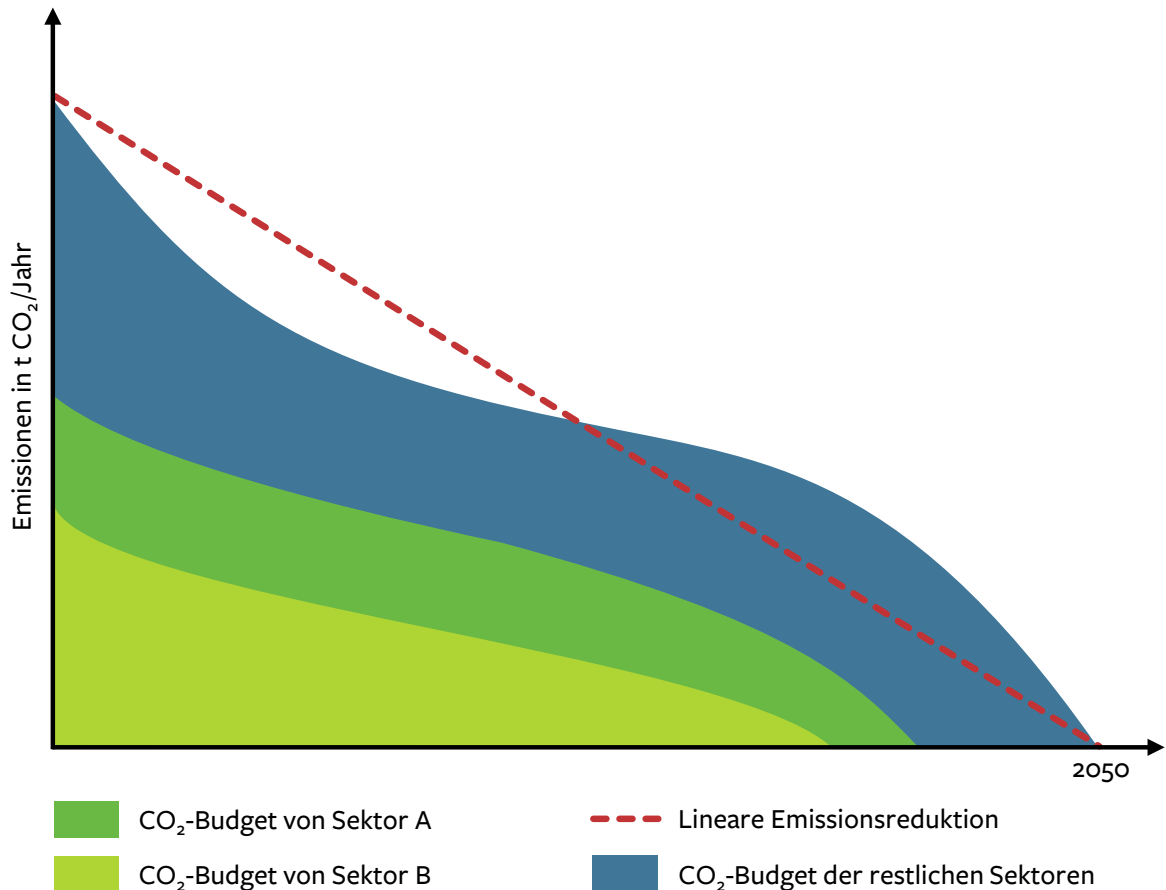
37. Dafür, wie das Budget (unabhängig davon, ob es Paris-kompatibel ist oder nicht) auf die nächsten Jahre verteilt wird, gäbe es neben dem in Abbildung 2-6 dargestellten linearen Verlauf weitere Möglichkeiten. Dabei muss sichergestellt werden, dass vereinbarte Zwischenziele sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene erreicht werden. Der SRU plädiert für frühzeitige Einsparungen, um Restmengen für spätere Emissionen vorzuhalten (SRU 2017a, Tz. 10). Vorteilhaft wäre ein Verlauf, der die gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz anvisierten Emissionen im Jahr 2030 insgesamt deutlich unterbietet, dafür aber langfristig noch eine Überschreitung des Zielpfades erlaubt, bis im Jahr 2050 die Treibhausgasneutralität erreicht würde. Die Emissionsreduktion kann in den einzelnen Sektoren unterschiedlich ambitioniert erfolgen, wie es Abbildung 2-7 veranschaulicht. Dabei sollte die Verteilung des Restbudgets auf die Sektoren anhand von Kriterien vorgenommen werden, die berücksichtigen, wie schnell und in welchem Umfang Maßnahmen im jeweiligen Sektor umsetzbar sind. Sektoren mit vergleichsweise großem und rasch zu hebendem Minderungspotenzial sollten überproportional ambitionierte Ziele erhalten, sodass in den Sektoren mit größeren Herausforderungen noch mehr Zeit bleibt. Eine solche Aufteilung kann auch die Folge einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung oder der Berücksichtigung sozialer Auswirkungen sein. Die Entscheidungsgrundlage für die Aufteilung auf Sektorbudgets sollte öffentlich kommuniziert werden. Innerhalb jeden Sektors sind aufgrund des hohen Handlungsdrucks aber ohnehin schnell umsetzbare Maßnahmen zur Emissionsminderung zu veranlassen, um Zeit für die Vorbereitung aufwendigerer Maßnahmen zu gewinnen.

Budgets für den Einsatz von Energieträgern

38. Die budgetgestützte Senkung der Emissionen lässt sich nicht nur auf Sektoren, sondern auch auf Energieträger übertragen. So könnten für Kohle, Erdöl, Erdgas, Benzin und Diesel Budgets ausgewiesen werden, aus denen folgt, dass die Nutzung des jeweiligen Energieträgers begrenzt ist. In der Stellungnahme „Kohleausstieg jetzt einleiten“ empfiehlt der SRU, dass Energieträger, die schon heute gut substituierbar sind, frühzeitig durch emissionsarme Alternativen ersetzt werden sollten (SRU 2017a). Dadurch wäre Zeit gewonnen, fossile Ressourcen in den Bereichen noch länger zu nutzen, in denen der Ersatz durch klimafreundliche Energieträger oder neue Technologien noch weiterer Erforschung und Erprobung bedarf. Dabei

o **Abbildung 2-7**

Schematische Darstellung eines gesamten Budget-kompatiblen Reduktionspfades inklusive Budgetaufteilung auf Sektoren



SRU 2020

könnten Energieträgerbudgets die Sektorziele, die aufgrund der etablierten Ressorts auf politischer Ebene sinnvoll und nötig sind, ergänzen. Die Budgets zeigen, in welchem Umfang fossile Energieträger noch nutzbar sind, und können so die langfristige Planung der Substitution der Energieträger, der Importstrategien und der Infrastrukturbedarfe erleichtern. Sie wären somit ein zusätzliches Mittel, um den Reduktionsfortschritt nicht nur sektor-, sondern auch energieträgerspezifisch zu messen.

39. Zusammenfassend zeigt sich, dass aus dem Pariser Klimaabkommen sowohl ein globales Budget als auch nationale Budgets ableitbar sind und diese zudem auf Sektoren verteilt werden können. Wenn alle Staa-

ten ihr jeweiliges Budget einhalten, kann der Klimawandel voraussichtlich auf das anvisierte Maß begrenzt werden. Für Deutschland ergibt sich unter den zuvor erläuterten Annahmen ein Paris-kompatibles Restbudget von 6,7 Gt CO₂ ab 2020. Dies wäre bei linearer Reduktion bereits 2038 verbraucht. Der SRU empfiehlt, ein Paris-kompatibles Budget zur Grundlage der deutschen und europäischen Klimapolitik zu machen und von einem linearen Reduktionspfad abzusehen. Eine frühzeitige überproportionale Reduktion bis 2030 erlaubt langfristig noch Spielraum, erfordert aber, dass erhebliche Maßnahmen jetzt angestoßen werden. Ein langsamer Einstieg, der auf steile Emissionsreduktionen in späteren Jahren hofft, gefährdet die Einhaltung des Budgets und der Klimaziele.

2.3 Eckpunkte zur Einhaltung eines nationalen CO₂-Budgets

40. Um das verbleibende Paris-kompatible CO₂-Budget einzuhalten, müssen die Treibhausgasemissionen nunmehr sehr zügig gesenkt werden. Die notwendigen Ausstiegspfade aus Technologien, welche auf fossilen Energieträgern beruhen, sind steil. Sukzessive sind alle Anwendungen, bei denen klimaschädliche Gase freigesetzt werden, durch nahezu emissionsfreie Technologien oder Prozesse zu ersetzen. Begleitet werden muss dies von Maßnahmen, die eine absolute Verringerung des Energieverbrauchs oder auch eine Effizienzsteigerung bestehender Anwendungen bewirken. Eine entsprechende Transformation der betroffenen Sektoren bietet dabei die Chance einer wirtschaftlichen, technologischen und gesellschaftlichen Erneuerung (SRU 2016b, Kap. 1).

Die Diskussion um den Verlauf der Ausstiegspfade ist elementar mit der Frage verbunden, wie rasch Alternativen aufgebaut werden können. Wichtig ist es, Einstiegs- und Ausbaupfade für alternative Verfahrensweisen zusammenzudenken, welche auch künftig gesellschaftliches Wohlergehen sichern, insbesondere den Umbau des Energie-, Mobilitäts- und Wärmesystems. Dabei sind technische und ökonomische Aspekte nur zwei von vielen, da zum Beispiel die Sozialverträglichkeit und gesellschaftliche Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen ebenfalls in die Planung einfließen müssen. Im Folgenden empfiehlt der SRU die Einhaltung des CO₂-Budgets, den Ausstieg aus fossilen Energieträgern und den damit einhergehenden Ausbau klimafreundlicher Energiesysteme unter eine Reihe von Randbedingungen zu stellen. Dabei ist es das Ziel, die künftige Energieversorgung Deutschlands auf der Basis von 100 % erneuerbaren Energien zu etablieren (SRU 2011; UBA 2019f; 2014).

2.3.1 Um- statt Ausstieg: erneuerbare Energien anstelle fossiler Energieträger

41. Es müssen konsequent Maßnahmen ergriffen werden, um den Einsatz fossiler Energieträger deutlich zu vermindern und durch den entsprechenden Ausbau erneuerbarer Energien zu begleiten.

Nutzung fossiler Ressourcen vorausschauend beenden: Ausstieg aus Kohle, Erdöl, Erdgas, Benzin und Diesel

42. Angesichts langer Investitionszyklen und Lebensdauern bei vielen Industrieanlagen und Kraftwerken, aber auch im Gebäudebereich und im Verkehrssektor, sollte bereits heute in emissionsfreie oder zumindest deutlich emissionsärmere Technologien investiert werden. Eine Verschärfung klimapolitischer Maßnahmen führt dazu, dass Investitionen in fossile Anwendungen in absehbarer Zeit unwirtschaftlich werden können. Hierzu zählt die beschlossene CO₂-Bepreisung mit den festgelegten Steigerungspfaden (s. Kasten 2-5). Diese Maßnahmen müssen bei heutigen Investitionsentscheidungen berücksichtigt werden.

Einzelne Institutionen nehmen sich dem Thema bereits an. So legen die neuen Richtlinien für die Kreditvergabe der Europäischen Investitionsbank fest, dass Projekte zur Gewinnung von Öl und Gas sowie für Gasinfrastrukturen nicht mehr gefördert werden. Neue Kraftwerksprojekte müssen einen deutlich ambitionierteren Emissionsstandard vorweisen und sollen nur unter Auflagen genehmigt werden, die glaubwürdig darlegen, dass später hauptsächlich erneuerbare Gase zum Einsatz kommen (European Investment Bank 2019). Diese Vorgaben sollten nach Ansicht des SRU zwar noch deutlich verschärft werden, gehen aber bereits in die richtige Richtung.

43. Die Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ hat einen Vorschlag zur Beendigung der Kohleverstromung in Deutschland erarbeitet, sodass das Sektorziel der Energiewirtschaft gemäß Klimaschutzplan 2050 im Jahr 2030 eingehalten wird (Kommission „Wachstum Strukturwandel und Beschäftigung“ 2019). Dies alleine ist jedoch nicht ausreichend, um die nötige Emissionsreduktion herbeizuführen (SRU 2017a). Auch die im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 vorgeschlagenen Maßnahmen sind in dieser Hinsicht unzureichend, da zwar eine Beendigung der Kohleverstromung, darüber hinaus aber keine weitreichende Beschränkung anderer fossiler Energieträger wie Erdgas oder Erdöl vorgesehen ist. Zusätzlich sind die Regelungen zum Ausbau erneuerbarer Energien ungenügend, um diesen schnell und in dem benötigten Ausmaß herbeizuführen. So wird zum Beispiel die beschlossene Aufhebung der Begrenzung der Photovoltaik-Förderung bis zu einer Kapazität von 52 GW („PV-Deckel“) allein nicht den bereits absehbar zu geringen Photovoltaikzubau in den nächsten Jahren kompensieren.

Die Politik sollte die Planungssicherheit bei privaten und gewerblichen Investitionsentscheidungen durch eine frühzeitige, vorausschauende Verabschiedung von Klimaschutzmaßnahmen erhöhen und Förder- und Subventionsprogramme nicht auf fossile, sondern erneuerbare Lösungen ausrichten. Andernfalls drohen Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekte, die die Nutzung CO₂-intensiver Technologien manifestieren können (s. dazu auch WACHSMUTH et al. 2019). Auch die Einführung sogenannter Brückentechnologien kann Pfadabhängigkeiten schaffen. Ein Beispiel hierfür ist der Ausbau von Gaskraftwerken anstatt direkt den Ausbau erneuerbarer Energien im entsprechenden Maße voranzutreiben. Ähnliches gilt für Investitionen in Infrastrukturen, deren Erweiterung aus kurzfristiger Perspektive angebracht erscheinen mag, aber langfristig nicht notwendig ist, wenn der Infrastrukturbedarf unter den Rahmenbedingungen eines treibhausgasneutralen Energiesystems bewertet wird (ebd.).

Es bedarf eines umfassenden Gesamtkonzepts, das den Umstieg von fossilen auf nachhaltige, erneuerbare Anwendungen vorausschauend regelt und aufeinander abstimmt. Es sind Pfade für den Ausbau erneuerbarer Energien zu entwickeln, die die Beendigung der Nutzung fossiler Ressourcen überhaupt erst möglich machen. Damit sind weitreichende Implikationen verbunden, wie zum Beispiel ein veränderter Bedarf an Infrastrukturen (was sowohl den Abbau bestehender als auch den Aufbau neuer Infrastrukturen bedeuten kann), veränderte Import- und Exportstrukturen von Energieträgern, aber auch Auswirkungen auf die Gesellschaft, die Wirtschaft und auf Arbeitsplätze. Die Ausarbeitung solch eines politischen Konzepts ist komplex und muss auf umfassendem Expertenwissen aus verschiedensten Disziplinen basieren.

Erneuerbare Energien ausbauen

44. Die erneuerbaren Energieträger sind das Kernelement der Dekarbonisierung in Deutschland. Im Vergleich der verschiedenen Optionen für die Stromerzeugung ist der Einsatz der erneuerbaren Energien die einzige, die Nachhaltigkeit gewährleisten kann (SRU 2011, S. 56). Der SRU hat bereits dargelegt, dass für Deutschland „eine ausschließlich auf regenerativen Energiequellen basierende Stromversorgung bis 2050 unter Beachtung strenger Anforderungen des Naturschutzes und bei Vermeidung von anderen Nutzungskonflikten möglich ist“ (SRU 2011, S. 31). Hierzu muss allerdings ergänzend der Energiebedarf durch Maßnahmen für Energieeinsparungen und Effizienzsteigerungen deutlich gesenkt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen bestätigen, dass in Deutschland eine Stromversorgung mit 100 % erneuer-

baren Energien, ergänzt durch flexible Elemente wie Möglichkeiten zur Sektorkopplung, Speicher sowie eine gute Stromnetzinfrastuktur, technisch machbar und funktionsfähig ist und ökonomische Vorteile mit sich bringen kann (UBA 2014; 2010; HENNING und PALZER 2012, S. 5; KUNZ und KIRRMANN 2015, S. 4; WALTER et al. 2018). Zudem existieren für die europäische und globale Ebene Studien, die zeigen, dass sogar der gesamte Energiebedarf über erneuerbare Ressourcen gedeckt werden kann (RAM et al. 2019; 2018).

Durch eine entsprechende Standortwahl, raumplanerische und naturschutzfachliche Vorgaben sowie die Optimierung des Technologiemixes können die Umweltauswirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien minimiert werden (SRU 2011, S. 53). Die Eingriffe in die Natur sind durch die Errichtung der Anlagen in ihrer zeitlichen Dimension begrenzt und in der Regel auf die Laufzeit der Anlage beschränkt, daher bestehen deutlich geringere langfristige Auswirkungen als bei der Nutzung von fossilen Brennstoffen oder Uranressourcen (Bergbau, Lagerung radioaktiver Abfälle, CO₂-Speicherung) (ebd.). Dennoch bestehen ökologische Herausforderungen beim Ausbau erneuerbarer Energien, wie zum Beispiel Auswirkungen auf die Biosphäre, das heißt auf die Lebensräume auf dem Land und im Wasser. Diese sind bei der Planung des Ausbaus ebenso zu berücksichtigen wie Eingriffe in das Landschaftsbild (hierzu s. a. SCHMIDT, C. et al. 2018a; 2018b). Es gilt, die Belange von Klima-, Natur- und Artenschutz in Einklang zu bringen. Eine aktuelle Studie des Bundesamtes für Naturschutz liefert Ansätze, wie eine naturverträgliche Energieversorgung in Deutschland gestaltet werden kann, unter Berücksichtigung von geringer Flächeninanspruchnahme, Landschaftsschutz und Biodiversitätserhalt (WALTER et al. 2018).

45. Auch aufgrund der starken technologischen Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen sind erneuerbare Energieträger, wie zum Beispiel Windenergieanlagen an windstarken Standorten, gegenüber konventionellen Stromerzeugungstechnologien wettbewerbsfähig (KOST et al. 2018, S. 8 ff.). Dabei spielt auch eine Rolle, dass die Stromerzeugung mittels konventioneller Ressourcen im Rahmen des EU ETS teurer wird, wenn die Preise für CO₂-Zertifikate weiter steigen. Eine ambitionierte nationale Klimapolitik schwächt die Wettbewerbsfähigkeit der meisten Branchen und Unternehmen in Deutschland nicht. Die Energiekosten sind nur einer von vielen Standortfaktoren, bei vielen Industrieunternehmen machen sie nur einen geringen Anteil an den Produktionskosten aus und es bestehen erhebliche Effizienzpotenziale, die

bislang noch nicht abgerufen wurden. Nur wenige energieintensive Unternehmen benötigen zur Erhaltung ihrer Wettbewerbsfähigkeit eine gezielte Entlastung bei möglicherweise steigenden Energiepreisen durch ambitionierte Klimapolitik (s. hierzu SRU 2016b, Kap. 2). Ob es überhaupt zu einem Preisanstieg kommt, ist fraglich, da erneuerbare Energien in der Regel preissenkend wirken (OEI et al. 2019a, S. 13; Agora Energiewende 2018, S. 13). Das Preisniveau wird aber von weiteren Faktoren, wie zum Beispiel der Preisentwicklung fossiler Energieträger sowie der europäischen CO₂-Zertifikate beeinflusst (Agora Energiewende 2018, S. 6; OEI et al. 2019a, S. 16). Zudem kann sich eine Vorreiterrolle Deutschlands im Einsatz klimafreundlicher Technologien auch günstig auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit auswirken (SRU 2016b, Kap. 1).

46. Allerdings muss der Ausbau erneuerbarer Energien stark beschleunigt werden, um die Klimaziele zu erreichen. In Deutschland waren Ende 2018 Windleistung in Höhe von 53 GW an Land und 6 GW auf See sowie 45 GW Photovoltaik installiert. Die Ausbauraten für Wind an Land und auf See sind von 6,3 GW im Jahr 2017 auf 3,3 GW in 2018 deutlich zurückgegangen (BMWi 2019c, S. 7), für 2019 wird ein noch geringerer Ausbau erwartet („Halbjahreszahlen Windenergie an Land: Historisch niedriger Zubau trotz sehr guter Wachstumsperspektiven – Genehmigungsstau dringend auflösen“, Pressemitteilung des Bundesverbandes WindEnergie vom 25. Juni 2019). Gründe dafür sind unzureichende Flächenbereitstellungen in den Bundesländern, langwierige Genehmigungsverfahren sowie Klagen und Widerspruchsverfahren gegen bereits erteilte Genehmigungen. Für Photovoltaik konnte hingegen eine Steigerung auf 2,9 GW in 2018 gegenüber 1,7 GW im Vorjahr erzielt werden (BMWi 2019c, S. 7).

Auch ist trotz einer generellen Befürwortung des Ausbaus erneuerbarer Energien in der Gesellschaft zu erkennen, dass die Errichtung von Windenergie- und Biogasanlagen sowie von Strommasten in der Umgebung des eigenen Wohnortes weniger positiv bewertet wird und die Zahlungsbereitschaft für „grünen“ Strom abgenommen hat (Agentur für Erneuerbare Energien 2019; FRONDEL und SOMMER 2019). So kommt es immer wieder zu lokalen Widerständen gegen den Ausbau von Windenergieanlagen und Stromnetzen (HOEFT et al. 2017). Bereits gegenwärtig wird die Öffentlichkeit im Rahmen der Planungen beim Ausbau erneuerbarer Energien beteiligt. Es wäre aber zusätzlich akzeptanzfördernd, wenn die Interessen der lokal Betroffenen schon in früheren

Entscheidungs- und Planungsphasen vermehrt einbezogen würden und auch eine Beteiligung an Investitionen ermöglicht würde (s. Kap. 7, Tz. 655). Die Akzeptanz der Bevölkerung ist eine wesentliche Voraussetzung, um die nationalen Klimaziele bis 2030 zu erreichen, da deutlich größere jährliche Ausbauzahlen nötig sind (OEI et al. 2019a; BEE 2019, S. 3; UBA 2019f, S. 34). Im Klimaschutzprogramm 2030 hat die Bundesregierung zwar beschlossen, die Deckelung des Photovoltaikausbaus aufzuheben und das Ausbaziel für Offshore-Windenergieanlagen anzuheben, dennoch bestehen weiterhin Rahmenbedingungen, die den Ausbau hemmen (z. B. Dauer von Genehmigungsverfahren, Gestaltung von Ausschreibungsverfahren, verzögerter Netzausbau) (BMU 2019b). Die aktuellen Beschlüsse werden den Anforderungen und Notwendigkeiten, die sich aus dem fortschreitenden Klimawandel ergeben, nicht gerecht. Die Bundesregierung wird die selbstgesteckten Klimaziele 2030 mit dem Maßnahmenprogramm 2030 voraussichtlich deutlich verfehlen (OEI et al. 2019b, S. 10). Nachbesserungen an den beschlossenen Maßnahmen sind dringend nötig, um die nationalen, noch nicht einmal Paris-kompatiblen Ziele zu erreichen. Um einen angemessenen Beitrag zum Pariser Klimaabkommen zu liefern, bedarf es darüber hinaus zusätzlicher Anstrengungen. Hierzu ist eine gemeinsame Strategie von Bund und Ländern zu entwerfen, die neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien auch die Emissionsminderung im Gebäude- und Verkehrssektor in den Fokus nimmt. Mit zunehmender Sektorkopplung müssen außerdem sektorübergreifende Maßnahmen angestoßen werden, die zum Beispiel den Ausbau der erneuerbaren Energien und der Stromnetze besser auf die Strombedarfe der verschiedenen Sektoren abstimmen.

47. Ein schneller Ausbau erneuerbarer Energien geht mit der Nachfrage nach einer Reihe von Rohstoffen für die Produktion der notwendigen Technologien einher. Welche Rohstoffe in welchem Zeitraum genau benötigt werden, hängt von den geplanten Ausbaupfaden und den technologischen Entwicklungen ab, zum Beispiel aufgrund von Konkurrenzen um Rohstoffe zwischen verschiedenen Produkten (World Bank 2017; ANGERER et al. 2016; s. a. SRU 2017b, Kap. 3.5). Da die benötigten Rohstoffe nicht in ausreichenden Mengen als Sekundärrohstoffe verfügbar sind, ist es notwendig, Primärrohstoffe zu gewinnen. Hier ist zum einen zu beachten, dass Gewinnung und Verarbeitung in der Regel zu erheblichen Umwelt- und Gesundheitsbelastungen führen und oftmals die lokalen und regionalen Umweltbelastungsgrenzen überschreiten (CHAHOUD et al. 1999; ERICSSON und SÖDERHOLM 2010; MUDD und WARD 2008; UNEP 2019b; OECD 2019; s. a. SRU 2017b, Abschn. 2.3.2). Zum

anderen kann die Rohstoffverfügbarkeit aufgrund von zu geringen Minenkapazitäten und ökonomisch oder politisch bedingten Lieferrisiken eingeschränkt sein und zu Preissteigerungen führen. Generell zeigen Studien, dass die ausreichende Versorgung mit Rohstoffen möglich ist, jedoch temporäre Lieferengpässe zu erwarten sind (ANGERER et al. 2016; BLAGOEVA et al. 2016; BGR o. J.; BUNGE und STÄUBLI 2014; FRONDEL et al. 2006; Öko-Institut 2017; BUCHERT et al. 2019). Diesen kann durch technische Maßnahmen wie Materialeffizienz, Rohstoffsubstitution oder Ausweichen auf andere Technologien entgegnet werden. Aber auch eine Ausweitung der Minenkapazitäten ist gegebenenfalls notwendig. Eine steigende globale Nachfrage ist beispielsweise aufgrund der zunehmenden Anzahl an Elektrofahrzeugen für Lithium und Cobalt zu erwarten. Der Bedarf an Platin steigt, wenn die Brennstoffzellentechnologie stärker genutzt wird und die „freiwerdenden“ Mengen aus dem Rückgang der Verwendung von Katalysatoren nicht ausreichen (MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016, S. 263 ff.). Nach BLAGOEVA et al. (2016) sind in der EU Engpässe für verschiedene Rohstoffe denkbar, wenn keine rechtzeitigen Anpassungsmaßnahmen stattfinden. Hierzu zählen zum Beispiel Indium und Silber für die Photovoltaikmodule sowie Seltene Erden wie Dysprosium, Neodym und Praseodym für Windenergieanlagen. In beiden Fällen ist der Bedarf jedoch von der konkret umgesetzten Technologie abhängig: So wird Indium nur für sogenannte CIGS-Photovoltaikmodule benötigt. Die bisher vorrangig genutzten Silizium- und Cadmium-Tellurid-basierten Technologien benötigen kein Indium. Silber wird hingegen für alle Arten von Photovoltaikmodulen benötigt. Bei Windkraftanlagen gibt es Technologien sowohl mit als auch ohne den Einsatz von Seltenen Erden.

Um Klarheit und Transparenz über Umweltwirkungen und mögliche Versorgungsrisiken bei der Dekarbonisierung der Energieversorgung zu schaffen, sollten deshalb Rohstoffbedarfe bei der Entwicklung von Dekarbonisierungspfaden mitbetrachtet werden. Wichtig ist zu prüfen, welche Pfade mit möglichst geringen Umweltwirkungen umsetzbar sind. Ist es notwendig, die Rohstoffgewinnung auszuweiten, sollten die Rahmenbedingungen hierfür so gestaltet werden, dass hohe Umwelt- und Sozialstandards gewährleistet werden. Da ein großer Teil der notwendigen Rohstoffe im Ausland gewonnen wird, muss dies integraler Bestandteil der Außenwirtschafts- und Entwicklungspolitik sein (SRU 2012, Abschn. 2.4.4).

Neben der Rohstoffgewinnung muss die Frage der Recyclingfähigkeit betrachtet werden. Nur durch hochwer-

tiges Recycling kann der Primärrohstoffbedarf abgemildert werden. Deshalb müssen jetzt die Weichen dafür gestellt werden, dass die eingesetzten Materialien kreislauffähig sind und zukünftig die entsprechende Infrastruktur dafür bereitsteht. Voraussetzung hierfür ist, dass entsprechende Regelungen geschaffen werden.

Die Umstellung auf erneuerbare Energien darf nicht allein aus einer Energieperspektive erfolgen, sondern muss mit der Frage der Steuerung gesellschaftlicher Stoffströme und der dadurch verursachten Umweltwirkungen verknüpft werden (s. a. SRU 2019, Tz. 362). Ziel ist, dass für die Dekarbonisierung weltweit weder lokale oder regionale noch planetare Belastungsgrenzen überschritten werden (s. bspw. Betrachtungen in VIDAL et al. 2013; HERTWICH et al. 2015; GIBON und HERTWICH 2014; UBA 2019d).

2.3.2 Keine erneute Nutzung der Atomenergie

48. Der hohe Handlungsdruck in der Klimapolitik hat zu einem Aufleben der öffentlichen Diskussion über die Nutzung von Atomenergie geführt. Von ihren Befürwortern wird sie als Option für eine rasche Emissionsminderung neben den Ausbau der erneuerbaren Energien gestellt, da sie eine klimafreundliche Stromerzeugung mit geringen CO₂-Emissionen ermöglichen. In Frankreich ist die ursprünglich anvisierte Reduktion der Stromerzeugung von Atomkraftwerken um 50 % bis 2025 um zehn Jahre auf 2035 verschoben worden, nachdem der Ausbau erneuerbarer Energien nicht im erforderlichen Ausmaß stattgefunden hat (SCHNEIDER et al. 2019, S. 69). Auf europäischer Ebene wurde im Clean Energy Package festgehalten, dass ein Anteil der Atomkraft von etwa 15 % gemeinsam mit den erneuerbaren Energien das Rückgrat eines CO₂-freien europäischen Stromsystems 2050 bilden soll (Europäische Kommission 2018b, S. 10). Auch die europäische Investitionsbank sieht weiterhin eine Kreditvergabe an Atomprojekte vor (European Investment Bank 2019). Für Deutschland hält der SRU es ausdrücklich nicht für sinnvoll, der Atomenergie eine Rolle in der zukünftigen Stromversorgung zuzuschreiben (SRU 2011b, Abschn. 2.4.2). Vielmehr sollte Deutschland am beschlossenen und sich bereits in der Umsetzung befindlichen Atomenergieausstieg festhalten und zeigen, dass der Übergang hin zu einem erneuerbaren Energiesystem ohne die Nutzung von Atomenergie gelingen kann, um auch auf globaler Ebene ein Signal zu setzen. Dabei werden unter „Atomenergie“ alle Stromerzeugungstech-

nologien verstanden, die mithilfe von Kernspaltung Energie erzeugen.

Unfallrisiken und ungelöste Endlagerung

49. Die Nutzung der Atomenergie gefährdet schon bei einer teilweisen Freisetzung gesundheits- und umweltgefährdender Substanzen viele Millionen Menschen und birgt das Risiko, dass ganze Landstriche auf lange Zeit unbewohnbar werden (WBGU 1998, S. 70). Zahlreiche Störfälle – insbesondere die katastrophalen Unfälle in Tschernobyl und Fukushima – belegen, dass erhebliche Risiken bei der Nutzung von Atomenergie bestehen. Mit den erneuerbaren Energien stehen Alternativen zur Verfügung, welche die Atomenergie überflüssig machen. So können die hohen Sicherheitsrisiken, die sich insbesondere durch die Auswirkungen von Störfällen zeigen, vermieden werden (Ethikkommission Sichere Energieversorgung 2011, S. 10).

50. Nach der Nutzung ist eine sichere, abgeschlossene Lagerung der radioaktiven Abfälle über eine Million Jahre oder länger sicherzustellen. An die Entsorgung knüpfen sich weitere Fragestellungen an, zum Beispiel wo und wie eine Lagerung stattfinden sowie finanziert werden kann und wie man die Interessen künftiger Generationen berücksichtigt, um die Endlagerung fortzuführen (ECKHARDT und RIPPE 2016). Aus Rücksicht auf das Wohlergehen folgender Generationen ist es gemäß des Vorsorgeprinzips geboten, die Risiken frühzeitig und möglichst gering zu halten (Risikovorsorge). Außerdem ist der Schaden, darunter Beeinträchtigungen von Umwelt und Gesundheit, von den derzeit und in Zukunft lebenden Menschen soweit möglich abzuwenden (SRU 2019, Abschn. 2.2.2.1.2). Aus diesen Gründen hält der SRU einen Betrieb von Atomkraftwerken über den vereinbarten Ausstiegspfad hinaus für nicht verantwortbar.

51. Die Forderung nach einer Verlängerung von Laufzeiten bestehender Atomkraftwerke ist unter Sicherheitsaspekten ebenfalls kritisch zu bewerten. Längere Laufzeiten und der damit verbundene Verschleiß von Komponenten erhöhen das Sicherheitsrisiko, was aufgrund mangelnder Erfahrung mit solch langen Betriebszeiten schwer abschätzbar ist (MATTHES und KALLENBACH-HERBERT 2006, S. 61). Die Nachrüstung und Ertüchtigung der Sicherheitskomponenten bestehender Atomkraftwerke auf das höchste Sicherheitsniveau neuer Reaktoren sind teuer und rechnen sich wirtschaftlich nicht (Greenpeace 2014, S. 5). Hinzu kommt, dass es aktuell weltweit keine technisch ausgereifte Anlage für die dauerhafte Einlagerung von hoch radioaktiven Ab-

fällen gibt (BESNARD et al. 2019, S. 75; BRUNNENGRÄBER 2019, S. 18). Die Bundesgesellschaft für Endlagerung hat den Auftrag, bis 2031 einen Standort zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für eine Lagerung über Millionen von Jahren bietet (BGE 2019). Bis dieser genehmigt und entsprechend erschlossen ist, werden weitere Jahre bzw. Jahrzehnte vergehen. So gestaltet sich die Endlagersuche in Deutschland weiterhin langwierig und schwierig. Auch steht die deutsche Bevölkerung der Atomenergie skeptisch gegenüber. Mit dem Unfall in Fukushima stieg in Deutschland sowohl der Anteil der Menschen mit Sicherheitsbedenken als auch mit einer ablehnenden Haltung gegenüber der Atomenergie an (Frankfurter Allgemeine Zeitung 20.04.2011). Eine Verlängerung oder erneute Nutzung von Atomkraftwerken und die damit verbundene Suche weiterer Endlagermöglichkeiten bergen somit ein enormes Konfliktpotenzial.

Unwirtschaftlichkeit

52. Der Bau von Atomkraftwerken ist auch aus ökonomischer Perspektive nicht sinnvoll. Global gesehen sind Investitionen in erneuerbare Energien wirtschaftlicher als Investitionen in Atomkraftwerke (SCHNEIDER et al. 2019, S. 213; LAZARD 2018, S. 2; MENDELEVITCH et al. 2018; KEMFERT et al. 2017; 2015). Dies liegt unter anderem an deutlich gestiegenen spezifischen Investitionsausgaben für neue Atomkraftwerke, zunehmenden Betriebskosten, ungelösten Fragen des Rückbaus und der Endlagerung sowie der nach wie vor fehlenden Versicherbarkeit von Atomunfällen (KEMFERT et al. 2015; SCHNEIDER et al. 2019, S. 214). Aus höheren Sicherheitsanforderungen folgen Kostensteigerungen für den Bau sowie höhere Aufwendungen für den Rückbau und die Lagerung radioaktiver Abfälle, die schwer abzuschätzen sind (KEMFERT et al. 2015, S. 1065). Auch sogenannte Atomkraftwerke der vierten Generation und kleinere Kraftwerke (small modular reactors) sind technisch schwer zu kontrollieren und lassen keinen wirtschaftlichen Einsatz erwarten (WEALER et al. 2019, S. 516). Laufzeitverlängerungen bedeuten aufgrund der gestiegenen Sicherheitsanforderungen zusätzliche Kosten für die Nachrüstung und sind häufig nicht wirtschaftlich (SCHNEIDER et al. 2019, S. 238). Nachrüstungen an europäischen Atomkraftwerken, die nach Kraftwerksunfällen empfohlen wurden, wurden bisher auch aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit unzureichend umgesetzt (Greenpeace 2014, S. 5 und 12).

53. In Deutschland wurde mit dem Atomenergieausstieg 2011 ein politischer Konsens erzielt, der festlegt, die Nutzung der Atomenergie bis zum Jahr 2022 zu be-

enden. Dennoch spielt die Atomenergie global weiterhin eine Rolle. Das zeigt sich daran, dass ihr Anteil an der weltweiten Stromversorgung in den letzten Jahren nicht mehr rückläufig ist und auf einem Niveau von etwas über 10 % stagniert, wobei insbesondere in China neue Kraftwerke gebaut wurden (SCHNEIDER et al. 2019, S. 32). Dass es trotz fehlender Wirtschaftlichkeit zu einem Bau von Atomkraftwerken kommt, liegt an politischen Anreizen in Form von Subventionen (WEALER et al. 2019, S. 518). In Szenarien der Internationalen Energieagentur (International Energy Agency – IEA), des IPCC sowie der EU wird weiterhin angenommen, dass die Atomenergie zur Erreichung des Klimaziels trotz mangelnder Wirtschaftlichkeit eingesetzt wird (IEA 2018, S. 22; IPCC 2018a; Europäische Kommission 2018b, S. 10). Da zwei Drittel der Atomkraftwerke weltweit über dreißig Jahre alt (IAEA - PRIS 2019) und daher in absehbarer Zeit zu ersetzen sind, ist es von besonderer Relevanz, die Atomenergie bei den anstehenden Investitionsentscheidungen durch den wirtschaftlich und sicherheitspolitisch sinnvollen Ausbau erneuerbarer Energien zu ersetzen.

2.3.3 Die Rolle von negativen Emissionen – stark begrenzter Einsatz von CCS in Deutschland

54. Neben der Notwendigkeit, CO₂-Emissionen zu reduzieren, führt der steigende Handlungsdruck beim Klimawandel auch zu einer Diskussion darüber, ob und inwiefern Praktiken zur CO₂-Abscheidung bzw. Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre angewendet werden müssen.

2.3.3.1 Negative Emissionen

55. Heute wird mehr als die Hälfte des freigesetzten CO₂ durch natürliche Prozesse kompensiert, das heißt über terrestrische und ozeanische Senken (LE QUÉRÉ et al. 2018, S. 2160). Neben den natürlichen Prozessen werden unter der Bezeichnung der negativen Emissionen zusätzliche und vom Menschen veranlasste Praktiken verstanden, mit denen CO₂ aus der Atmosphäre entnommen bzw. die Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre verhindert wird (IPCC 2019; 2018a; MINX et al. 2018, S. 3; MORROW et al. 2018). Der IPCC-Sonderbericht über Klimawandel und Landsysteme gibt eine Reihe möglicher landbasierter Praktiken zur Erzeugung negativer Emissionen an (IPCC 2019, S. 28 f.). Darunter befinden sich einige, die neben dem Effekt der CO₂-Bin-

dung auch positive Wirkung auf andere Indikatoren, wie Anpassung an den Klimawandel, Desertifikation und Landdegradation oder Nahrungsmittelsicherheit, entfalten. Dies gilt unter bestimmten Umständen beispielsweise für die Auf- und Wiederaufforstung, die Herstellung von Biokohle und deren Eintrag in Böden oder die Anreicherung von Kohlenstoff in Böden. Daneben werden weitere negative Emissionspraktiken diskutiert, wie beispielsweise die Ozeandüngung, chemische Verwitterung und künstliche Alkalisierung von Ozeanen sowie verschiedene Arten zur Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoffdioxid (carbon capture and storage – CCS). Zu CCS zählen die Kombination mit fossilen Kraftwerks- und Industrieprozessen bzw. mit Bioenergie (bioenergy with carbon capture and storage – BECCS), aber auch die direkte Abscheidung aus der Luft (direct air carbon capture and storage – DACCS) (s. Abb. 2-8; MINX et al. 2018).

Angesichts nicht ausreichender Erfolge bei der Emissionsminderung laufen diese Verfahren auf den Versuch hinaus, den Klimawandel durch andere großskalige Beeinflussungen wichtiger Komponenten des Erdsystems zu begrenzen. Diese Ansätze, die unter dem Überbegriff Geo-Engineering diskutiert werden, erscheinen so attraktiv, da sie eine technische Lösung in Aussicht stellen, für die die Gesellschaft ihr Verhalten gar nicht oder nur geringfügig ändern muss (UBA 2011, S. 41). Die wissenschaftliche Erforschung und technologische Entwicklung von Verfahren zur Gewinnung negativer Emissionen ist durchaus sinnvoll. Sie sind jedoch aus ökologischen, technologischen, politischen und ethischen Gründen eine kritisch zu bewertende, aus heutiger Sicht oft spekulative Möglichkeit in der Diskussion um Emissionsbudgets (UBA 2011). Vor einem groß angelegten Einsatz wären noch viele Detailfragen zu klären (SPP 1689 2019, S. 65).

56. Im Klimaabkommen von Paris ist festgelegt, dass die Emissionsbilanz längerfristig ausgeglichen sein soll, das heißt, dass verbleibende Quellen von CO₂ durch zusätzliche Senken in entsprechender Höhe kompensiert werden. Negative Emissionen sollten jedoch nicht dazu herangezogen werden, das Budget rechnerisch zu vergrößern (s. Tz. 16). Grund dafür ist, dass die großskalige Verfügbarkeit, die Umweltverträglichkeit des Einsatzes und die langfristige Verlässlichkeit negativer Emissionspraktiken unsicher sind. Allerdings kann die Ausweitung negativer Emissionen die Wahrscheinlichkeit erhöhen, das Budget einzuhalten, da die Budgetgröße an eine Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung geknüpft ist.

Die Rolle negativer Emissionen in wissenschaftlichen Modellierungen

57. Ein Großteil der vom IPCC SR1.5 ausgewerteten kostenoptimalen Klimaszenarien enthalten einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag negativer Emissionen, um Klimaziele zu erreichen, bei der die globale Erwärmung deutlich unter 2 °C liegt (FUSS et al. 2018; IPCC 2018a; ROCKSTRÖM et al. 2017; ROGELJ et al. 2018). Diese Szenarien sehen weniger rasche Emissionsreduktionen vor, als dies ohne die Berücksichtigung negativer Emissionen der Fall wäre. Es ist sehr wahrscheinlich, dass schwierig oder nicht zu senkende Restemissionen, wie beispielsweise aus Industrieprozessen oder durch Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (land use, land use change and forestry – LULUCF), verbleiben und langfristig kompensiert werden müssen (DAVIS et al. 2018; LUDERER et al. 2018; UBA 2014; 2019f, S. 50 f.). Eine aktuelle Studie des UBA zeigt für Deutschland, dass durch natürliche Senken, das heißt nachhaltige land- und forstwirtschaftliche Flächenbewirtschaftung, diese unvermeidbaren Emissionen kompensiert werden können und dass die Treibhausgasneutralität bis 2050 erreicht wird, ohne dass CCS zum Einsatz kommen muss (UBA 2019g, S. 32). In anderen energie-technologischen Modellierungen ist hingegen nur ein begrenztes Potenzial der Anwendungen hinterlegt, die nicht auf CCS beruhen, sodass als Ergebnis sehr große CCS-Anteile herauskommen, damit die Klimaziele im verbleibenden Zeitrahmen eingehalten werden können. So wurde im Fünften Sachstandsbericht des IPCC global eine starke Ausweitung von Bioenergie in Kombination mit CCS vorgesehen (IPCC 2014). Dabei bleibt oft unberücksichtigt, dass eine Ausweitung in dieser Größenordnung weitreichende Veränderungen in Form von Landnutzung und Flächenverbrauch bedeuten, deren Realisierung innerhalb der planetaren Belastungsgrenzen unrealistisch ist.

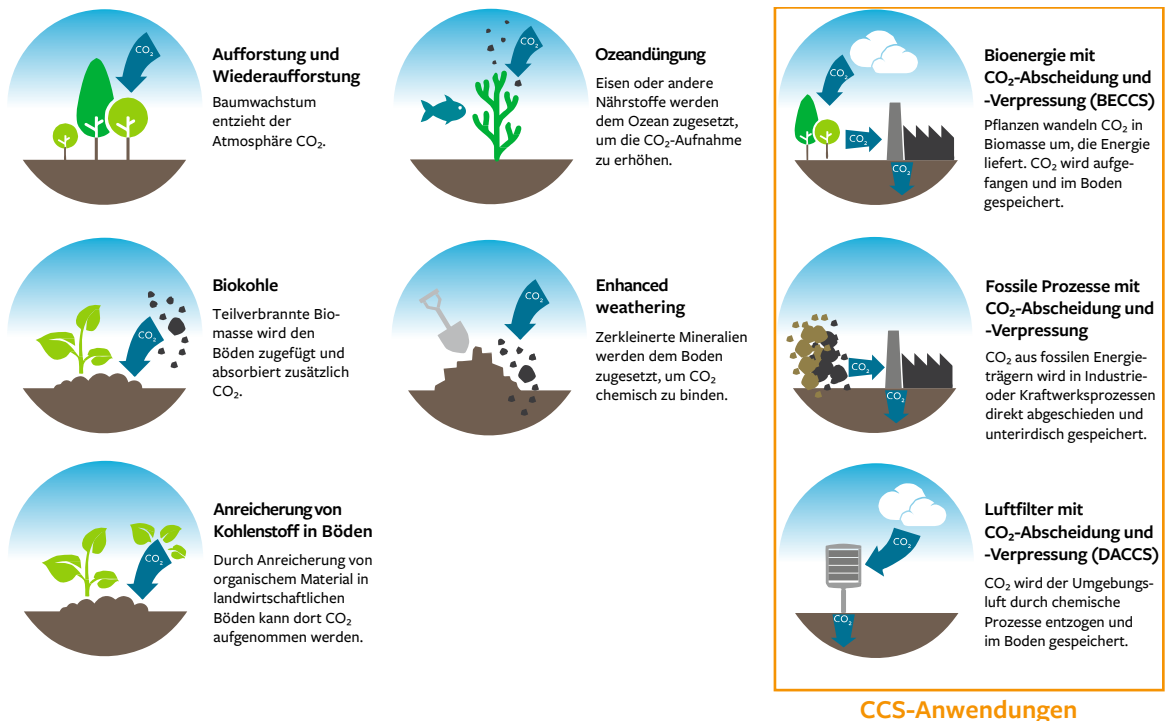
58. Abzugrenzen von negativen Emissionen sind Verfahren, die eine nachgelagerte Nutzung des CO₂ vorsehen (carbon capture and utilization – CCU) (Deutscher

CCU als Option zur Nutzung von CO₂

Abzugrenzen von negativen Emissionen sind Verfahren, die eine nachgelagerte Nutzung des CO₂ vorsehen (carbon capture and utilization – CCU) (Deutscher

o Abbildung 2-8

Verfahren, die unter „negativen Emissionen“ verstanden werden



Quelle: MCC 2016, verändert

Bundestag 2018, S. 15 f.). Hierbei wird CO₂ abgeschieden und anschließend weiter genutzt. Einsatzfelder sind die chemische Industrie, aber auch die Herstellung von synthetischen Kohlenwasserstoffen, wie beispielsweise Flüssigkraftstoffe oder Methan. Wird das CO₂ anschließend in die Atmosphäre entlassen, hängt es für einen positiven Klimaschutzbeitrag über die gesamte Prozesskette ganz entscheidend davon ab, welche Form der Energienutzung substituiert wird, wie hoch der Aufwand bei der Abscheidung des CO₂ ist und ob dafür erneuerbare Energien genutzt wurden. Eine erneute Abscheidung und Nutzung (denkbar als Kohlenstoffkreislauf, der aber ggf. nicht geschlossen gehalten werden kann, s. UBA 2014, S. 72) oder die anschließende Speicherung (carbon capture utilization and storage – CCUS) sind hingegen mit hohem energetischem Aufwand verbunden und nur sinnvoll, wenn ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien verfügbar ist. Zudem ist der Entwicklungsstand von Anlagen zur CO₂-Abscheidung aus der Luft noch niedrig. Bisher sind nur wenige und eher kleine Anlagen gebaut worden und es sind nur wenige Unternehmen in diesem Bereich aktiv (z.B. RUB 2019). Entsprechend besteht noch hoher Forschungsbedarf. Synthetische Kohlenwasserstoffe dürften zukünftig insbesondere im Schiffs- und Flugverkehr nötig werden, um die Emissionen zu senken, womit auch der Einsatz von CCU-Prozessen eine Option wäre. Generell sollte der Einsatz synthetischer Kraftstoffe jedoch auf die Prozesse beschränkt bleiben, bei denen Alternativen wie die direkte Nutzung von Strom nicht umsetzbar sind (s. dazu auch SRU 2017b, S. 15).

2.3.3.2 Einsatz von CCS in Deutschland

59. Als potenzielle Kohlenstoffsенke spielt CCS in den klimapolitischen Debatten immer wieder eine Rolle. Die Gründe, die in Deutschland gegen den Einsatz von CCS sprechen, sind insbesondere die Sicherheitsrisiken, das begrenzte Speicherpotenzial sowie die mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit, wie im Folgenden ausgeführt wird (s. a. SRU 2009).

Sicherheit und Speichervorkommen für CCS

60. Bei CCS findet keine Vermeidung von Emissionen statt, sondern lediglich eine möglichst sichere Verwahrung des CO₂ durch unterirdische Speicherung. Durch Forschungsaktivitäten der letzten Jahre liegen technisch-wissenschaftliche Erkenntnisse zur Abscheidung, Speicherung und zum Transport von CO₂ vor (Deutscher Bundestag 2018, S. 51). Weltweit sind erst 18 CCS-Projekte in Betrieb, worunter 14 Projekte CCS in Kombination mit der tertiären Ölgewinnung (Enhanced Oil

Recovery – EOR) anwenden, bei der CO₂ unter hohem Druck in das Bohrloch gepresst wird, um das Öl hinauszudrücken (Global CCS Institute 2018, S. 18). Bei einem EOR-Prozess verbleibt ein großer Teil des CO₂ unterirdisch, jedoch müssen zur Anerkennung von EOR-CCS-Projekten strengere regulatorische Anforderungen erfüllt werden (ZALUSKI et al. 2016). Da bei EOR die Ölgewinnung das eigentliche Ziel ist, sind die Erfahrungen hinsichtlich Monitoring und Speichersicherheit bei EOR-CCS-Projekten auf reine CCS-Anwendungen nicht immer direkt übertragbar.

Es wird insbesondere in Australien, Kanada, den USA, Japan, China sowie in einigen arabischen Staaten die Forschung und Entwicklung von CCS intensiv vorangetrieben. Die einzigen beiden derzeit laufenden europäischen Projekte befinden sich in Norwegen, wobei die Regierung in Großbritannien ein erstes Projekt für die CO₂-Speicherung und -Nutzung ab etwa 2025 vorsieht (Deutscher Bundestag 2018, S. 20 und 49; Department for Business, Energy & Industrial Strategy of the United Kingdom 2018). Bei bisher umgesetzten Projekten konnten zwar hinsichtlich der technischen Machbarkeit und Sicherheitsrisiken der Speicherung keine wesentlichen Mängel festgestellt werden, doch sind die Ergebnisse nicht generell auf potenzielle Standorte übertragbar (NETL 2019; MARKEWITZ et al. 2017, S. 27). Wie hoch die Umweltrisiken bei einer Speicherung von CO₂ im Meeresboden sind, ist schwer abschätzbar (UBA 2008, S. 322). In einem Experiment konnten relativ geringe Risiken durch Leckagen gezeigt werden (VIELSTÄDTE et al. 2019). Jedoch liegen keine Erfahrungen mit einer auf Jahrhunderte bzw. Jahrtausende ausgelegten CO₂-Speicherung vor (ROST 2015, S. 13). Zwar erscheinen „Stand von Forschung und Technik ausreichend, um weitere Erfahrungen mit Demonstrationsprojekten in Deutschland zu sammeln“ (Deutscher Bundestag 2018, S. 15), doch ist ein Einsatz über die Demonstrationsphase hinaus in naher Zukunft nicht realistisch.

Viele der großskaligen CO₂-Speicherprojekte befinden sich außerdem in dünn besiedelten Regionen mit einer relativ lockeren Überwachung möglicher Leckagen, die den Sicherheitsanforderungen dicht besiedelter Regionen in Mitteleuropa nicht entspricht. Auch ist die Auflösungsgenauigkeit der Überwachungstechnologien begrenzt, sodass die Messwerte mit Unsicherheit behaftet sind (ebd. 2018, S. 12). Geologische Formationen, die für eine dauerhafte Speicherung von CO₂ geeignet erscheinen, sind weltweit unterschiedlich verteilt (ROST 2015, S. 57). Das Speicherpotenzial in Deutschland ist stark begrenzt (SRU 2009, S. 9). Auch wäre der geografische Abgleich zwischen CO₂-Quellen und Lagerstätten

sowie der Aufbau geeigneter Transportinfrastrukturen zu prüfen (ESKEN et al. 2010, S. 17). Daneben bestehen teils Konkurrenzen mit anderen möglichen Nutzungen, zum Beispiel für die Speicherung von Druckluft als Stromspeicher oder für Wasserstoff (SRU 2009, S. 34).

Gesellschaftliche Akzeptanz von CCS

61. CCS-Projekte wurden auf europäischer Ebene langsamer und in geringerem Umfang umgesetzt als zu Beginn des Jahrhunderts erwartet wurde. Die Realisierung scheiterte in den meisten Fällen an den hohen Kosten sowie der fehlenden gesellschaftlichen Akzeptanz (Deutscher Bundestag 2018, S. 49). Dies liegt auch daran, dass sich Speicherstätten zum Teil unter bewohnten Gebieten befinden und die Bewohnerinnen und Bewohner aufgrund von Sicherheitsbedenken gegen CCS-Projekte protestiert haben.

In Deutschland kam es nur bei einem von vier geplanten CCS-Projekten zu einer Einspeicherung von CO₂. Hauptgründe gegen die Umsetzung waren auch hier die hohen Kosten und die mangelnde Akzeptanz. Dass ein Projekt in Ketzin zeitweise in Betrieb ging, kann sowohl der vergleichsweise kleinen Speicherauslegung als auch einer partizipativen Einbindung der Bevölkerung zugeschrieben werden (DÜTSCHKE et al. 2015, S. 242). Zudem war das Projekt als reines Forschungsprojekt ausgewiesen und von Anfang an befristet angelegt.

Unwirtschaftlichkeit von CCS

62. Die Bundesregierung geht in einem Evaluationsbericht davon aus, dass für CCS-Anlagen „der gesamte Technologiepfad bestehend aus Abscheidung, Transport und Speicherung für die ersten europäischen Projekte, vermutlich aber auch auf absehbare Zeit keine Rentabilität erwarten“ lässt (Deutscher Bundestag 2018, S. 50 f.). Die IEA stellt fest, dass aufgrund der wenigen bestehenden und geplanten CCS-Projekte in Europa eine Kostensenkung wohl nur bei Ausweitung staatlicher Unterstützung erfolgen wird (IEA 2018, S. 350). Neben diesen Gesichtspunkten, die auf die Wirtschaftlichkeit aller CCS-Anwendungen zutreffen, werden im Folgenden weitere Aspekte differenziert nach Verfahren diskutiert.

Wirtschaftliche Aspekte von CCS in der Stromerzeugung

63. Modellrechnungen belegen, dass Investitionen in CCS gekoppelt mit fossilen Kraftwerken aktuell sehr kostenintensiv und in den meisten Fällen unwirtschaftlich sind. Der Bau und Betrieb von CCS-Anlagen verteuert die bestehende Kraftwerkstechnologie, wobei die Zusatzkosten durch den bisherigen Preisrahmen von Emis-

sionszertifikaten nicht abgedeckt werden können (SUSSAMS 2018). Die Treibhausgasemissionen von CCS-Kraftwerken lassen sich reduzieren, aber nicht vollständig vermeiden (ESKEN et al. 2010, S. 17). Gleichzeitig sinkt aufgrund des Energiebedarfs für die Abscheidung der Wirkungsgrad des Kraftwerks je nach Abscheideverfahren (BONGARTZ et al. 2015, S. 81), wodurch der Brennstoffbedarf erhöht wird. Dies steht in starkem Widerspruch zu dem Ziel, die Energieeffizienz zu steigern und den Energieverbrauch zu senken.

64. Insbesondere im Energiesektor sind zunehmend günstigere Alternativen vorhanden (s. a. Tz. 45). Die mittleren Stromgestehungskosten von Photovoltaikanlagen und Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland liegen schon heute auf bzw. unter dem Niveau neu errichteter konventioneller Kraftwerke, die mit Braunkohle, Steinkohle oder Erdgas betrieben werden (KOST et al. 2018, S. 2). Vor allem langfristig sind die Investitionen in erneuerbare Energieträger und deren Betrieb günstiger als fossile Alternativen, die in Kombination mit CCS betrieben werden müssten (ebd., S. 3 f.; HAINSCH et al. 2018, S. 25). Auch ist ein Energiesystem mit einer Vollversorgung aus erneuerbaren Energien in Deutschland technisch machbar, wie bereits in Abschnitt 2.3.1 gezeigt wurde. Insgesamt ist der SRU daher der Auffassung, dass sowohl aus wirtschaftlichen Gründen als auch im Hinblick auf Risiken und ökologische Nebenfolgen eine Nutzung von CCS in der Stromerzeugung in Deutschland weiterhin nicht verfolgt werden sollte.

Wirtschaftliche Aspekte von CCS in Industrieprozessen

65. Die meisten bestehenden CCS-Projekte dienen der Abscheidung von CO₂ bei Industrieprozessen, zum Beispiel bei der Erdgasaufbereitung, der Düngemittelherstellung oder der Wasserstoffproduktion aus Methan (Deutscher Bundestag 2018, S. 9). In Deutschland sind etwa 38 % der Industrieemissionen nicht energiebedingt und entfallen auf Produktionsprozesse in der Grundstoffindustrie, wie zum Beispiel die Kalk-, Zement- und Stahlherstellung und die Grundstoffchemie (BMU 2019a, S. 57). Der Großteil dieser Prozesse sollte durch technologische Weiterentwicklungen emissionsfrei gestaltet bzw. die produzierten Güter durch Alternativen ersetzt werden. Für die möglichst geringen, verbleibenden Restemissionen könnte der Einsatz von CCS die einzig verbleibende Lösung sein, um Emissionen nicht freizusetzen. Allerdings ist CCS für Industrieanlagen aktuell nicht wirtschaftlich und kann, falls Standort und Speicherort weit entfernt sind, den Aufbau einer gegebenenfalls kostenintensiven neuen Infrastruktur erforderlich machen

(Deutscher Bundestag 2018, S. 43). Entsprechend sollte CCS in der Industrie nur als letzte Option in Erwägung gezogen werden und nicht die Forschung und Entwicklung emissionsfreier bzw. -armer Produkte oder Verfahren im Industriesektor hemmen.

Wirtschaftliche Aspekte von BECCS

66. Die Kombination der Bioenergienutzung mit CCS bietet konzeptionell den Vorteil, dass ein pflanzlicher, nachwachsender Rohstoff zur Energieerzeugung genutzt wird, dessen Emissionen durch CCS abgetrennt und gespeichert werden, sodass insgesamt die Emissionsbilanz negativ werden kann. Häufig wird dabei angenommen, dass Bioenergie grundsätzlich CO₂-neutral sei, weil durch die energetische Nutzung nur die Menge an CO₂ freigesetzt wird, die während des Pflanzenwachstums aufgenommen wurde. Dies hängt jedoch von der Art der Biomasse ab (s. Abschn. 2.3.4). Während zum Beispiel bei Holz aus Rest- und Abfallstoffen im Wesentlichen nur Emissionen aus Transport und gegebenenfalls einer Aufbereitung zu bilanzieren sind, muss bei der Bereitstellung, Aufbereitung, Umwandlung und Nutzung von angebauten Energiepflanzen in erheblichem Umfang Hilfs- und Betriebsenergie eingesetzt werden. Dies führt zu Emissionen. Beim Anbau von Bioenergiepflanzen sind auch die Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft zu berücksichtigen, insbesondere die klimarelevanten Gase neben CO₂ (ARNOLD 2015, S. 493; vgl. auch Abschn. 2.3.4).

Problematisch ist darüber hinaus, dass der Anbau von Bioenergiepflanzen flächenintensiv ist. Um in großem Umfang negative Emissionen durch BECCS zu erreichen, würden nach Ergebnissen klimaökonomischer Modelle riesige Landflächen zum Anbau der Biomasse sowie enorme Kapazitäten für Transport und Speicherung benötigt (GEDEN und SCHÄFER 2016, S. 2). Das Potenzial an nachhaltiger Biomasse ist beschränkt und der zur Bioenergiegewinnung geeignete Anteil wird durch Nutzungskonkurrenzen weiter geschmälert (UBA 2019f, S. 28; 2013a, S. 52 ff.; 2013b, S. 7; ARNOLD 2015, S. 501). Die Kosten der Bioenergiegewinnung steigen außerdem durch CCS deutlich an, wobei die Brennstoffeigenschaften und damit die Kosten je nach Biomasseart sehr variieren (FINKENRATH et al. 2015, S. 595; ARNOLD 2015, S. 500).

Während für bestimmte Regionen, Anwendungen und kleinskalige BECCS-Systeme die Nachhaltigkeit und der Klimanutzen möglicherweise gegeben sind, ist dies für die großskalige Nutzung auf globaler Ebene unwahr-

scheinlich. Eine sozial- und umweltverträgliche Nutzung von BECCS ist allein aufgrund des begrenzten Potenzials für Deutschland in großem Umfang nicht vorstellbar und sollte nicht angestrebt werden.

Wirtschaftliche Aspekte von DACCS

67. Im Vergleich zu Verfahren, die an fossile oder biogene CO₂-Quellen gekoppelt sind, besteht bei der Luftabscheidung aufgrund des niedrigeren CO₂-Gehalts in der Luft ein enormer technischer und energetischer Aufwand, der sich in entsprechend hohen Kosten niederschlägt. Aktuell befindet sich das Verfahren noch im Entwicklungsstadium. Kosten- und Effizienzgründe sprechen damit eindeutig dagegen, DACCS zu nutzen, solange Kohle, Gas und Bioenergie in nennenswertem Umfang ohne CCS eingesetzt werden (WIETSCHEL et al. 2018, S. 65 f.). Ob und wann DACCS technische und ökonomische Marktreife erlangt, ist derzeit offen.

Zwischenfazit zu CCS-Anwendungen und negative Emissionen

68. CCS in Deutschland ist aufgrund hoher Kosten, ungünstiger geologischer Speichervoraussetzungen und des Risikos von ungewollter CO₂-Freisetzung über lange Zeiträume in absehbarer Zeit nicht zu empfehlen. Eine Vermeidung von Emissionen, die sowohl durch eine Verbrauchssenkung als auch durch die Substitution fossiler durch emissionsfreie Prozesse möglich ist, hat oberste Priorität und ist der Abscheidung und Speicherung von CO₂ grundsätzlich vorzuziehen. Insbesondere bei der Stromerzeugung sollte auf den Einsatz von CCS verzichtet werden (vgl. auch SRU 2011, S. 50). Langfristig könnte CCS mangels Alternativen für die Kompensation von Restemissionen notwendig werden. Die Speicherpotenziale sind für diese Prozesse vorzuhalten. Ein ausgedehnter Einsatz von BECCS ist unter Wahrung von Nachhaltigkeits- und Umweltschutzkriterien allein aufgrund des beschränkten Potenzials nicht zu empfehlen. Werden BECCS-Anwendungen in Erwägung gezogen, müssen ihre Umwelt- und Klimaauswirkungen zum Beispiel hinsichtlich der Stoffkreisläufe und Transportketten bilanziert und geprüft werden.

69. Negative Emissionen sind bereits Teil der Diskussion über Möglichkeiten zur Begrenzung des Klimawandels, die bei global weiter unzureichenden Klimaschutzmaßnahmen voraussichtlich noch intensiver geführt wird. Hierfür ist es erforderlich, die ökologischen, technologischen, politischen und ethischen Aspekte dieser Ansätze bei der weiteren Erforschung und Erprobung kritisch zu beleuchten. Die Ausweitung negativer Emissionen sollte von den Ergebnissen dieser Forschung

abhängig gemacht werden und nicht bereits heute als Ersatz für Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen angenommen werden.

2.3.4 Regulierungsbedarf bei der energetischen Nutzung von Stammholz

70. Eine Ausweitung der energetischen Nutzung von Holz als Ersatz für fossile Energieträger steht im Kontext der Energiewende immer wieder in der Diskussion (z. B. KLEPPER und THRÄN 2019; Committee on Climate Change 2018). Im privaten Bereich betrifft sie vor allem den Einsatz von Pelletheizungen für Gebäude, auf kommunaler Ebene kleinere Biomasseanlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung und im Bereich der Großanlagen die potenzielle Verstromung von Holzbiomasse in vormaligen Kohlekraftwerken. Insgesamt spielt jedoch derzeit noch keine dieser Varianten eine herausragende Rolle für die Energieversorgung, ihr Einsatz ist bislang weitgehend auf einzelne Anwendungen beschränkt.

71. Die Attraktivität einer energetischen Nutzung von Holzbiomasse könnte jedoch im Zuge einer beschleunigten Energiewende, die im Einklang mit ambitionierten Klimazielen steht, stark anwachsen und der Bestand entsprechender Anlagen könnte zunehmen. Allein die Pläne europäischer Energiekonzerne, von Kohle auf Biomasse umzusteigen, benötigen in etwa so viele Holzpellets, wie derzeit global produziert werden (Sandbag 2019). Jährlich würde dies eine Waldfläche erfordern, die halb so groß wie der Schwarzwald ist (ebd.), auch wenn in der Konzeptionierung zunächst eine Nutzung von Holz aus Ausdünnungen und Plantagen bevorzugt würde. Weil das verfügbare Volumen an Holzbiomasse aus Rest- und Abfallstoffen begrenzt ist, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die energetische Nutzung von Holz in Zukunft höhere Anteile von eigens gerntetem Stammholz umfassen wird (AGOSTINI et al. 2014; SEARCHINGER et al. 2018). Da hierfür die Potenziale in Deutschland und Europa aufgrund wirksamer Regulierungen begrenzt sind, könnte dies perspektivisch für die globalen Wälder eine erhebliche Bedrohung sein, weil deren ökonomische Verwertung auf internationalen Märkten attraktiv würde. Bisher ist dieser Markt weitestgehend nicht durch wirksame Vorgaben reguliert (SCHLESINGER 2018).

72. Eine Beschleunigung dieser Entwicklung ist auch zu erwarten, wenn durch die Verteuerung von Zertifikaten für Treibhausgasemission aus fossilen Quellen der

Druck auf Energieerzeuger wächst, aus wirtschaftlichen und rechtlichen Gründen auf alternative Energieträger zu wechseln. Betreiber fossiler Kraftwerke könnten sich durch die Verfeuerung von Holzbiomasse den Übergang auf einen erneuerbaren Brennstoff versprechen, wodurch der Weiterbetrieb eines Kraftwerks möglich bleibt. Eine solche Ausweitung der energetischen Nutzung von Holzbiomasse, auch solcher aus Stammholz, ist umso wahrscheinlicher, als bestehende Regularien diese in vielen Fällen derzeit als nahezu treibhausgasneutral werten und damit für die Erfüllung von Klimazielen anrechnungsfähig machen (STERMAN et al. 2018). Dies trifft beispielsweise auf die Ende 2018 novellierte Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2018/2001 zu. Diese geht davon aus, dass beispielsweise die energetische Nutzung von Hackschnitzeln aus Stammholz zur Wärmegewinnung bzw. zur Verstromung in vielen Fällen als nahezu klimaneutral angenommen werden kann.

73. Eine künftig deutlich stärkere Inanspruchnahme der globalen Wälder für die energetische Nutzung steht im Widerspruch zur Einhaltung planetarer Belastungsgrenzen sowie zu Bemühungen um weltweiten Waldschutz und zur Wiederaufforstung. Um erhebliche Fehlentwicklungen mit gravierenden Risiken für die Umwelt zu vermeiden, ist eine frühzeitige, gezielte und wirksame politische Steuerung der Verwendung von Holzbiomasse, insbesondere solcher aus Stammholz, notwendig. Dies muss geschehen, bevor sich die umfassende energetische Nutzung von Biomasse und ein entsprechender Markt aufgrund unzureichender Regulierung etabliert hat (REID et al. 2020).

Zwei Teilaspekte der viel umfassenderen und im Detail differenziert und fallbezogen zu beurteilenden Problematik werden im Folgenden hervorgehoben: Zum einen wird betrachtet, aus welchen Quellen die zusätzlich benötigten Volumina an Holzbiomasse stammen könnten und inwiefern diese unter umweltbezogenen und sozialen Aspekten nachhaltig zur Verfügung stehen. Zum anderen wird hinterfragt, ob die energetische Nutzung von Holzbiomasse aus Stammholz überhaupt die postulierte klimaschonende Wirkung hat (BRACK 2017).

Begrenzte Verfügbarkeit ökologisch nachhaltiger Biomasse aus Stammholz

74. Aus einzelnen Beispielen bereits erfolgreicher energetischer Nutzung von Holzbiomasse aus Stammholz kann nicht auf deren nachhaltige Skalierbarkeit auf größere Volumina geschlossen werden. Es besteht die Gefahr, dass eine stark steigende Nachfrage durch den internationalen Biomassemarkt bedient wird, da beste-

hende Nachhaltigkeitskriterien die verfügbaren Volumina aus deutscher und europäischer Produktion begrenzen. Bereits in der heutigen noch überschaubaren Nutzung spielt der internationale Markt eine wichtige Rolle. Nordamerika ist global gesehen ein bedeutender Produzent von Holzpellets, während Europa von globaler Bedeutung für den Verbrauch ist (THRÄN et al. 2019).

Ein bekanntes Beispiel für den Import und die umfangreiche Verfeuerung von Holzpellets sind die Anlagen im britischen Drax. Dort wurden mehrere Kohlekraftwerksblöcke zunächst auf eine Ko-Verfeuerung, dann auf die ausschließliche Nutzung von Biomasse umgerüstet. Das Kraftwerk importierte 2017 59 % der eingesetzten Pellets aus den USA und 24 % aus Kanada (Drax Group 2018). Insbesondere in den USA wurde die Vermarktung von Wäldern und Plantagen dadurch begünstigt (DALE et al. 2017). Im Süden der USA produzierte Pellets werden auch aus Stammholz gefertigt (WALKER et al. 2015, S. 21). Auch in anderen Ländern wie Frankreich, Belgien, Dänemark oder den Niederlanden befinden sich neue holzbetriebene Kraftwerke im Bau oder werden bestehende Kohlekraftwerke für eine Ko-Verfeuerung von Holzbiomasse umgebaut (OSTERATH 2017; REID et al. 2020, S. 7).

Vor diesem Hintergrund ist eine unzureichend regulierte Ausweitung der energetischen Holzbiomassenutzung aus Stammholz kritisch zu hinterfragen, auch wenn sie von beteiligten Akteuren aufgrund ihres pflanzlichen Ursprungs als nachhaltig bezeichnet wird. Sowohl die Volumina, welche unter Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit realistisch zur Verfügung stehen können, als auch die dafür infrage kommenden nationalen, europäischen oder globalen Quellen sind zu evaluieren. Ebenso müssen die ökologischen Auswirkungen der Nutzung und die dabei anzusetzenden Kriterien genau geprüft werden.

75. Der pauschale Verweis auf regulatorisch festgelegte Nachhaltigkeitskriterien in der Versorgungskette mit Holzbiomasse ist dabei auf dem globalen Markt häufig nicht zielführend. Bestehende Nachhaltigkeitskriterien sind oft nicht ausreichend, um ökologische und soziale Produktionsbedingungen effektiv zu regeln. Dies ist insbesondere dort der Fall, wo starke ökonomische Anreize zur Nutzung von Biomasse bestehen. Entsprechende Landflächen würden zu einer ökonomisch zunehmend attraktiven Ressource. Wie das Beispiel der Nachfrage nach Palmöl durch die europäische Lebensmittelindustrie zeigt, können negative Auswirkungen, die sich aus der Nachfrage des internationalen Marktes ergeben, trotz einer Vielzahl von Bestimmungen oft nicht

effektiv verhindert werden. Auch am Entwurf der neuen Erneuerbare-Energien-Richtlinie wurde von Seiten der Wissenschaft kritisiert, dass die dort enthaltenen Nachhaltigkeitskriterien hinter jene der alten Richtlinie zurückfallen. Dies gilt vor allem für die Berücksichtigung von naturschutzfachlichen Belangen bei der Nutzung von Holzbiomasse aus Wäldern (SEARCHINGER et al. 2018; HENNENBERG et al. 2018). Auch enthalten die Nachhaltigkeitskriterien nur schwache Bestimmungen zur Klimawirkung der Biomassenutzung.

Kohlenstoffbilanz der energetischen Nutzung von Holzbiomasse

76. Die energetische Nutzung von Holzbiomasse zum Zwecke des Klimaschutzes basiert häufig auf der Annahme, dass diese teilweise oder weitgehend emissionsneutral sei, weil die Verbrennung nur so viel CO₂ emittiert, wie die Pflanze im Wachstum bereits aufgenommen hat oder künftig beim Nachwachsen aufnehmen wird (HABERL et al. 2012). Diese intuitiv einleuchtenden Überlegungen halten einer genaueren wissenschaftlichen Analyse jedoch oft nur eingeschränkt stand (NORTON et al. 2019). Sie sind meist dann berechtigt, wenn es sich um sehr produktive Kulturen mit kurzer Umtriebszeit oder um die Nutzung von Rest- und Abfallholz handelt (TER-MIKAELIAN et al. 2015; BOOTH 2018). Für die energetische Nutzung von frischem Stammholz aus Wäldern oder langsam wachsenden Plantagen hingegen sieht die Kohlenstoffbilanz in der Regel anders aus. Hierfür sind mehrere Faktoren verantwortlich, welche jedoch in Bilanzierungen oft nicht ausreichend berücksichtigt werden.

77. Es ist grundsätzlich festzustellen, dass Holz im Vergleich zu Kohle, Gas und Öl der deutlich ineffizientere Energieträger ist. Bei der Verstromung in einem Biomassekraftwerk entweicht typischerweise pro erzeugter Energieeinheit 50 % mehr CO₂ als bei Kohle und ungefähr so viel CO_{2eq} wie bei Erdgas (SEARCHINGER et al. 2018, basierend auf LAGANIÈRE et al. 2017 und IPCC 2006, Kap. 2., Tab. 2.2). Bei Verfeuerung von Biomasse entweicht am Schornstein daher zunächst mehr CO₂ in die Atmosphäre als dies bei einer vergleichbaren fossil betriebenen Anlage der Fall wäre. Der postulierte klimaschonende Effekt bezieht sich somit vollständig auf die Kohlenstoff-Gesamtbilanzierung und auf die Erwartung, dass die emittierte Menge an CO₂ vorher oder nachher der Atmosphäre wieder entnommen wird.

Die Tatsache, dass Biomasse vor ihrer Verfeuerung durch die Aufnahme von CO₂ zugewachsen ist und die Vegetation somit als natürliche Kohlenstoffsенke wirkt, bedeu-

tet jedoch nicht zwingend, dass dieser Kohlenstoff ein CO₂-Guthaben für die klimaneutrale energetische Nutzung darstellt. Die natürliche Senkenwirkung der globalen Vegetation ist bereits in Modellen zur Projektion der Erderwärmung und damit der Formulierung der Klimaziele berücksichtigt, und zwar in der Sensitivität des Klimasystems gegenüber Emissionen (Tz. 9). Lediglich die über die natürliche Senkenwirkung hinaus zusätzlich anthropogen geschaffenen Senken (Abschn. 2.3.3.1) sind CO₂-Guthaben zur potenziellen Nutzung. Das reine Vorliegen einer Senke ist kein ausreichendes Kriterium.

Die energetische Nutzung von Holzbiomasse an einem bestimmten Standort bedeutet in der Regel daher zunächst die Aufnahme einer „Kohlenstoff-Schuld“, welche erst nachfolgend durch das Nachwachsen des Waldes oder der Plantage getilgt wird. Allerdings kann es Jahrzehnte dauern, bis CO₂-Emissionen, die durch die Stammholznutzung entstanden sind, der Atmosphäre im Nachgang wieder entzogen werden. Bis zum Abbau der Schuld können je nach Art der Anpflanzung zwischen einem Jahrzehnt (bei schnellwachsenden Plantagen) bis zu einem Jahrhundert (bei Wald der temperierten Zone) vergehen. Auf der Zeitskala einiger Jahrzehnte kann die energetische Nutzung von Stammholz aus bestehenden Wäldern, das speziell für diesen Zweck geschlagen wird, daher im Vergleich zur Nutzung von fossilen Energieträgern zu einer tatsächlichen Zunahme von Treibhausgasen in der Atmosphäre führen. Treibhausgasinsparungen werden erst nach einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten erbracht (AGOSTINI et al. 2014; SEARCHINGER et al. 2018). Wissenschaftlich wird von der Zeitspanne für eine „Kohlenstoff-Rückzahlung“ gesprochen („carbon payback time“) (STERMAN et al. 2018). Erst danach ergibt sich unter günstigen Umständen eine positive Bilanz. Diese bereits heute anzurechnen, heißt aber, sie weit vor der tatsächlichen Tilgung der Schuld zu bilanzieren.

78. Weiterhin wird oft angeführt, dass die denkbare künftige Kopplung der energetischen Nutzung von Biomasse mit CCS zu einer deutlich günstigeren Kohlenstoffbilanz führe. Auch hier stellt sich die Frage nach der ökologischen Verträglichkeit der benötigten Biomassmenge sowie nach der einzusetzenden CCS-Technik, für die es bislang keine Umsetzung im größeren Maßstab gibt (s. Abschn. 2.3.3). Der Fall einer Biomassenutzung zur Herstellung von Pyrolyseprodukten wie Pflanzenkohle zur Ausbringung in Böden ist hier sicherlich die aus Klima- und Umweltsicht attraktivste Variante. Die Problematik erfordert jedoch im Einzelnen genaue Bilanzierungen (SCHMIDT, H.-P. et al. 2018).

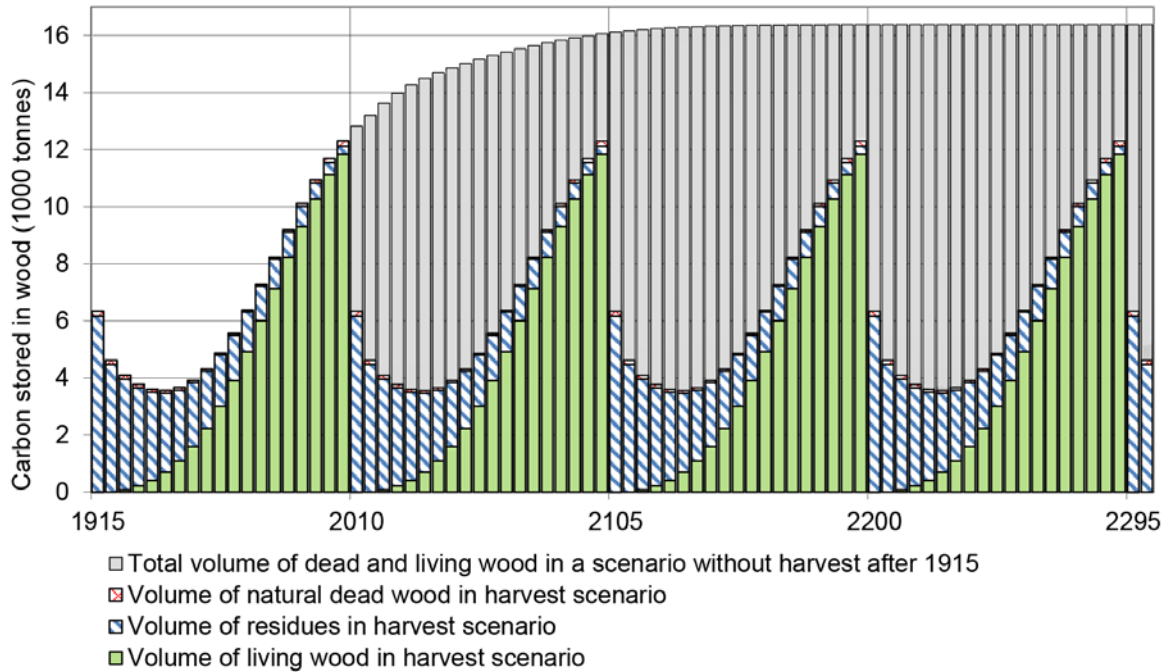
79. In die Kohlenstoffbilanz sollte darüber hinaus nicht die absolute Größe einer anthropogen erzeugten Senke eingehen, sondern lediglich ihre Differenz zu einer alternativen Nutzung der Landfläche. Dies gilt insbesondere für den Fall des Weiterbestands bestehender Biomasse ohne Nutzung, der mitunter eine größere Senkenwirkung als die energetische Nutzung haben kann. Insbesondere in Zentraleuropa sind Wälder durch jahrhundertelange Nutzung oft von ihrem maximal möglichen Kohlenstoffgehalt entfernt. Sie sequestrieren also weiterhin CO₂. Zwar wächst ein nach Einschlag verjüngter Wald mit größerer Rate, er enthält aber insgesamt weniger Kohlenstoff. Nicht die Senkenwirkung einer neuen Plantage, sondern deren Differenz zur zuvor bestehenden Vegetation ist entscheidend. Abbildung 2-9 veranschaulicht, dass der Kohlenstoffgehalt einer Fläche Wald, die regelmäßig gerodet wird, geringer ausfällt als bei einem unbewirtschafteten Wald (HOLTSMARK 2012).

Bei einer Nutzung des geschlagenen Holzes kann sich jedoch trotzdem prinzipiell eine positive Treibhausgasbilanz einstellen. So kann für langlebige Holzprodukte, die energie- bzw. treibhausgasintensive Produkte ersetzen, eine positive Treibhausgasbilanz entstehen, obwohl der Kohlenstoffvorrat im Wald durch den Holzeinschlag abgesenkt wird (LIPPKE et al. 2010; JOHNSTON und RADELOFF 2019). Diese ist von der CO₂-Speicherleistung der Holzprodukte sowie ihren Substitutionseffekten abhängig, also davon, welchen Rohstoff bzw. welches Produkt das Holz ersetzt (HENNENBERG et al. 2019). Für die energetische Nutzung von Stammholz entfällt durch die Verbrennung jedoch eine Kohlenstoffspeicherung. Mit dem Ansatz des CO₂-Speichersaldos lassen sich alternative Nutzungsszenarien in die Kohlenstoffbilanz von Holzprodukten einbeziehen. Er bilanziert die Menge an CO₂ pro Kubikmeter geerntetem Holz, die aufgrund von Waldbewirtschaftung und Holznutzung auf Waldflächen oder in Holzprodukten zusätzlich gespeichert bzw. nicht gespeichert wird (ebd).

80. Ein weiteres oft vorgebrachtes Argument ist, dass die Bilanz über mehrere Schläge eines Landes bzw. das ganze Land zu erstellen sei: Wenn man an einer Stelle Holz einschlagen würde, wüchse dies an anderer Stelle bereits nach. Für bewirtschaftete Wälder bedeutet dies jedoch lediglich, dass nach der Aufnahme einer Kohlenstoffschuld an einer Stelle zu einem späteren Zeitpunkt an anderer Stelle eine weitere Schuld aufgenommen wird, auch wenn die ursprüngliche Kohlenstoffschuld möglicherweise zum Teil ausgeglichen wird. Die Tilgung eines Kohlenstoffkredits durch die Aufnahme eines weiteren

o **Abbildung 2-9**

Der Kohlenstoffgehalt von Wäldern in Abhängigkeit von ihrer Bewirtschaftung



Die Abbildung zeigt die Entwicklung des Kohlenstoffvorrats in toter und lebender Holzbiomasse auf einer Fläche mit Kahlschlag in den Jahren 2010, 2105, 2200 und 2295 (grüne, blaue und rote Balken) sowie ohne Holzeinschlag nach 1915 (graue Balken).

Quelle: HOLTSMARK 2012

Kredits bedeutet in der Gesamtbilanz das Fortbestehen einer Schuld, das heißt eines verringerten Gesamtbestands von Kohlenstoff an der Landoberfläche. Wird kein Einschlag vorgenommen, bleibt der Kohlenstoffvorrat erhalten (HOLTSMARK 2012).

81. Ein weiterer Faktor, welcher in Kohlenstoffbilanzierungen oft unzureichend abgebildet wird, sind die räumlichen Verdrängungseffekte, welche durch die Nutzung von Landfläche für die Produktion von Holzbiomasse zur energetischen Verwendung entstehen können. Bei einer steigenden Nachfrage nach Holzbiomasse wird diese Option ökonomisch attraktiv und kann andere Nutzungsformen verdrängen, global gesehen beispielsweise die Nahrungsmittelproduktion, weil erhebliche Flächen für Biomasseplantagen benötigt werden. Aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung wird die Nachfrage nach Agrarprodukten steigen. Stehen Flächen, auf denen Holzbiomasse zur energetischen Nutzung angebaut wird, der Nahrungsmittelherzeugung nicht mehr zur Verfügung, werden zur

Deckung des Marktes andere Flächen, möglicherweise auch in anderen Regionen der Welt, genutzt. Untersuchungen zeigen, dass ein Einbezug der Kohlenstoffbilanz über alle betroffenen Standorte hinweg unter Berücksichtigung der räumlichen Effekte bei konstanter Nachfrage nach Produkten zu erheblich anderen, häufig deutlich schlechteren CO₂-Bilanzen führen kann als die zu eingeschränkte, aber weit verbreitete Einzelbetrachtung nur eines Standortes (SEARCHINGER et al. 2018). Dies ist eine direkte Folge der Tatsache, dass Land eine begrenzte Ressource ist und anders bewirtschaftete oder unbewirtschaftete Landflächen mitunter eine natürliche CO₂-Senke darstellen bzw. einen höheren Gehalt an Kohlenstoff aufweisen können. Diese Senken sollten im Rahmen von Klimaschutzstrategien geschützt werden.

82. Treibhausgasbilanzierungen der energetischen Holzbiomassenutzung berücksichtigen die genannten Effekte der Waldbewirtschaftung und damit die Emissionen aus der Holzentnahme jedoch oft nicht oder nicht

ausreichend (HENNENBERG et al. 2019; NORTON et al. 2019; SEARCHINGER et al. 2018). Da der Zeitraum der nächsten Jahre und Jahrzehnte zentral für das Erreichen der Pariser Klimaziele ist, ist vor allem die energetische Nutzung von eigens geerntetem Stammholz aus bestehenden Wäldern aus der Perspektive der Reduktion klimawirksamer Emissionen insgesamt meist als kontraproduktiv und ökologisch schädlich zu bewerten (MITCHELL et al. 2012).

Insbesondere aber steht die energetische Nutzung von Holzbiomasse aus Stammholz in eklatantem Widerspruch zu anderen Zielen der Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik, welche den Schutz der Integrität der Biosphäre als wichtiger, das Klima mitregulierender Komponente des Erdsystems zum Ziel haben. Recycling und sparsamer Einsatz von Papier- und Pappeprodukten sind lange etablierte Maßnahmen zum Schutz von Wäldern. Kampagnen für die Reduzierung von Einwegkaffeebechern und anderen Verpackungen und Kartonagen zielen auf einen sparsamen Umgang mit der Ressource Holz. Bemühungen um internationalen Waldschutz und Aufforstung verfolgen klimatische, ökologische und gesellschaftliche Ziele. Diese würden konterkariert, wenn im Namen von Klimaschutz und Nachhaltigkeit gleichzeitig die Ernte von Stammholz zur energetischen Nutzung ermöglicht oder gar gefördert würde.

83. Unbestritten ist, dass eine energetische Nutzung von Stammholz in geringem Umfang zusätzlich zur Verwendung von Abfall und Restbiomasse in manchen lokalen und regionalen Kontexten und unter kontrollierten Bedingungen eine umweltfreundliche Form der Energieerzeugung sein kann. Skaliert auf die für wirksame Klimamitigation notwendigen Mengen besteht jedoch die Gefahr eines Raubbaus an den oft schwach geschützten Wäldern der Erde. Dies steht im Widerspruch zur Einhaltung planetarer Belastungsgrenzen. Holzbiomasse könnte bei steigender Nachfrage im Zuge der Energiewende zu einer höchst begehrten und ökonomisch attraktiven Ressource werden. Da Landübernutzung bereits heute der hauptsächliche Grund für den voranschreitenden Verlust von Lebensräumen ist, wäre dies, vor allem auch in Anbetracht einer gleichzeitig zunehmenden Weltbevölkerung und von Bemühungen um eine weitere Nutzung von Biomasse für eine künftigen Bioökonomie, eine gefährliche Entwicklung. Biomasse ist zwar eine nachwachsende Ressource, die Wälder der Erde und die mit ihr zusammenhängenden Ökosysteme sollten aber nicht das nächste Fallbeispiel in der Übernutzung der Erde werden.

2.4 Governance: Schlüssel zur Einhaltung des CO₂-Budgets

84. Trotz breiter politischer Übereinkunft, dass das Pariser Klimaabkommen Grundlage der deutschen Klimapolitik ist, gibt es eine große Diskrepanz zur nationalen Umsetzung. So sind die deutschen Klimaziele, die bereits vor der Verabschiedung des Klimaabkommens von Paris festgelegt wurden, nicht Paris-kompatibel im Sinne eines verteilungsgerechten globalen Klimabudgets (s. Tz. 36). Obwohl das Ambitionsniveau der existierenden Ziele nicht als ausreichend zu erachten ist, werden diese nicht erreicht. So wird Deutschland im Jahr 2020 voraussichtlich seinen Beitrag zu den europäischen Klimazielen sowie möglicherweise auch das nationale Klimaziel verfehlen, den Treibhausgasausstoß gegenüber 1990 um 40 % zu reduzieren. Damit leidet die deutsche Klimapolitik sowohl an einer Ambitions- als auch an einer Umsetzungslücke (zur Unterscheidung s. Kasten 2-3).

85. In Kapitel 2.2 wurde aufgezeigt, warum glaubhafte Klimaschutzbeiträge der Vertragsstaaten Voraussetzung für die Wirksamkeit des Pariser Klimaabkommens sind. Schlüssel für eine bessere Einhaltung der Ziele und Umsetzung der Klimaschutzbeiträge ist die Klimagovernance. Darunter wird hier die Gesamtheit der Regeln und Institutionen verstanden, die für eine Umsetzung und Überprüfung der klimapolitischen Verpflichtungen sorgen. Klima- und die mit ihr verbundene Energiepolitik finden im Mehrebenensystem zwischen internationaler, supranationaler bzw. europäischer und nationaler Ebene statt. Klimapolitik ist damit ein typisches Beispiel für Multi-Level-Governance (JÄNICKE 2017, S. 110 f.). Für Deutschland ist vor allem die Klima- und Energiepolitik der EU von herausgehobener Bedeutung. Auch die deutschen Klimaziele und die deutsche Klimapolitik sind nur im Kontext des europäischen Regelungsrahmens zu verstehen. Im Folgenden wird daher zunächst die europäische und im Anschluss die nationale Klimagovernance dargestellt. Darauf basierend werden Vorschläge gemacht, wie letztere so verbessert werden kann, dass sie eine Einhaltung der Klimaziele von Paris stärker unterstützt.

2.4.1 Die Klimagovernance der EU

86. Die EU hat entschieden, unter dem Pariser Klimaabkommen einen gemeinsamen europäischen Klimaschutzbeitrag einzureichen. Als Mitgliedstaat mit dem

Kasten 2-3: Ambitionsücke und Umsetzungsücke in der Klimapolitik

Die Wirksamkeit klimapolitischer Steuerung lässt sich anhand von zwei Kriterien bewerten (s. Abb. 2-10):

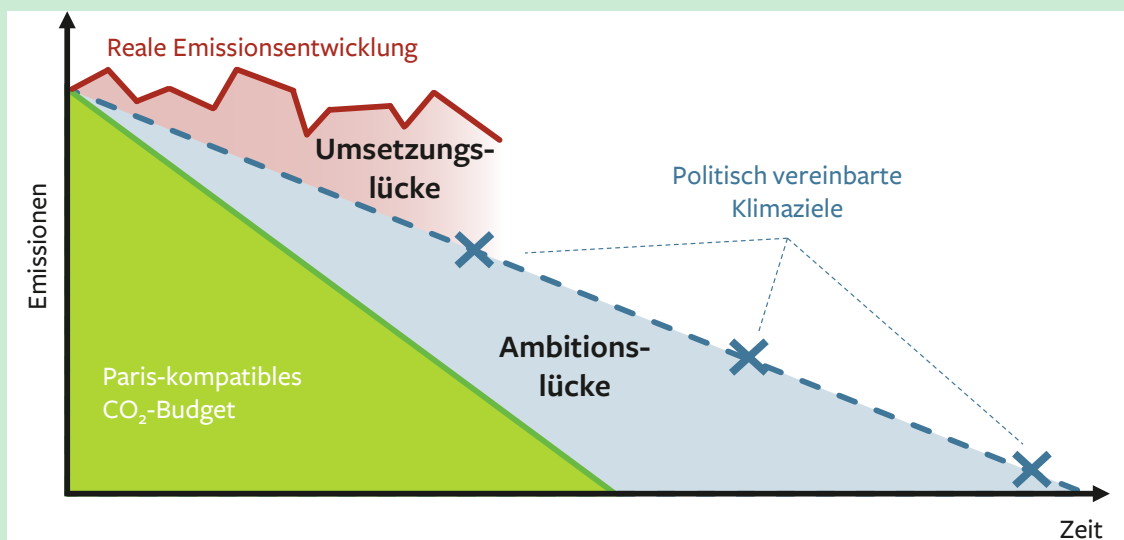
- Ambitionsniveau bzw. Ambitionsücke: Sind die existierenden Ziele ambitioniert genug und werden Zwischenziele definiert, die eine Zielerreichung wahrscheinlich machen? Inwiefern wird die Kompatibilität der nationalen Klimaschutzziele

mit einem CO₂-Budget, wie es sich insbesondere aus dem Pariser Klimaabkommen ableitet, kontinuierlich sichergestellt?

- Zielerreichung bzw. Umsetzungsücke: Werden die beschlossenen Klimaziele bei politischen Entscheidungen angemessen berücksichtigt und notwendige Klimaschutzmaßnahmen verabschiedet? Gibt es politische Mechanismen, um auf eine drohende oder bereits erfolgte (Teil-)Zielverfehlung zu reagieren?

○ Abbildung 2-10

Schematische Darstellung der Ambitions- und Umsetzungsücke in der Klimapolitik



SRU 2020

Mit dem Ambitionsniveau seiner Klima- und Energiepolitik gehörte Deutschland in der Vergangenheit zu den Vorreitern. Es besteht jedoch eine Ambitionsücke zum Klimaabkommen von Paris, weshalb die Klimaziele einer

zügigen Anpassung bedürfen (Abschn. 2.2.4.2; s. a. SRU 2016a, S. 4 f.; 2016c, S. 4 ff.). Dazu sollte auf das Kohlenstoffbudget als Messgröße für die Paris-Kompatibilität der Klimaziele zurückgegriffen werden (Tz. 109).

größten Anteil an den europäischen Emissionen (rund 21 %) trägt Deutschland eine erhebliche Verantwortung dafür, dass der europäische Reduktionsbeitrag erreicht werden kann.

Klimaziele 2020 und 2030 sowie europäische Klimaschutzverpflichtungen

87. Die EU hat sich mit dem Klima- und Energiepaket 2020 (Europäische Kommission 2008) und dem darauf aufbauenden Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 (Europäischer Rat 2014) größtenteils verbind-

liche europaweite Klima- und Energieziele gesetzt. So soll der Treibhausgasausstoß bis 2030 im Vergleich zu 1990 bisher um mindestens 40 % reduziert werden, was durch den European Green Deal im Sommer 2020 auf voraussichtlich 50 bis 55 % deutlich angehoben werden soll. Weiterhin soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch bis 2030 gemäß den bisherigen Beschlüssen mindestens 32 % betragen. Der Bruttoendenergieverbrauch als Messgröße für die Energieeffizienz soll parallel bis 2030 um mindestens 32,5 % gegenüber der Referenzentwicklung sinken (s. Tab. 2-3 zum klima-

o Tabelle 2-3

Auswahl klima- und energiepolitischer Ziele der EU bis 2030

	2018 ¹⁾	2020-Ziele	2030-Ziele (gem. informeller Einigung im Trilog)	Bemerkungen
Treibhausgasemissionen				
Treibhausgasreduktion (ggü. 1990)	23,2%	mind. 20%	mind. 40%	verbindlich
Treibhausgasreduktion im EU ETS (ggü. 2005)	29%	21%	43%	verbindlich
Treibhausgasreduktion im Nicht-ETS-Bereich (ggü. 2005)				
für EU gesamt	11,3%	10%	30%	verbindlich
für Deutschland	7,7%	14%	38%	verbindlich
Erneuerbare Energien				
Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch				
auf EU-Ebene	18%	20%	mind. 32%	verbindlich
in Deutschland	16,7%	18%	keine länderspezifischen Ziele, sondern nationale Zielbeiträge, die sich auf das verbindliche EU-Ziel addieren müssen	verbindlich
Effizienz und Verbrauch				
Verminderung des Energieverbrauchs				
auf EU-Ebene	10,1% Rückgang des Primärenergieverbrauchs ggü. 2005	um 20% (entspricht 13% Rückgang des Primärenergieverbrauchs ggü. 2005)	um mind. 32,5%	indikativ für 2020, nicht definiert für 2030
in den einzelnen EU-Mitgliedstaaten		indikative nationale Beiträge zur Zielerreichung	keine länderspezifischen Ziele, sondern nationale Zielbeiträge, die sich auf das verbindliche EU-Ziel addieren müssen	indikativ
		zudem kumulierte Endenergieeinsparungen von 1,5% pro Jahr	zudem reale kumulierte Endenergieeinsparungen von 0,8% pro Jahr	verbindlich

Quelle: BMWi 2019a, S. 31, angepasst; ¹⁾ vorläufige Zahlen laut EEA 2019b

politischen Zielkanon der EU bis 2030). Die Europäische Kommission plant derzeit, die energiebezogenen Ziele und Richtlinien im Jahr 2021 an das angehobene Klimaziel anzupassen (Europäische Kommission 2019b, S. 5).

88. Die EU operationalisiert ihr Klimaziel bis 2030 bereits als verbindliches Treibhausgasbudget um sicherzustellen, dass bis zu diesem Zeitpunkt eine Treibhausgasreduktion um 40 % im Vergleich zu 1990 erreicht wird. Rechtlich ist dies über die Klimaschutzverordnung und den EU ETS normiert. Daraus ergeben sich auch Folgen für die klimapolitischen Verpflichtungen der Mitgliedstaaten. Für die Emissionen aus LULUCF, nicht aber für die der Landwirtschaft, gelten eigene Regelungen. Mit der LULUCF-Verordnung Nr. (EU) 2018/841 wird ab 2021 unter anderem festgelegt, dass der LULUCF-Sektor im kommenden Jahrzehnt treibhausgasneutral sein muss. Im Folgenden werden primär die Emissionen jenseits der Landnutzung betrachtet.

Für Großemittenten, also hauptsächlich für Kraftwerke und Industrieanlagen sowie den EU-Flugverkehr, bildet der EU ETS das zentrale klimapolitische Instrument. Dabei werden jährliche Emissionsobergrenzen definiert, die durch die Emittenten ausgestoßen werden dürfen. Durch handelbare Emissionszertifikate wird sichergestellt, dass der Beitrag dieser Sektoren zum Treibhausgasreduktionsziel ökonomisch effizient europaweit erreicht wird. Fixe nationale Beiträge zu diesem Ziel existieren folglich nicht, da der Ort der Emissionsminderung unter anderem von den spezifischen Vermeidungskosten abhängt. Rund 42 % der EU-weiten Emissionen sind durch den EU ETS umfasst, dessen Emissionen im bisherigen Zielsystem bis 2030 um 43 % gegenüber 2005 sinken sollen.

Emissionen von kleinen Punktquellen sind nicht im EU ETS erfasst. Dies betrifft insbesondere den Verkehr, die Landwirtschaft und den Gebäudebereich, aber beispielsweise auch kleinere Industrieanlagen. Für diese nachfolgend als Nicht-ETS-Sektoren bezeichneten Emissionsquellen hat die EU im Rahmen ihrer Lastenteilungsentscheidung Nr. 406/2009/EG (engl. Effort Sharing Decision) für den Zeitraum 2013 bis 2020 und der Klimaschutzverordnung Nr. (EU) 2018/842 (engl. Effort Sharing Regulation oder Climate Action Regulation) für den Zeitraum 2021 bis 2030 verbindliche nationale Jahresobergrenzen für Treibhausgasemissionen beschlossen. Dabei wurde das europäische Ziel von -30 % bis 2030 gegenüber 2005 auf die verschiedenen Mitgliedstaaten aufgeteilt. Die Mitgliedstaaten mit höherer Wirtschaftskraft müssen am-

bitioniertere Reduktionsziele erreichen als die mit niedrigerer Wirtschaftskraft.

Deutsche Verpflichtungen im Rahmen der europäischen Klimapolitik

89. Von den europäischen Klimazielen 2020 (s. Tab. 2-3) kann Deutschland voraussichtlich nur das Erneuerbare-Energien-Ziel erreichen. Die Emissionen in den Nicht-ETS-Sektoren überschreiten voraussichtlich das Reduktionsziel und -budget (s. Kasten 2-4). Das Effizienzziel für 2020 wird ebenfalls nicht erreicht.

Die Klimaschutzverordnung für den Zeitrahmen bis 2030 fordert von Deutschland derzeit eine Senkung des Treibhausgasausstoßes in den Nicht-ETS-Sektoren um 38 % bis 2030 gegenüber 2005. Dabei werden über einen Reduktionspfad jährlich bindende Emissionszuweisungen festgelegt, aus denen sich auch ein kumulatives verbindliches Treibhausgasbudget für die deutschen Nicht-ETS-Sektoren im Zeitraum von 2021 bis 2030 berechnen lässt. Da der Ausgangspunkt dieses Pfades ab 2021 mithilfe der finalen Treibhausgasinventare des Zeitraums 2016 bis 2018 bestimmt wird, kann das Budget erst in der 2. Hälfte des Jahres 2020 abschließend berechnet werden, wenn die Daten vollständig vorliegen. Es dürfte – basierend auf den vorläufigen deutschen Treibhausgasemissionen im Jahr 2018 (EEA 2019b, S. 92) – bei etwa 3.645 Mt CO_{2eq} liegen (eigene Berechnung, basierend auf den Emissionszahlen von EEA 2019b, S. 92; 2018, S. 86).

Nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz (s. Tz. 95) sollen die Emissionen im Jahr 2030 über alle Sektoren hinweg bei rund 543 Mt CO_{2eq} liegen (s.a. Tab. 2-2). Wird angenommen, dass Emissionen der Energiewirtschaft zu 90 % und Emissionen der Industrie zu rund 75 % vom ETS gedeckt sind (analog zu Agora Energiewende und Agora Verkehrswende 2018, S. 34), dürfen die Emissionen der Nicht-ETS-Sektoren 2030 laut den zulässigen Jahresemissionsmengen des Bundes-Klimaschutzgesetzes bei rund 280,5 Mt CO_{2eq} liegen. Dies wäre nur wenig unterhalb der jährlichen Emissionszuweisung von 296,2 Mt CO_{2eq} gemäß der Klimaschutzverordnung (EEA 2019b, S. 94). Auch für die restliche Periode von 2021 bis 2030 liegt die Summe der Jahresemissionsmengen der Nicht-ETS-Sektoren laut Bundes-Klimaschutzgesetz unweit der maximalen verbindlichen Jahresemissionszuweisungen der Klimaschutzverordnung.

90. Das Ambitionsniveau des Bundes-Klimaschutzgesetzes ist damit mit den bisherigen europäischen Verpflichtungen bis 2030 kompatibel, sofern die Klimaziele und Jahresemissionsmengen eingehalten werden.

Kasten 2-4: Klimapolitische Zielverfehlungen Deutschlands und ihre finanziellen Folgen

Die deutsche Klimapolitik leidet unter einer Umsetzungslücke. So wird Deutschland voraussichtlich sein nationales Klimaziel (Tab. 2-4) verfehlen, den Treibhausgasausstoß bis 2020 um 40 % im Vergleich zu 1990 zu senken. Auch seinen europäischen Verpflichtungen wird Deutschland damit nicht gerecht werden (Tz. 89). Obwohl es nicht an politischen Bekenntnissen zu den deutschen und europäischen Klimazielen 2020

mangelte, wurde auf eine sich wiederholt abzeichnende und immer wieder projizierte Zielverfehlung nicht angemessen reagiert und es wurden keine ausreichenden zusätzlichen Maßnahmen ergriffen (DUWE et al. 2017, S. 27). Hier spiegelt sich im Bereich der Klimapolitik die auch in anderen umweltrelevanten Bereichen zu konstatierende Lücke zwischen dem abstrakten Bekenntnis zu planetaren Grenzen als Leitplanken des politischen Handelns und dem konkreten Ambitionsniveau von politischen Strategien und Programmen (SRU 2019, Tz. 256).

o Abbildung 2-11

Tatsächliche und projizierte Treibhausgasemissionen Deutschlands unter Berücksichtigung beschlossener klimapolitischer Maßnahmen (in Mt CO_{2eq})



Quelle: von LÜPKE und NEUHOFF 2019, S. 78

Die Projektionsberichte der Bundesregierung (BMUB 2015; 2017, S. 32) sahen seit 2015 eine Verfehlung des 2020-Reduktionsziels von 40 % als wahrscheinlich an (s. Abb. 2-11). Von Beobachterinnen und Beobachtern wurden die den Projektionsberichten zugrunde geleg-

ten Szenarien bzw. deren Annahmen als immer noch zu optimistisch kritisiert. Die Klimaschutzlücke wurde daher tendenziell noch unterschätzt (Agora Energiewende 2017), die reale Emissionsentwicklung lag regelmäßig über der des Projektionsberichtes (von LÜPKE

und NEUHOFF 2019, S. 77). Daneben wies auch die Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ der Bundesregierung wiederholt auf das Risiko einer Zielverfehlung hin (LÖSCHEL et al. 2019, S. Z-14). Die Bundesregierung erkannte die Umsetzungslücke in ihrem Koalitionsvertrag erstmals an (CDU, CSU und SPD 2018, S. 142), es wurde jedoch kein kurzfristiges Maßnahmenprogramm ergriffen, um diese bis 2020 zu schließen. Aus der Analyse des Zustandekommens dieser Umsetzungslücke lassen sich Schlussfolgerungen für die notwendige Ressortverantwortung und das Monitoring ziehen, so wie es im Bundes-Klimaschutzgesetz verankert sein sollte (s. Abschn. 2.4.3).

Folgen der Zielverfehlung aus Budgetsicht und mögliche finanzielle Risiken

Eine Umsetzungslücke bei der Erreichung eines Punktziels wie des Treibhausgasreduktionsziels 2020 hat gravierende Folgen. So ist eine deutliche Steigerung des jährlichen Reduktionsfortschritts im Vergleich zum letzten Jahrzehnt notwendig (LÖSCHEL et al. 2019, S. Z-11). Die durchschnittliche Treibhausgasreduktion betrug zwischen 2010 und 2017 nur rund 5 Mt CO_{2eq} pro Jahr, eine Rate die etwa verfünffacht werden muss, wenn die Klimaziele der Bundesregierung 2030 eingehalten werden sollen (eigene Rechnung, basierend auf Emissionszahlen von UBA 2019a).

Insbesondere unter Berücksichtigung des Budgetgedankens bedarf es bei Feststellung einer Umsetzungslücke zudem einer zusätzlichen Verschärfung bzw. der Übererfüllung zukünftiger Ziele: Wurde in der Vergangenheit bereits ein Großteil eines möglichen Paris-kompatiblen Budgets aufgebraucht, ist eine umso ambitioniertere Reduktion in der Zukunft nötig, um selbiges dennoch einzuhalten. Mit der geringen Wirksamkeit der Klimapolitik des letzten Jahrzehnts und dem Verfehlen der Zwischenziele gingen ohnehin knappe Spielräume verloren, die notwendige Dekarbonisierung und die damit verbundene Transformation möglichst sozialverträglich und volkswirtschaftlich effizient zu gestalten (Tz. 37).

Während die Verfehlung der nationalen Klimaziele der Bundesregierung zunächst keine unmittelbaren rechtlichen Folgen entfaltet, sieht dies für die europäischen Klimaschutzverpflichtungen anders aus. So verfehlt Deutschland nach aktuellem Stand seinen Beitrag zur Lastenteilungsentscheidung, da die jährlichen Emissionen in den Nicht-ETS-Sektoren die europäischen Vorgaben überschreiten. Trotz Übererfüllung in den Anfangsjahren wird Deutschland sowohl das Gesamtbudget an erlaubten Emissionen über den Zeitraum von

2013 bis 2020 als auch sein europäisches Treibhausgasreduktionsziel im Jahr 2020 voraussichtlich nicht einhalten können (EEA 2019b, S. 34). Tritt dieser Fall ein, muss Deutschland zwingend Emissionserlaubnisse von anderen Mitgliedstaaten erwerben, die ihr Reduktionsziel im selben Zeitraum übererfüllt haben. Damit könnten nach Schätzungen bis 2020 maximal Kosten im dreistelligen Millionenbereich (GORES und GRAICHEN 2018) verbunden sein.

Da die europäische Klimaschutzverordnung für den Zeitraum 2021 bis 2030 ebenfalls verpflichtende jährliche Emissionsbudgets für den Nicht-ETS-Bereich definiert (Tz. 88), droht auch hier eine deutliche Verfehlung, sollte das Klimaschutzprogramm 2030 wie prognostiziert (HARTHAN et al. 2020) nicht die erhoffte und notwendige Minderungswirkung erbringen.

Als Flexibilitätsemissionen kommen für Deutschland nur die laut Annex III der Klimaschutzverordnung auf 22,3 Mt CO_{2eq} begrenzte Anrechnung von Überschüssen aus dem LULUCF-Bereich und der Zukauf von Emissionserlaubnissen anderer Mitgliedstaaten infrage. Der LULUCF-Bereich könnte in Deutschland im nächsten Jahrzehnt jedoch von einer Treibhausgassenke zu einem Emittenten werden (BMU 2019c, S. 190). Die primäre Flexibilitätsoption ist daher in dem Zukauf überschüssiger Emissionszuweisungen anderer Mitgliedstaaten zu sehen. Es ist aber unklar, wie viele Überschüsse zur Verfügung stehen werden und zu welchem Preis andere Mitgliedstaaten zu dieser Übertragung bereit wären. Denkbar ist auch, dass klimapolitische Vorreiter ihre überschüssigen Emissionszuweisungen stilllegen, so wie Schweden dies bereits in der Vergangenheit getan hat (APPUNN 2019). Aussagen über die möglichen Kosten, die mit dem Erwerb entsprechender Emissionszuweisungen verbunden sind, weisen daher ein hohes Maß an Unsicherheit auf, belaufen sich nach Schätzungen ohne Einbezug der Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 aber auf bis zu 62 Mrd. Euro im Zeitraum 2021 bis 2030 (Agora Energiewende und Agora Verkehrswende 2018, S. 28). Damit sind sie auch ein Risiko für den Bundeshaushalt.

Um das Risiko kostspieliger Umsetzungslücken der Klimapolitik zu verringern, wurden die Ressortverantwortung durch das Bundes-Klimaschutzgesetz und die dort vorgesehenen Jahresemissionsmengen bis 2030 gestärkt. Eine Aufwertung des Expertenrates für Klimaschutz könnte darüber hinaus dazu beitragen, das Entstehen von Umsetzungslücken zukünftig von vornherein zu vermeiden (s. Abschn. 2.4.3).

Dies setzt aber voraus, dass es zu keiner Umsetzungslücke kommt. Nach einer Abschätzung unter Einbezug der Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 werden die Emissionen in den Nicht-ETS-Sektoren bis 2030 um rund 27 % gegenüber 1990 gesenkt, womit eine Handlungslücke von rund 11 Prozentpunkten verbleibt (HARTHAN et al. 2020). Aus diesem Grund kommt der erfolgreichen Umsetzung adäquater Maßnahmenprogramme für die einzelnen Sektoren eine zentrale Bedeutung zu.

Governance-Verordnung

91. Im Dezember 2018 wurde die Governance-Verordnung Nr. (EU) 2018/1999 für die Energieunion und den Klimaschutz beschlossen. Diese schafft Berichts- und Monitoringpflichten für die Klima- und Energieziele der Mitgliedstaaten. Die Europäische Kommission setzt dabei ähnlich wie das Pariser Klimaabkommen auf die Wirksamkeit von Naming und Shaming. Die Logik des Governance-Systems und der Berichtspflichten der Nationalstaaten ist daher grob mit den NDCs auf der internationalen Ebene zu vergleichen (SCHLACKE und LAMMERS 2018, S. 426).

Das Treibhausgasreduktionsziel bzw. -budget ist über die Kombination aus Klimaschutzverordnung und EU ETS für die einzelnen Mitgliedstaaten rechtlich verbindlich. Jedoch tragen die Staaten eine gemeinsame Verantwortung für die Erreichung des europäischen Ausbauziels für erneuerbare Energien 2030 (SCHLACKE und LAMMERS 2018, S. 425). Die nationalen Beiträge zu diesem Ziel bestimmen die Mitgliedstaaten zunächst selbst.

Bei dem Energieeffizienzziel 2030 handelt es sich um ein rein indikatives Ziel (ebd.). Da für Mitgliedstaaten verbindliche Ziele für erneuerbare Energien und Energieeffizienz fehlen, hängt das Ergreifen von entsprechenden Maßnahmen und die europäische Zielerreichung damit besonders von möglichen Monitoring- und Evaluationsverfahren ab. Nur so lässt sich feststellen, ob die Summe der nationalen Anstrengungen zur Erreichung der europäischen Ziele ausreicht.

92. Zentrales Instrument der Governance-Verordnung sind die durch die Mitgliedstaaten verpflichtend zu erstellenden integrierten nationalen Energie- und Klimapläne (National Energy and Climate Plans – NECPs). Diese werden jeweils für zehn Jahre erstellt. Der erste Planungszeitraum ist von 2021 bis 2030, die abschließenden Pläne waren zum Ende des Jahres 2019 einzureichen. Die Governance-Verordnung verwirklicht durch die NECPs ausführliche Monitoring- und Berichtspflich-

ten der Mitgliedstaaten sowie eine Bewertung und Überwachung des energie- und klimapolitischen Fortschritts durch die Europäische Kommission (PAUSE und KAHLES 2019, S. 11). Damit sollen zunächst die Kohärenz und Vereinbarkeit nationaler Strategien sowie die Erreichbarkeit der europäischen Ziele für 2030 sichergestellt werden (Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften et al. 2018, S. 26). Mithilfe eines sogenannten Lückenschließungsmechanismus (gap-filling-mechanism) will die Europäische Kommission sicherstellen, dass die gemeinsamen Ziele erreicht werden können, wenn ein Mangel an Ambition in den NECPs oder eine mangelnde Umsetzung derselben festgestellt wird. So ist unter anderem vorgesehen, dass die Europäische Kommission bei einer Umsetzungslücke zur Erreichung des Erneuerbare-Energien- oder Energieeffizienzziels den Mitgliedstaaten Empfehlungen geben kann. Die mögliche Sanktionierung durch die Europäische Kommission ist je nach Ziel unterschiedlich. Ein Vertragsverletzungsverfahren scheint jedoch nur denkbar, wenn evident unzureichende Maßnahmen zur Erreichung des Erneuerbare-Energien-Ziels ergriffen werden (SCHLACKE und LAMMERS 2018, S. 433–435).

In Deutschland ist aktuell das Bundeswirtschaftsministerium für die Erstellung des NECP verantwortlich und aggregiert in dieser Funktion die existierenden nationalen energie- und klimapolitischen Ziele und Maßnahmen. Der erste NECP-Entwurf wurde der Europäischen Kommission Ende 2018 übermittelt, die im Juni 2019 eine vorläufige Bewertung der Entwürfe der Mitgliedstaaten vorlegte. Sie war der Auffassung, dass die im NECP-Entwurf Deutschlands enthaltenen Maßnahmen nicht ausreichend sind, um die Treibhausgasreduktionsziele 2030 sicher zu erreichen (Europäische Kommission 2019a). Der Entwurf des deutschen NECP blieb allerdings zwangsläufig vage, da zum Zeitpunkt der Veröffentlichung auf Seiten der Bundesregierung und des Bundestages noch keine Einigung über das Bundes-Klimaschutzgesetz und das Klimaschutzprogramm 2030 hatte erzielt werden können.

Zukünftig sieht die Governance-Verordnung ab 2023 alle zwei Jahre die Vorlage eines Fortschrittsberichts über die Zielerreichung durch die Mitgliedstaaten vor. Außerdem kann der NECP im Jahr 2023 einmalig aktualisiert und sein Ambitionsniveau angehoben werden.

EU-Langfriststrategie bis 2050 und Agenda der neuen Europäischen Kommission

93. Bislang lautet das Ziel der EU, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 % zu senken. Aktuell wird auf EU-Ebene die Langfriststrategie bis 2050 ver-

handelt (UBA 2018a). Diese soll den Anforderungen des Pariser Klimaabkommens und insbesondere dem 1,5°-Ziel angepasst werden, für das der bisherige Zielkorridor von 80 bis 95 % nicht ausreichend ist (Europäische Kommission 2018a, S. 17). Der Europäische Rat hat im Dezember 2019 beschlossen, das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050 zu unterstützen (Europäischer Rat 2019, S. 1). Die Regierung von Polen konnte sich diesen Schlussfolgerungen des Rates noch nicht anschließen, weshalb das Thema auf dem Ratsgipfel im Juni 2020 nochmals aufgerufen wird. Ziel ist es, bis zum Spätsommer 2020 eine finale Einigung zu erzielen, damit die Langfriststrategie noch in den erneuerten europäischen NDC 2020 eingehen kann. Als politischer Kompromiss, um ein verbindliches EU-weites Treibhausgasneutralitätsziel 2050 zu erreichen, wäre auch eine weitere Differenzierung der Klimaschutzverpflichtungen denkbar: Während es beispielsweise Polen erlaubt werden könnte, die Treibhausgasneutralität erst nach 2050 zu erreichen, würden Vorreiterstaaten aus Westeuropa bereits vor 2050 eine negative Emissionsbilanz aufweisen müssen, um einen Ausgleich von Senken und Emissionen herzustellen (GEDEN und SCHENUIT 2019, S. 3).

Mit dem European Green Deal hat die neue Europäische Kommission ambitionierten Klimaschutz zum Kern ihrer politischen Agenda erklärt. Neben der Treibhausgasneutralität 2050 hat sie sich die Anhebung des Ambitionsniveaus der Klimasziele 2030 zur Aufgabe gemacht. Dazu soll das Treibhausgasreduktionsziel auf 50 bis 55 % angehoben werden. In der Folge würden voraussichtlich der EU ETS und die Klimaschutzverordnung entsprechend überarbeitet werden müssen. Es ist anzunehmen, dass auch die deutschen Emissionszuweisungen laut Klimaschutzverordnung sinken. Dies würde bedeuten, dass das deutsche Klimaziel 2030 und die daraus abgeleiteten Sektorziele nicht nur inkompatibel mit dem Klimaabkommen von Paris wären, sondern voraussichtlich auch aus europarechtlicher Sicht angepasst werden müssten (s. Tz. 89). Das Bundes-Klimaschutzgesetz sieht für einen solchen Fall vor, dass die sektoralen Jahresemissionsmengen angepasst werden (s. Tz. 96). Werden jedoch nicht rechtzeitig entsprechend ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen ergriffen, droht eine neuerliche Zielverfehlung mit entsprechenden finanziellen Risiken (s. Kasten 2-4).

In dem durch die Europäische Kommission vorgelegten Entwurf eines europäischen Klimagesetzes könnten auch Mechanismen zur künftigen Anhebung des Ambitionsniveaus in Anpassung an das Pariser Klimaabkommen und ein verstärktes unabhängiges Monitoring verankert

werden (MEYER-OHLENDORF und MEINECKE 2018, S. 26).

2.4.2 Nationale Klimagovernance

94. Die Bundesregierung hat sich mit dem Integrierten Energie- und Klimaprogramm 2007 (Bundesregierung 2007) zum Ziel gesetzt, den Treibhausgasausstoß bis 2020 um 40 % im Vergleich zu 1990 zu senken. Dieses Ziel wurde im Energiekonzept 2010 bekräftigt (BMWi und BMU 2010) sowie von allen darauffolgenden Bundesregierungen anerkannt.

In der Folge hat sich in Deutschland eine differenzierte Architektur an Klima- und Energiezielen (s. Tab. 2-4) sowie an Monitoring ausgebildet. Herausgehobene klimapolitische Bedeutung hat insbesondere der 2016 von der Bundesregierung beschlossene Klimaschutzplan 2050, der die deutschen Klimasziele konkretisiert, strategische Handlungsfelder benennt und für 2030 sektorale Emissionsziele definiert (s. Abschn. 2.2.4.3). Es ist eine regelmäßige Überprüfung und Fortschreibung des Klimaschutzplans vorgesehen. Daneben wird der Plan wissenschaftlich begleitet, wofür im Jahr 2019 der Lenkungsreis der Wissenschaftsplattform Klimaschutz eingesetzt wurde.

Im jährlichen Klimaschutzbericht informiert die Bundesregierung über ihren Fortschritt zur Erreichung der Treibhausgasreduktionsziele. Daneben legt sie alle zwei Jahre einen Projektionsbericht im Rahmen europäischer Verpflichtungen vor. Dieser enthält Szenarien zur zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen und bewertet hierfür die Wirksamkeit bereits beschlossener und geplanter Klimaschutzmaßnahmen. Trotzdem zeigte die deutsche Politik wiederholt Umsetzungslücken (s. a. Kasten 2-4). Die Schwäche der deutschen Klimapolitik wurde bislang auch auf die unzureichende Steuerung, Verbindlichkeit und Einbeziehung des Gesetzgebers zurückgeführt. So wurden beispielsweise die Energie- und Klimaziele als Teil des Energiekonzepts 2010 von der Regierung beschlossen, jedoch nicht gesetzlich verabschiedet. Der fehlende Parlamentsbeschluss und die fehlende Einbindung von gesellschaftlichen Stakeholdern erschwerte die Durchsetzung der Ziele und die Verabschiedung notwendiger Klimaschutzmaßnahmen (DUWE et al. 2017, S. 5). Die deutschen Klimaziele boten insgesamt zu wenig Rechts- und Planungssicherheit (RODI 2017, S. 753). Bereits in der Vergangenheit hatten zahlreiche Akteure daher darauf hingewiesen, dass die Verabschiedung eines nationalen Klimaschutzgesetzes helfen könnte, die bisherige Steu-

o Tabelle 2-4

Auswahl klima- und energiepolitischer Ziele Deutschlands

	Status Quo (2018)	2020	2030	2040	2050
Treibhausgasemissionen					
Treibhausgasemissionen (ggü. 1990)	- 30,8 % ¹⁾	mind. - 40 %	mind. - 55 % sektoral aufgeteilt als Jahresemissionsmengen im KSG	mind. - 70 % (KSP 2050)	treibhausgasneutral (KSG) - 80 bis - 95 % (KSP 2050)
Erneuerbare Energien					
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	16,7 % ²⁾	18 %	30 %	45 %	60 %
Anteil am Bruttostromverbrauch	37,8 % ²⁾	mind. 35 %	mind. 50 % EEG 2017: 40 bis 45 % bis 2025	mind. 65 % EEG 2017: 55 bis 60 % bis 2035	mind. 80 %
Effizienz und Verbrauch					
Primärenergieverbrauch (ggü. 2008)	- 7,9 % ³⁾	- 20 %			- 50 %
Bruttostromverbrauch (ggü. 2008)	- 3,9 % ³⁾	- 10 %			- 25 %
Endenergieproduktivität (2008-2050)	1,0 % pro Jahr (2008-2017)	2,1 % pro Jahr (2008-2050)			

Quelle: BMWi 2019a, S. 16, angepasst; ¹⁾„Klimabilanz 2018: 4,5 Prozent weniger Treibhausgasemissionen“, gemeinsame Pressemitteilung von UBA und dem BMUB vom 2. April 2019; ²⁾ UBA 2019e; ³⁾ BMWi 2019b; AGE 2019

erungsschwäche der deutschen Klimapolitik zu verringern (DUWE et al. 2017; von LÜPKE und NEUHOF 2019; RODI 2017; SRU 2013, S. 132).

Bundes-Klimaschutzgesetz als Meilenstein der deutschen Klimapolitik

95. Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz, das im November 2019 vom Deutschen Bundestag beschlossen wurde, bekommt die Klimapolitik in Deutschland erstmals eine rechtsverbindliche Grundlage. Das vom Kabinett verabschiedete Klimaschutzprogramm 2030, welches aus zahlreichen sektoralen Maßnahmen und dem

nationalen Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) besteht, soll die Zielerreichung des Treibhausgasreduktionsziels von 55 % bis 2030 sicherstellen (BMU 2019b; zum Verhältnis von Budgetansatz und Klimaschutzinstrumenten s. Kasten 2-5). Der SRU begrüßt die Verabschiedung des Bundes-Klimaschutzgesetzes ausdrücklich. Mit dem Gesetz rückt die Bedeutung von Klimazielen, klaren Verantwortlichkeiten zur Umsetzung sowie die regelmäßige Überprüfung des Reduktionsfortschritts vermehrt in den Fokus der politischen Debatte. Klimaschutzgesetze können dazu beitragen, Ziele, Planung und Monitoring des Klimaschutzes verbindlicher zu regeln.

Kasten 2-5: Das CO₂-Budget als Maßstab politischer Klimaschutzmaßnahmen

Unabhängig davon, welche politischen Maßnahmen zur nationalen und europäischen Umsetzung des Pariser Klimaabkommens gewählt werden, sollten diese in Einklang mit dem unter Berücksichtigung von Aspekten der Verteilungsgerechtigkeit naturwissenschaftlich abgeleiteten CO₂-Budget stehen. Um die Paris-kompatible Umsetzung zu prüfen, sollte das CO₂-Budget auch dann als zusätzliche Bewertungsgrundlage politischer Instrumente herangezogen werden, wenn bereits andere Ziele oder Maßstäbe auf nationaler oder europäischer Ebene bestehen (s. Kap. 2.5). Mit dem Pariser Klimaabkommen hat sich die Bundesrepublik 2016 verpflichtet, die nationale Politik unterschiedlicher Bereiche und Sektoren auf das Abkommen auszurichten.

In der aktuellen klimapolitischen Debatte spielen Instrumente für eine verstärkte CO₂-Bepreisung eine bedeutende Rolle. Die Einführung einer CO₂-Bepreisung kann ein klimapolitisches Instrument sein, wobei auch andere Instrumente bestehen und selbst eine ambitionierte Bepreisung alleine nicht ausreichen würde. Sie müsste durch weitere Maßnahmen flankiert werden, die neben klimapolitischen Zielen weitere sektorspezifische Ziele berücksichtigen, wie die Förderung energetischer Sanierungen oder den Ausbau öffentlicher Verkehrsinfrastruktur (BACH et al. 2019a). Durch die Integration verschiedener sektorspezifischer Politiken können zu den klimapolitischen Zielen auch gesamtgesellschaftliche Ziele, wie die Steigerung der Lebensqualität oder der Verkehrssicherheit, erreicht werden. Dennoch kommt der Bepreisung eine wichtige Bedeutung zu, da sich die gegenwärtige Belastung durch Abgaben und Umlagen weder konsistent an den mit der Nutzung verbundenen CO₂-Emissionen noch am Energiegehalt der Energieträger orientiert (SRU 2019, S. 122; KEMFERT et al. 2019a). Heiz- und Kraftstoffe, für die überwiegend fossile Energieträger eingesetzt werden, müssten demnach stärker bepreist werden (KEMFERT et al. 2019a; 2019b; BACH et al. 2019a; SRU 2019). Bislang leisten die Sektoren Gebäude und Verkehr gegenüber dem Stromsektor nur einen geringen Beitrag zum Klimaschutz (für einen Vergleich der prozentualen und absoluten Emissionsniveaus s. BMU 2019a, S. 8). Das Erreichen der Sektorziele bis 2030 ist ohne weitere Maßnahmen für die Sektoren Gebäude und Verkehr unwahrscheinlich (BACH et al. 2019a, S. 32 f.).

Eine CO₂-Bepreisung ist grundsätzlich über einen Emissionsrechtehandel oder eine Besteuerung möglich. Beide Instrumente verfolgen das Ziel, Emissionen zu reduzieren, um klimapolitische Ziele zu erreichen. Zwischen den Instrumenten bestehen jedoch theoretische und praktische Unterschiede (KEMFERT et al. 2019b; 2019c; BACH et al. 2019a). Grundsätzliche Vorteile eines Emissionshandels liegen in der ökologischen Treffsicherheit und statischen ökonomischen Effizienz. Die ökologische Treffsicherheit ergibt sich aus der Mengensteuerung des Instruments: Die Reduktionsziele können durch eine korrekte Festlegung der Menge an Zertifikaten (Cap) in den betreffenden Sektoren mit großer Sicherheit erreicht werden, was an die Mengenlogik von Budgets anschließt. Die statische ökonomische Effizienz (Kosteneffizienz) ergibt sich aus dem Marktmechanismus des Emissionshandels: Durch den freien Handel bildet sich ein einheitlicher Zertifikatspreis für jede vom Handel erfasste und ausgestoßene Tonne Treibhausgas. Dies ermöglicht eine kosteneffiziente Internalisierung der externen Effekte des Emissionsausstoßes (FEESS 2007, S. 125), da nur diejenigen Emittenten eine Emissionsreduktion durchführen, deren Grenzvermeidungskosten unter dem Zertifikatspreis liegen. Alle anderen Emittenten kaufen zusätzliche Emissionsrechte auf dem Markt, anstatt eigene Reduktionen durchzuführen (FISCHEDICK et al. 2012, S. 123). Zudem zeichnet sich der Emissionshandel theoretisch durch eine hohe dynamische Innovationswirkung aus (dynamische Effizienz). Dies ist die Fähigkeit, umwelttechnischen Fortschritt zu induzieren (ENDRES 2013, S. 158). Bei der statischen Analyse sind die Grenzvermeidungskosten gegeben, wohingegen bei der dynamischen Analyse Lernkurveneffekte berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass die Grenzkosten einer Technologie aufgrund zunehmender Nutzung und technologischer Entwicklungen sinken können (FEESS 2007, S. 185; FISCHEDICK et al. 2012, S. 124).

Umsetzungsdefizite eines Emissionshandels können allerdings zu Ineffizienzen in der Praxis führen, wie es der EU ETS verdeutlicht, der derzeit das zentrale Instrument für die Bepreisung von Treibhausgasemissionen innerhalb der EU ist (SRU 2015; BACH et al. 2019a). Für einen klimapolitisch wirksamen und ökologisch treffsicheren Emissionshandel ist eine anspruchsvolle Cap-Festlegung Voraussetzung. Diese sollte sich an der Größe des CO₂-Budgets orientieren (GRONWALD und KETTERER 2009, S. 25; SRU 2017b, S. 125). Aufgrund politischer Durchsetzungsschwierigkeiten leidet der EU ETS seit Einführung 2005 durch

eine zu hohe Cap-Festlegung an einer Überallokation und damit an zu niedrigen Preisen. Empirische Beobachtungen deuten darauf hin, dass dadurch die theoretisch hohe dynamische Effizienz des EU ETS bislang keine ausreichenden Anreize für radikale Innovationen setzte, die für die langfristigen klimapolitischen Ziele notwendig wären (MATTHES 2010, S. 40).

Darüber hinaus kann eine Ausweitung des EU ETS auf die Sektoren Gebäude und Verkehr zu weiteren Ineffizienzen beispielsweise aufgrund unterschiedlich hoher Vermeidungskosten führen. So sind diese im Verkehrssektor sehr hoch (zwischen 200 und 400 Euro pro Tonne). Für eine ausreichende Lenkungswirkung müsste der Zertifikatspreis demnach extrem steigen (GERBERT et al. 2018; Cambridge Econometrics 2014; KEMFERT et al. 2019c). Die Einbeziehung der Sektoren würde die Dekarbonisierung des Energiesektors zunächst beschleunigen, anstatt nennenswerte Minderungen im Verkehrssektor zu bewirken. Auch für die dringend nötige energetische Sanierung im Gebäudereich braucht es langfristige Preissignale, die der EU ETS nicht ausreichend gibt. Ein starker Anstieg der Zertifikatspreise könnte wiederum Carbon-Leakage-Effekte in der Industrie nach sich ziehen, was Schutzmaßnahmen vor der Verlagerung von Emissionen ins Ausland erforderlich machen würde (NEUHOFF et al. 2019). Auch die Einführung eines separaten Emissionshandels für die Sektoren Wärme und Verkehr birgt die Gefahr juristischer und ökonomischer Umsetzungsschwierigkeiten (für eine weitere Diskussion s. BACH et al. 2019a; KEMFERT et al. 2019c).

Im Gegensatz zum mengenorientierten System des Emissionshandels ist die Besteuerung ein Preisinstrument. Aus der Festlegung des CO₂-Preises ergibt sich eine Mengenreduktion, die sich allerdings ex ante nicht exakt prognostizieren lässt. Um diese Unsicherheit zu mindern, kann der Preispfad in Abhängigkeit von der tatsächlich erreichten Emissionsreduktion angepasst werden. Dies würde weniger Planungssicherheit für die Marktteilnehmenden, dafür eine höhere ökologische Treffsicherheit bewirken. Die Höhe der Bepreisung würde damit an erzielte ökologische Wirkungen angepasst werden, wie es beispielsweise im Schweizer Bepreisungssystem vorgesehen ist (BACH et al. 2019a; KEMFERT et al. 2019a). Um den Akteuren ausreichend Planungssicherheit zu bieten, kann der Anstieg der Preispfade dabei möglichst vorhersehbar gestaltet werden (SRU 2016b, S. 173). Damit kann die Besteuerung durch eine angemessene Preisfestlegung den Vorteil einer höheren Preisstabilität und Planungssicherheit

bieten. Gegenüber den Preisschwankungen des Handels können langfristige Preissignale gesetzt und Anreize für Investitionen in klimafreundlichere Technologien geschaffen werden (UBA 2019b). Insbesondere langfristige dynamische Anreizwirkungen können dadurch bewirkt werden. Werden die festgelegten Steuersätze schrittweise erhöht, schafft das Planungssicherheit für private Haushalte und Unternehmen in ihren Konsum- und Investitionsentscheidungen (BACH et al. 2019a).

Im Rahmen einer reformierten Besteuerung können mögliche finanzielle Kompensationen für einkommensschwache Haushalte leichter und mit geringeren Transaktionskosten umgesetzt werden – beispielsweise durch eine Rückverteilung der Einnahmen über eine Klimaprämie oder über eine Senkung der Umlagen und Abgaben beim Strompreis. Dies kann auch die gesellschaftliche Akzeptanz für eine CO₂-Bepreisung steigern. Dabei muss beachtet werden, dass finanzielle Kompensationen nicht mit der „Grundsicherung für Arbeitssuchende“ nach dem zweiten Buch des Sozialgesetzbuchs (SGB II) verrechnet werden, damit keine negativen Verteilungswirkungen entstehen, was wiederum Gesetzesänderungen erforderlich machen würde (KEMFERT et al. 2019c).

Mit dem am 15. November 2019 vom Bundestag beschlossenen Bundes-Klimaschutzgesetz werden die zulässigen Emissionsmengen für alle Sektoren erstmals bis 2030 gesetzlich festgeschrieben (Tz. 97). Zudem verabschiedete das Bundeskabinett Anfang Oktober 2019 das Klimaschutzprogramm 2030 mit Maßnahmen zur Umsetzung. Zentral ist die Einführung einer Bepreisung für die Sektoren Wärme und Verkehr ab dem Jahr 2021, was mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz umgesetzt werden soll. Ein Festpreis pro Emissionszertifikat soll zu Beginn 2021 bei 25 Euro liegen und auf 55 Euro in 2025 ansteigen (s. Kasten 6-3). Dass die niedrig gewählten Preise jedoch ambitioniert genug sind, um in Einklang mit einem Paris-kompatiblen CO₂-Budget stehen zu können, ist unwahrscheinlich. Für ausreichende Lenkungswirkungen braucht es eine höhere CO₂-Bepreisung (BACH et al. 2019a; 2019b; FÖS 2019, S. 3; Agora Energiewende und Agora Verkehrswende 2019). Zudem bestehen aufgrund der geplanten Festpreise erhebliche verfassungsrechtliche Bedenken, die geprüft werden müssen (KLINSKI und KEIMEYER 2019; ANTONI et al. 2019). Für die Einführung von Festpreisen muss auf eine Obergrenze für die Gesamtmenge der zur Verfügung stehenden Emissionszertifikate verzichtet werden, denn diese

ließe sich nicht mit festgelegten Preisen vereinbaren. Somit entstünde keine Knappheitssituation. Das Bundesverfassungsgericht hat in seiner Entscheidung zum EU ETS aus dem Jahr 2018 allerdings zum Ausdruck gebracht, dass die Gesamtmenge der verfügbaren Emissionen über ein Cap begrenzt werden muss, sodass ein Knappheitspreis entsteht (KLINSKI und KEIMEYER 2019). Auch für den Gebäudesektor enthält das Klimaschutzprogramm 2030 Maßnahmen. Darüber hinaus hat das Bundeskabinett Ende 2019 den Entwurf zum Gebäudeenergiegesetz (GEG-E) beschlossen, der die Änderungsrichtlinie (EU) 2018/844 zur Gebäudeeffizienz-Richtlinie in deutsches Recht umsetzt (s. Kap. 7, Tz. 624). Zudem konkretisiert § 72 GEG-E das im Klimaschutzprogramm 2030 festgelegte Verbot des Einbaus neuer Ölheizungen ab dem Jahr 2026. Dieser

wichtige Ansatz zum Erreichen eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands, der in der Begründung zum GEG-E als Ziel angeführt wird, wird jedoch durch Ausnahmeregelungen abgeschwächt. So werden beispielsweise Hybridlösungen in Kombination mit Solarthermie auch noch nach 2026 erlaubt und finanziell gefördert.

Damit die gewählten nationalen politischen Maßnahmen in Einklang mit den Verpflichtungen des Klimaabkommens von Paris stehen, kann das CO₂-Budget als (zusätzliche) Bewertungsgrundlage dienen. Anhand eines Paris-kompatiblen CO₂-Budgets kann die nationale Klimapolitik auf Ambitions- und Umsetzungslücken überprüft werden.

Sie tragen damit zur Professionalisierung der politischen Steuerung bei (DUWE und STOCKHAUS 2019, S. 11).

Das Bundes-Klimaschutzgesetz verknüpft den Klimaschutzplan und die Klimaschutzprogramme. Auf der einen Seite nimmt der regierungseigene Klimaschutzplan 2050 eine Langfristperspektive ein und steckt groben Rahmen und die Ziele der zukünftigen Klimapolitik ab. Das Bundes-Klimaschutzgesetz regelt primär die mittelfristige Operationalisierung dieser Ziele, aktuell bis 2030. Es stellt sicher, dass geeignete und ausreichende Klimaschutzmaßnahmen in Form von Klimaschutzprogrammen ergriffen werden, um das Reduktionsziel von 55 % bis 2030 zu erreichen und die europäischen Klimaschutzverpflichtungen zu erfüllen. Diese sollen sowohl nach Fortschreibung des Klimaschutzplans (§ 9 KSG) als auch nach Feststellung einer Umsetzungslücke (Sofortprogramm nach § 8 KSG) beschlossen werden. Unklar ist jedoch, warum die ebenfalls regelmäßig vorgesehene Fortschreibung des Klimaschutzplans im Bundes-Klimaschutzgesetz nicht explizit genannt und vorgeschrieben wird, insbesondere, da die Bundesregierung damit bereits in Verzug ist.

96. Das Bundes-Klimaschutzgesetz schreibt zunächst bis 2030 fest, die Treibhausgase um 55 % zu reduzieren (§ 3 Abs. 1 KSG). Das Bekenntnis, Treibhausgasneutralität bis 2050 zu verfolgen, wird hingegen nur im Gesetzeszweck genannt und nicht weiter präzisiert. Das Gesetz sieht vor, dass die nationalen Klimaschutzziele

zukünftig verschärft werden können, sollte dies zur Erfüllung europäischer oder internationaler Ziele notwendig sein (§ 3 Abs. 3 KSG). Wie dargelegt, ist dies bereits heute notwendig, da die bisherigen deutschen Klimaziele nicht als Paris-kompatibel zu erachten sind (s. Kap. 2.2). Die angedachte Anhebung des europäischen Treibhausgasreduktionsziels für 2030 würde eine Anpassung der europäischen Klimaschutzverordnung nach sich ziehen, welche die dort vorgesehenen Emissionsbudgets für die Nicht-ETS-Sektoren verringern würde (s. Tz. 90). Auch aus dieser Perspektive scheint eine zügige und ambitionierte Anpassung der deutschen Klimaziele notwendig.

97. Die aus dem Ressortprinzip abgeleitete Zuweisung thematischer Verantwortlichkeiten kann dazu führen, dass Umwelt- und Klimafragen primär als Aufgabe des Umweltministeriums begriffen werden (SRU 2019, u.a. S. 165). Gleichzeitig werden Emissionen jedoch prinzipiell in Sektoren verursacht, für die andere Ministerien verantwortlich sind. Damit besteht tendenziell ein geringer Anreiz für die anderen Ressorts zur Erreichung der Ziele, wie auch am Beispiel der Nachhaltigkeitsstrategie und ihrer Ziele sichtbar wird (ebd., S. 168). Das Verfehlen des nationalen Treibhausgasreduktionsziels 2020 und die im Kasten 2-4 „Klimapolitische Zielverfehlungen Deutschlands und ihre finanziellen Folgen“ aufgezeigten finanziellen Risiken bei Verfehlung der europäischen Klimaziele spiegeln die unzureichende klimapolitische Verantwortung einzelner Sektoren für ihre Emissionen wider. So trägt der gesamte Bundeshaushalt durch den Zukauf von Emissionszuweisungen im Zweifel die Folgen einer unzureichenden sektoralen

Klimaschutzpolitik, anstatt dem Verursacherprinzip entsprechend die Kosten an die verantwortlichen Sektoren und Ressorts weiterzugeben.

Aus dieser Sicht ist die Aufteilung des Treibhausgasreduktionsziels für 2030 auf sektorale Jahresemissionsmengen (§ 4 KSG) im Bundes-Klimaschutzgesetz und die zentrale politische Innovation des Gesetzes zu begrüßen. Die Jahresemissionsmengen des Bundes-Klimaschutzgesetzes entsprechen damit Treibhausgasbudgets bis 2030 (s. Abschn. 2.2.4.3) und übertragen den Ansatz politisch verbindlicher Budgets erstmals auf die nationale Ebene. Sie orientieren sich an den Sektorzielen des Klimaschutzplans 2050 und definieren einen jahresgenauen Emissionspfad für die einzelnen Sektoren. Ausnahme hiervon ist die Energiewirtschaft, für die nur für 2020, 2022 und 2030 Jahresemissionsmengen definiert werden. Damit sind erstmals die einzelnen Ressorts für die Umsetzung der entsprechenden Sektorstrategien und Maßnahmen verantwortlich (§ 4 Abs. 4 S. 1 KSG). Überschreitet ein Sektor seine Jahresemissionsmenge, wird die Differenz auf das Emissionsbudget der nächsten Jahre angerechnet.

In der Vergangenheit existierten keine ausreichenden Mechanismen, um weitere sektorale Maßnahmen zu ergreifen, sollten sich beschlossene Klimaschutzmaßnahmen als unzureichend erweisen. Das Bundes-Klimaschutzgesetz sieht nun vor, dass das verantwortliche Ressort innerhalb von drei Monaten nach Ermittlung der Umsetzungslücke ein Sofortprogramm vorlegen muss (§ 8 Abs. 1 KSG), was im Anschluss von der Bundesregierung beschlossen werden soll. Dies ist ein Schritt in die richtige Richtung. Wenig sinnvoll erscheint in diesem Kontext jedoch die vorgesehene Möglichkeit, die Jahresemissionsmengen zwischen den Sektoren zu verschieben (§ 8 Abs. 2 KSG). Die mit der Einführung einer solchen Umverteilung der Jahresemissionsmengen entstehende Flexibilität darf nicht auf Kosten der sektoralen Verantwortlichkeit und der Wirksamkeit der Sektorziele gehen. Es ist zu befürchten, dass ein Fehlanreiz für Ressorts geschaffen wird, auf die Umverteilung der Treibhausgasbudgets durch wiederholte Zielverfehlung zu spekulieren.

98. Aus Verfahrens- und Partizipationssicht kann der politische Prozess zur Erstellung des Bundes-Klimaschutzgesetzes und des Klimaschutzprogramms 2030 kritisiert werden. Ursprünglich sollte ein Aktionsprogramm mit sektoralen Maßnahmenprogrammen zur Erreichung des 2030-Ziels bis Ende 2018 verabschiedet werden (BMU 2019a, S. 78 f.; CDU, CSU und SPD 2018,

S. 142 f.). Tatsächlich kam es jedoch wiederholt zu Verzögerungen. Auch deswegen konnte eine unabhängige Überprüfung der Wirksamkeit von vorgeschlagenen Maßnahmen durch beauftragte Forschungsinstitute nicht wie geplant stattfinden (Der Spiegel 13.09.2019; BMVI 2019). Die politischen Verzögerungen hatten auch Folgen für die Einbeziehung der Zivilgesellschaft und die europäischen Berichtspflichten. So betrug der Zeitraum für die vorgesehene Verbändebeteiligung bei mehreren Gesetzesvorhaben des Klimaschutzprogramms weniger als einen Tag, was eine sinnvolle Beteiligung unmöglich macht (Tagesspiegel Background Mobilität & Transport 07.11.2019). Bereits Ende 2018 hätte die Bundesregierung mit dem Entwurf des NECP gegenüber der Europäischen Kommission darlegen sollen, wie die deutschen Anteile an den europäischen Klimazielen erreicht werden sollen. In Ermangelung politischer Beschlüsse fehlte diese Folgenabschätzung zu den Klimawirkungen geplanter Maßnahmen. Auch die Europäische Kommission konnte den deutschen NECP-Entwurf damit nur unvollständig evaluieren. Die im Sommer 2019 durchgeführte Onlinekonsultation zum Entwurf des deutschen NECP musste ohne Einbezug der erst später von der Bundesregierung im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 beschlossenen Maßnahmen stattfinden. Ob die abgegebenen Stellungnahmen in der Konsultation zum NECP umgekehrt in der politischen Entscheidungsfindung des Klimaschutzprogramms 2030 berücksichtigt wurden, ist nicht transparent nachvollziehbar. Auch die Frist zur Eingabe des finalen deutschen NECPs Ende 2019 wurde verpasst. Grundsätzlich bleibt unklar, inwiefern der in einem aufwendigen Beteiligungsprozess erstellte Maßnahmenkatalog des Klimaschutzplans 2050 von der Bundesregierung bei der Formulierung des Klimaschutzprogramms 2030 mit seinen sektoralen Maßnahmen Berücksichtigung gefunden hat. Mit dem gewählten Mischsystem zur CO₂-Bepreisung des Brennstoffemissionshandelsgesetzes wurden die Empfehlungen des Sachverständigenrates zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung bezüglich der möglichen Vorteile eines eigenen Emissionshandelssystems und einer reinen CO₂-Steuer (Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung 2019, S. 110) nicht berücksichtigt. Auch die Vorschläge des Gutachtens zu sozial ausgewogenen Rückverteilungsoptionen wurden durch die Bundesregierung nicht aufgegriffen. Schließlich wird das Klimaschutzprogramm 2030 vielfach kritisiert, weil die darin enthaltenen Maßnahmen voraussichtlich nicht ausreichen werden, um das nationale Klimaziel 2030 zu erreichen (EDENHOFER et al. 2019; HARTHAN et al. 2020). Damit droht auch ein Verfehlen der europäischen Ver-

pflichtungen. Umso größere Bedeutung kommt der Einbindung wissenschaftlicher Expertise, dem Monitoring der Wirksamkeit und der regelmäßigen Überarbeitung der Maßnahmenprogramme zu.

2.4.3 Bundes-Klimaschutzgesetz im Kontext des Pariser Klimaabkommens

99. Insbesondere die regelmäßige Überprüfung des Fortschritts zur Zielerreichung und die Fortschreibung von Zielen und Maßnahmen hat für die Klimapolitik eine herausgehobene Bedeutung. In dieser Hinsicht könnte das Bundes-Klimaschutzgesetz zukünftig weiter verbessert und der Budgetgedanke zur Sicherstellung eines dem Pariser Klimaabkommen angemessenen Ambitionsniveaus klarer verankert werden. Dazu kann unter anderem die Stärkung entsprechender wissenschaftlicher Institutionen beitragen. Mit dem Expertenrat für Klimafragen sieht das Bundes-Klimaschutzgesetz (§ 11 und §12 KSG) ein Gremium vor, welches durch seine interdisziplinäre Zusammensetzung aus fünf Mitgliedern beste Voraussetzungen für die Erfüllung dieser Aufgaben mitbringt. Das Gremium könnte jedoch noch wirkungsvoller in die Klimagovernance integriert werden. Ziel sollte es immer sein, der Bundesregierung und dem Bundestag die notwendige Expertise bereitzustellen, um wissenschaftliche Entscheidungen für die Dekarbonisierung zu erleichtern. In Ländern mit entsprechenden Beratungsgremien tragen diese daher zu einer umfassenden öffentlichen Debatte bei (DUWE und STOCKHAUS 2019, S. 28).

100. Das Bundes-Klimaschutzgesetz definiert für den Expertenrat für Klimafragen im Kern eine Reihe an Aufgaben. Er prüft die durch das UBA veröffentlichten Emissionsdaten der verschiedenen Sektoren auf Richtigkeit (§ 12 Abs. 1 KSG). Im Anschluss wird die Analyse der Bundesregierung vorgelegt. Der Mehrwert dieser Prüfung bleibt unklar. Die bisherige Umsetzungslücke ergab sich unter anderem aus den zu optimistischen Projektionsberichten (s. Kasten 2-4). An der fachlichen Qualität der Emissionsdaten für die vergangenen Jahre bestand kein Zweifel. Anhand dieser Daten kann ausschließlich ex post überprüft werden, ob die Sektoren ihre jährlichen Emissionsobergrenzen eingehalten haben. Sollte dies nicht der Fall sein, verpflichtet sich die Bundesregierung zur Verabschiedung eines Sofortprogramms (§ 8 Abs. 1 KSG), um die Jahresemissionsmengen zukünftig wieder einzuhalten. Der Expertenrat prüft die

Annahmen zur Treibhausgasminderungswirkung der in dem Sofortprogramm enthaltenen Maßnahmen (§ 12 Abs. 2 KSG).

Darüber hinaus soll die Bundesregierung eine Stellungnahme des Expertenrats zu der Minderungswirkung einholen, bevor sie Jahresemissionsmengen zwischen Sektoren verschiebt, ein Klimaschutzprogramm verabschiedet oder den Klimaschutzplan fortschreibt (§ 12 Abs. 3 KSG). Damit kommt dem Expertenrat primär die Aufgabe zu, die sektorale Emissionsminderung nachträglich zu dokumentieren und die Wirkung der regierungseigenen Klimaschutzmaßnahmen der Bundesregierung auf Plausibilität zu überprüfen.

Ambitionsniveau und Klimaziele

101. Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass einem dedizierten, klimapolitikspezifischen Expertengremium eine aktivere Rolle zur Beurteilung des Ambitionsniveaus und der proaktiven Verhinderung von Umsetzungslücken zugeschrieben werden könnte. Als wirksam in Hinblick auf das Ambitionsniveau hat sich auch das Mandat des britischen Committee on Climate Change (CCC) erwiesen. Dieses schlägt der Regierung auf Basis seiner Analysen Kohlenstoffbudgets für jeweils fünf Jahre vor, die im Anschluss im Britischen Parlament debattiert und in der Regel ohne wesentliche Abweichungen gesetzlich verabschiedet werden (DUWE et al. 2017, S. 59). Damit adressiert die Arbeit des CCC das Ambitionsniveau sowie die mögliche Ambitionsücke der britischen Klimapolitik proaktiv und unterstützt die politischen Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger dabei, diese zu verringern. Dadurch, dass der Vorschlag des CCC Grundlage für die politischen Debatten bildet, werden sich Gesetzgeber und die Regierung eher rechtfertigen müssen, wenn sie vom wissenschaftlich gebotenen Budget abweichen wollen.

102. Es wurde gezeigt, dass die deutschen Klimaziele nicht ausreichen, um das Pariser Klimaabkommen zu erfüllen. Daher sollte die wissenschaftliche Expertise verstärkt genutzt werden, um die Ambitionsücke proaktiv zu adressieren indem ein faires, Paris-kompatibles CO₂-Budget zur Basis der Bewertung von Klimazielen wird. In diesem Zusammenhang könnte der Expertenrat die Regierung dabei beraten, wie groß ein solches Paris-kompatibles CO₂-Budget sein könnte. In Abschnitt 2.2.4.2 wurde die Rechnung für ein solches Paris-kompatibles Budget dargelegt. Die Bundesregierung sollte ein CO₂-Budget zur transparenten Evaluationsgrundlage des Ambitionsniveaus der Klimaziele erklären. Der Expertenrat könnte im Anschluss Empfehlungen zur Anpassung der

deutschen Klimaziele an das regierungseigene CO₂-Budget geben.

Ob Klimaziele am besten in Form von jahresgenauen Sektorbudgets oder unter Beibehaltung der Punktziele formuliert werden, kann nicht abschließend beantwortet werden. Mit politisch verabschiedeten verbindlichen Treibhausgasbudgets erfolgt eine naheliegende Operationalisierung des naturwissenschaftlich abgeleiteten Paris-kompatiblen CO₂-Budgets. Auch aus Sicht der europäischen Vorgaben, die ebenfalls Jahresemissionsobergrenzen für den EU ETS und die Nicht-ETS-Sektoren definieren, scheint ein auf Budgets basierendes Zielsystem naheliegend. Allerdings erreichen Punktziele teilweise eine höhere politische Dynamik (Committee on Climate Change 2017, S. 11) und bieten mehr Flexibilität auf dem Weg der Zielerreichung (Danish Council on Climate Change 2019, S. 18). Diese Flexibilität zwischen den Sektoren kann helfen, dass die Klimaziele kostengünstiger oder mit stärkerer Berücksichtigung der Verteilungswirkung erreicht werden (s. Abschn. 2.2.4.3). Mit der zunehmenden Sektorkopplung und der damit verbundenen Elektrifizierung wird zukünftig auch die Schwierigkeit weiter zunehmen, Emissionen einzelnen Sektoren klar zuzuordnen. Wie die Umsetzungslücke der letzten Jahre gezeigt hat, birgt ein allein auf Punktziele beschränktes Zielsystem aber umgekehrt das Risiko, dass Emissionsminderungen in die Zukunft verschoben werden (Danish Council on Climate Change 2019, S. 18).

In der Praxis scheint ein Mischsystem am geeignetsten, die Sicherheit der Zielerreichung mit Flexibilität auf dem Weg dorthin zu vereinbaren. Das Bundes-Klimaschutzgesetz geht einen Schritt in diese Richtung, indem das Punktziel für 2030 um die zulässigen Jahresemissionsmengen auf dem Weg dorthin ergänzt wird, womit die Sektorziele des Klimaschutzplans 2050 verbindlich werden. Die Vorteile beider Zielsysteme könnten weiter verbunden werden, indem zukünftig Zwischenziele (bspw. für 2025 etc.) und ergänzende qualitative Indikatoren definiert oder zusätzliche Verrechnungs- und Anreizstrukturen für die (Über-)Erfüllung von Sektorzielen geschaffen werden.

Monitoring und Umsetzung

103. In der Vergangenheit haben sich Reduktionsszenarien des Projektionsberichts der Bundesregierung als zu optimistisch erwiesen (von LÜPKE und NEUHOF 2019, S. 78). Das Bundes-Klimaschutzgesetz verpflichtet die Bundesregierung dazu, vor Verabschiedung von Maßnahmenprogrammen die Treibhausgasreduktionsannahmen

durch den Expertenrat auf Plausibilität überprüfen zu lassen. Der deutsche Expertenrat für Klimafragen darf jedoch nicht eigenständig tätig werden. Er kann jedoch vom Bundestag oder der Bundesregierung mit der Erstellung eines Sondergutachtens beauftragt werden (§ 12 Abs. 3 S. 2 KSG). Er hat zudem kein Mandat zur Bewertung der vorgeschlagenen Maßnahmen jenseits der Emissionsminderungswirkung oder zur Formulierung eigener Vorschläge.

In anderen Ländern können vergleichbare Gremien eigenständig klimarelevante Themen bearbeiten und tragen damit zur politischen Debatte bei. So soll beispielsweise der schwedische Klimarat nicht nur die Wirksamkeit klimapolitischer Maßnahmen bewerten, sondern explizit das gesamte Regierungshandeln auf seine klimapolitischen Folgen untersuchen (BRUHIN et al. 2018, S. 14). Er präsentiert ein jährliches Gutachten, bei dem er neben der allgemeinen Berichterstattung als dringend erachtete klimapolitische Handlungsfelder in den Blick nimmt. Auch der britische CCC wertet regelmäßig aus, inwiefern beschlossene klimapolitische Maßnahmen ausreichen, um Fünfjahres-Kohlenstoffbudgets einzuhalten, und welche Maßnahmen die Umsetzungslücke verkleinern könnten. Die Regierung ist dabei verpflichtet, zu diesen Berichten Stellung zu nehmen (von LÜPKE und NEUHOF 2019, S. 78). Damit wird eine mögliche klimapolitische Umsetzungslücke proaktiv adressiert.

104. Um eine unzureichende Emissionsminderung und damit weitere Umsetzungslücken frühzeitig vermeiden zu können, sollte der Expertenrat daher das Mandat bekommen, sich mit der zukünftigen Emissionsentwicklung auseinandersetzen und eigenständige Maßnahmenprogramme vorschlagen zu dürfen (EDENHOFER et al. 2019, S. 13). Denkbar wäre beispielsweise, den Expertenrat mit der Entwicklung von möglichen zukünftigen Maßnahmenprogrammen zu betrauen. Zusätzlich könnte der Rat die Projektionsberichte der Bundesregierung überprüfen. Die Expertise könnte im Anschluss der Bundesregierung und dem Bundestag übergeben werden und diesen als Orientierung für die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen und als Grundlage des politisch zu formulierenden Klimaschutzprogramms dienen. Eine Parlamentsdebatte der Gutachten trägt dabei zu einer wissenschaftsbasierten öffentlichen Debatte und Transparenz bei und erfolgt so bereits in anderen Ländern (DUWE et al. 2017, S. 60).

Einbindung in die Beratungslandschaft

105. Deutschland weist neben dem Expertenrat für Klimafragen bereits eine differenzierte wissenschaftliche Gremien- und Akteursstruktur auf, die bisher jedoch nicht ausreichend politisches Gehör gefunden hat. Für die Energiewende wurde die Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ der Bundesregierung geschaffen. Der Klimaschutzplan 2050 sieht zudem einen wissenschaftlichen Begleitprozess für die Überarbeitung und Fortschreibung der Ziele und Maßnahmen vor (BMU 2019a, S. 79), der 2019 mit dem Lenkungsreis der Wissenschaftsplattform zum Klimaschutzplan 2050 institutionalisiert wurde. Für die Zukunft scheint es entscheidend, ein stärkeres Augenmerk auf die Architektur der verschiedenen Beratungsgremien, ihre Rolle sowie deren Ressourcenausstattung zu legen (EDENHOFER et al. 2019, S. 14). Denkbar ist beispielsweise, die Expertise der existierenden Beratungsgremien bei geeigneten Fragestellungen zu bündeln, insbesondere, um der engen Verknüpfung energie- und klimapolitischer Fragestellungen Rechnung zu

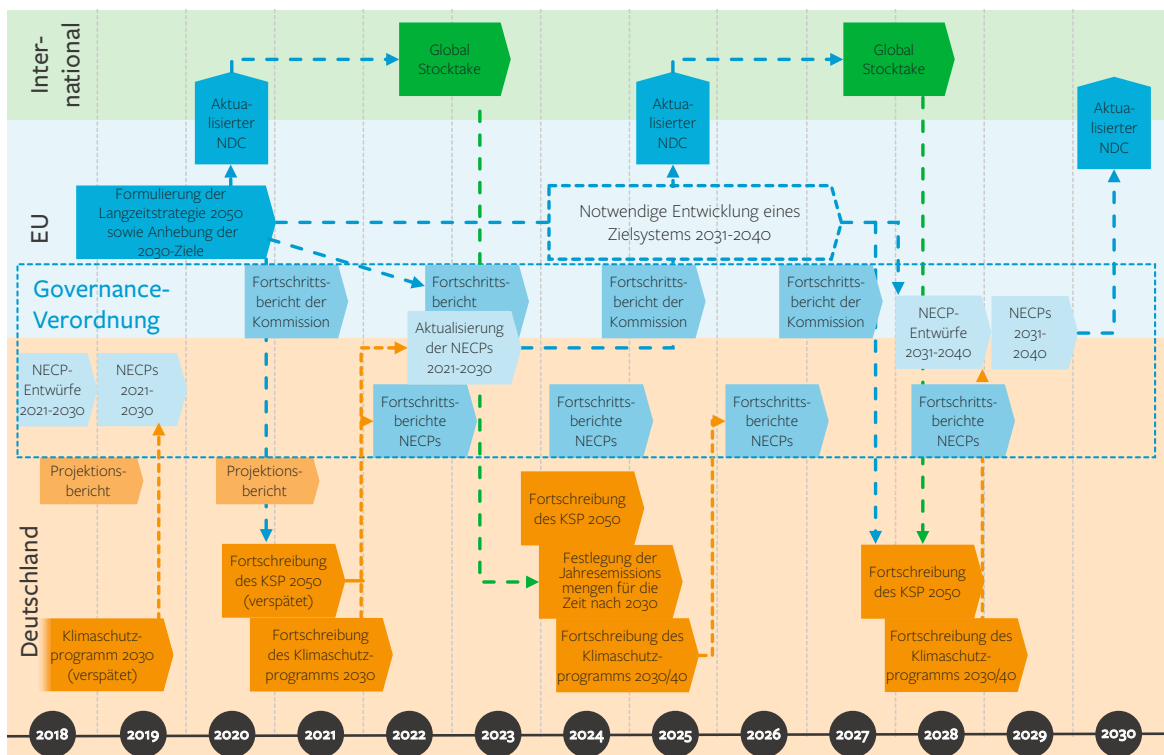
tragen. Weiterhin ist anzunehmen, dass ein Expertenrat mit entsprechender Ressourcenausstattung und der hier beschriebenen institutionellen Aufwertung sich bei politischen Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern sowie in der Öffentlichkeit leichter Gehör verschaffen könnte.

Fortschreibung, Politikzyklen und europäische Einbindung

106. Für 2025 sieht das Bundes-Klimaschutzgesetz bereits die Festlegung von sektoralen Jahresemissionsmengen über das Jahr 2030 hinaus vor. Für diese Konkretisierung der zukünftigen Sektorziele empfiehlt es sich, den Expertenrat für Klimafragen mit der Entwicklung verschiedener Dekarbonisierungsszenarien und den dafür notwendigen technologischen und ökonomischen sektoralen Entwicklungen zu beauftragen. Diese sollten der Bundesregierung und dem Bundestag vorgelegt werden. Nur so kann beurteilt werden, welche Emissionsminderung der Sektoren einer angemessenen Aufteilung der Reduktionsleistung entspricht. Dies kann helfen, dass

o Abbildung 2-12

Klimapolitikzyklen auf deutscher, europäischer und internationaler Ebene



die Sektorziele einen möglichst kostengünstigen und sozial verträglichen Pfad in Richtung Dekarbonisierung ebnen und Fehlinvestitionen vermieden werden.

107. Wichtig wäre es schließlich, die deutsche Klimagovernance stärker auf die existierenden europäischen und internationalen Politikzyklen und -anforderungen abzustimmen. Es wurde dargelegt, dass die Verzögerungen in der Formulierung des Klimaschutzprogramms 2030 bereits Auswirkungen sowohl auf europäische Berichtspflichten als auch auf Beteiligungsprozesse hatten. Aktuell besteht die Gefahr, dass zwischen Klimaschutzprogramm 2030, der turnusgemäßen, aber bereits verzögerten Überarbeitung des Klimaschutzplans, der NECP-Berichterstattung, der Anhebung der europäischen Klimaziele für 2030 sowie dem europäischen Langfristziel ein Nebeneinander verschiedener Überarbeitungszyklen und inhaltlicher Festlegungen entsteht. Es wäre daher sinnvoll, die Vorgaben des Bundes-Klimaschutzgesetzes und die regierungseigenen klima- und energierelevanten Strategien noch stärker auf die existierenden europäischen Berichtspflichten und -zyklen auszurichten (s. Abb. 2-12; SCHLÄCKE und LAMMERS 2018). Die Fortschreibung des Klimaschutzplans findet im Bundes-Klimaschutzgesetz keine Erwähnung. Ein Beitrag hierzu könnte die Überarbeitung des Klimaschutzplans (und in Folge auch der Klimaschutzprogramme) in festen, an die Projektions- und europäischen Fortschrittsberichte gekoppelten Zyklen sein.

Ratsam wäre dafür auch eine insgesamt stärkere Verzahnung von Klimapolitik und anderen Politikfeldern. Dies trifft insbesondere auf die Energiepolitik zu. Der SRU hat bereits Vorschläge zur Verankerung der Nachhaltigkeitspolitik in allen Ressorts und der verstärkten Prüfung von politischen Programmen und Strategien auf ihre Nachhaltigkeit gemacht (SRU 2019, S. 166 ff.). Analoge Vorgaben für Vorhaben mit Klimarelevanz wären denkbar.

Aktuell droht eine weitere Vergrößerung der Umsetzungslücke durch die von der neuen Europäischen Kommission vorgeschlagene Anhebung der 2030-Ziele. Sinnvoll erscheinen eine zeitnahe Anhebung der existierenden deutschen Klima- und Sektorziele für 2030 und eine stärkere Ausrichtung an einem mit dem Pariser Klimaabkommen kompatiblen CO₂-Budget. Dies hätte neben der Tatsache, dass eine Anhebung der deutschen Klimaziele aus Perspektive des CO₂-Budgets sowieso geboten ist, zwei Vorteile: Zum einen hätte Deutschland damit eine glaubhaftere Verhandlungsbasis und könnte sich in den bevorstehenden Verhandlungen im Europäischen Rat besser für eine mit den Vorgaben des Pariser Klimaabkommens vereinbare Anhebung der eu-

ropäischen 2030-Ziele einsetzen. Zum anderen würde dies eine reaktive und späte Anpassung der deutschen Sektorziele und des Klimaschutzprogramms 2030 vermeiden. Bei einer verzögerten Anhebung der deutschen Sektorziele 2030 an die dann höheren europäischen Anforderungen drohen sonst weitere Zielverfehlungen der Nicht-ETS-Sektoren und mögliche weitere Mehrkosten durch den Zukauf von Emissionsrechten aus dem Ausland (s. Kasten 2-4).

2.5 Handlungsempfehlungen

108. Der SRU empfiehlt der Bundesregierung sowie anderen beteiligten Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern die nachfolgenden Eckpfeiler einer Klimapolitik, welche den klimawissenschaftlich notwendigen und international gerechten Beitrag Deutschlands zur Einhaltung des Pariser Klimaabkommens sichert (s. Abb. 2-13).

Das CO₂-Budget als zentrale Messgröße für den Klimaschutz anwenden

109. *Klimaziele und Maßnahmen an einem Paris-kompatiblen CO₂-Budget ausrichten.* Auf europäischer Ebene existieren mit der Klimaschutzverordnung und dem EU ETS bereits Klimaschutzziele, die Jahresemissionsmengen und damit Treibhausgasbudgets definieren. Auch das Bundes-Klimaschutzgesetz beinhaltet sektorspezifische Budgets bis 2030. Daneben bestehen weiterhin prozentuale Reduktionsziele jährlicher Treibhausgasemissionen gegenüber einem Basisjahr. Die Erderwärmung hängt weitgehend von der über alle Jahre addierten Gesamtmenge der klimawirksamen Emissionen ab. Deshalb muss eine Obergrenze an Gesamtemissionen eingehalten werden, wie sie mit dem CO₂-Budget als vereinfachte Variante des Klimabudgets ausgedrückt wird. Unabhängig davon, in welcher Form Ziele für bestimmte Jahre oder Sektoren formuliert werden und wie Emissionsreduktionen bewirkt und gesteuert werden, sollte die Wirksamkeit nationaler und europäischer Klimaschutzmaßnahmen und das Ambitionsniveau von Reduktionszielen daher am Maßstab des CO₂-Budgets gemessen werden.

110. *Die aktuelle Größe des verbleibenden CO₂-Budgets Deutschlands offiziell feststellen und fortlaufend begleiten.* Die Bundesregierung sollte sich zu einem CO₂-Budget bekennen, das sie zum Maßstab ihrer zukünftigen Klimapolitik macht. Sie kann den Expertenrat für Klimafragen damit beauftragen, aktuell gültige Werte für das nationale und europäische CO₂-Budget festzu-

o **Abbildung 2-13**

Empfehlungen zur Einführung, Anwendung und Einhaltung des CO₂-Budgets



SRU 2020

stellen (s. Tz. 118) und sollte dem wissenschaftlichen Rat folgen. Die Größe des nationalen CO₂-Budgets ist trotz bestehender Unsicherheiten hinreichend belastbar aus den Studien des IPCC zum globalen CO₂-Budget abzuleiten, sofern man sich auf ein geeignetes Prinzip der internationalen Verteilungsgerechtigkeit festgelegt hat. Sollte das maßgebliche Budget aufgrund zukünftiger Erkenntnisse sinken, müsste die Klimapolitik nachgeschärft werden. Sollte es steigen, wird die Zielerfüllung vereinfacht.

111. Empfehlung für die Größe des nationalen CO₂-Budgets. Der SRU legt mit diesem Kapitel dar, wie sich ein nationales CO₂-Budget berechnen lässt. Die Empfehlung des SRU beruht auf den Temperaturzielen des Pariser Klimaabkommens. Das hier gewählte CO₂-Budget bezieht sich auf eine Erwärmung von 1,75 °C, ergänzend wird

ein Budget für eine Erwärmung von 1,5 °C angegeben. Bei einer Vernachlässigung historischer Emissionen und bei Anwendung des Prinzips gleicher Emissionsrechte pro Kopf der heutigen Weltbevölkerung ergibt sich für Deutschland ein verbleibendes CO₂-Budget ab dem 1. Januar 2020 von 6,7 Gt CO₂. Das Budget wäre bei anhaltenden Emissionen auf dem heutigen Niveau im Jahr 2029 erschöpft. Bei linearer jährlicher Reduktion der Emissionen reicht es bis zum Jahr 2038. Das Ziel einer Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 erfordert sehr steile Einschnitte in den kommenden Jahren, um fortlaufende Emissionsmengen auf niedrigem Niveau bis zur Jahrhundertmitte zu ermöglichen. Eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C ist ebenfalls gut begründbar und entsprechende Anstrengungen sind im Pariser Klimaabkommen vorgesehen. Das verbleibende CO₂-Budget für 1,5 °C wäre mit 4,2 Gt CO₂ ab dem 1. Januar 2020 deut-

lich kleiner, die Treibhausgasneutralität müsste früher erreicht werden. Eine lineare Reduktion der Emissionen auf die Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 würde einen bis zur Jahrhundertmitte fortdauernden, überproportional großen Anteil Deutschlands am globalen CO₂-Budget festschreiben. Dies widerspricht einer Annahme weltweit gleicher Nutzungsrechte an der Atmosphäre.

Eckpunkte zur Einhaltung des CO₂-Budgets einbeziehen

112. *Ausstieg aus Kohle, Erdöl, Erdgas, Benzin und Diesel.* Aufgrund der bislang unzureichenden Klimapolitik sind die noch verbleibenden CO₂-Budgets in ihrer Größe inzwischen merklich begrenzt und erfordern, dass die Nutzung fossiler Ressourcen vergleichsweise rasch beendet wird. Ein schnelles Ende der Kohleverstromung schon bis 2030 würde Budgetspielraum eröffnen. Der SRU bewertet positiv, dass der Kohleausstieg in Deutschland umgesetzt wird. Er empfiehlt aber darüber hinaus, den notwendigen Ausstieg aus der Nutzung fossilen Erdöls und Erdgases sofort politisch und planerisch in Angriff zu nehmen, um Fehlinvestitionen in weitere fossile Technologien zu vermeiden und die notwendigen Transformationen einzuleiten. Entsprechend ist die Nutzung von Benzin und Diesel aus klimapolitischer Sicht schrittweise zu beenden.

113. *Den raschen Ausbau erneuerbarer Energien systematisch als Gegenstück zum Ausstieg aus fossiler Energieproduktion begreifen.* Ob ein durch das CO₂-Budget vorgegebener Ausstiegspfad umsetzbar ist, hängt auch von der Rate des Aufbaus von Alternativen ab. Die Diskussion über den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Ressourcen sollte daher systematisch mit dem Umstieg auf erneuerbare Energien und Fragen der Sektorkopplung sowie der Rohstoffverfügbarkeit erfolgen. Der SRU empfiehlt, das Ziel von 100 % erneuerbarer Energie in einem Zeithorizont zu etablieren, der dem Ausstiegspfad entspricht, mit dem das Paris-kompatible CO₂-Budget eingehalten werden kann. Heutige Investitionen in Technologien und die Energieinfrastruktur sind entscheidend für die Emissionen Mitte des Jahrhunderts. Daher müssen heutige Investitionen mit einer treibhausgasneutralen Wirtschaft Mitte des Jahrhunderts kompatibel sein. Lock-in-Effekte und Pfadabhängigkeiten durch Brückentechnologien, die zwar kurzfristig wirken, aber mittel- bis langfristig das Erreichen der Klimaziele erschweren, müssen vermieden werden. Staatliche Förderprogramme sollten stärker auf erneuerbare Energiequellen und dekarbonisierte Technologien ausgerichtet und die Förderung und Subventionierung fossiler Technologien sollte beendet werden.

114. *Der Umstieg auf 100 % erneuerbare Energien sollte weitere Eckpunkte einer umweltgerechten Umsetzung berücksichtigen.* Grundsätzlich darf der Ausbau erneuerbarer Energien den Umwelt-, Landschafts- und (auf größerem Maßstab) Biosphärenschutz nur so gering wie möglich beeinträchtigen. Fragen des Flächen- und Wasserverbrauchs, der Düngung, der Landschaftsstruktur, des Biodiversitäts- und Gewässerschutzes und der konkurrierenden Nutzungen sollten in der Planung berücksichtigt werden. Daneben sollte der Ausbau unter folgenden Rahmenbedingungen erfolgen:

- Der vollständige Verzicht auf Atomenergie ab 2022 in Deutschland muss bestehen bleiben; die gesellschaftlich anerkannten Gründe einer Vermeidung fundamentaler Risiken für Umwelt und Gesundheit bleiben ebenso gültig wie ökonomische Gründe, welche auch global deutlich gegen eine Nutzung der Atomenergie sprechen.
- Die energetische Nutzung von Holzbiomasse sollte nur dann erfolgen, wenn die Klimawirksamkeit der Nutzung nachgewiesen ist und sie aus sorgfältig kontrollierter, nachhaltiger Produktion, insbesondere aus Rest- und Abfallstoffen, stammt. Dies ermöglicht eine regional differenzierte Nutzung, schließt aber eine flächendeckende Erweiterung auf große Volumina aus. Insbesondere ist der Import von Holzbiomasse zur energetischen Nutzung nur unter strengen Kriterien vertretbar. Die Etablierung eines entsprechenden Marktes ist kritisch zu begleiten und Fehlentwicklungen muss frühzeitig entgegengesteuert werden. Die Bundesregierung sollte darüber hinaus ein integriertes Gesamtkonzept zur Biomassenutzung entwickeln. Zwar existieren Analyse- und Politikansätze zu einer künftig ausgeweiteten Nutzung von Biomasse, es besteht jedoch die Gefahr von Fehlentwicklungen, insbesondere mit Blick auf den Import. Mit Bezug auf den Klimaschutz sollte systematisch erfasst werden, wie viel Biomasse die verschiedenen Sektoren zur Emissionsminderung einplanen, und ein in der Gesamtmenge realistisches Gesamtkonzept entwickelt werden.
- Aufgrund der mit Gewinnung und Produktion verbundenen Umweltwirkungen und eines niemals vollständig möglichen und ebenfalls mit Umweltwirkungen verbundenen Recyclings sollte der Bedarf an Rohstoffen grundsätzlich so gering wie möglich gehalten werden. Neben Maßnahmen der Energie- und Materialeffizienz sollten Dekarbonisierungspfade deshalb unbedingt die möglichst weitgehende Minimierung des gesamten Energiebedarfs beinhalten und Maßnahmen entwickeln, die darauf hinwirken.

- o Die erneuerbaren Energien sind materialeitig begrenzt, da die Gewinnung der für die neuen Technologien notwendigen Rohstoffe mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden ist. Deshalb müssen Rohstoffbedarfe inklusive Umweltwirkungen sowie Recycling bei der Entwicklung von Dekarbonisierungspfaden immer mitbetrachtet werden (s.a. SRU 2017b, Kap. 3.5).

115. *Das Potenzial von CCS sollte unter Anlegung strenger Kriterien ausschließlich auf die Neutralisierung geringer, unvermeidlicher Restemissionen beschränkt bleiben, um mittelfristig vollständige Treibhausgasneutralität zu erreichen.* Verfahren zur Extraktion von CO₂ aus der Atmosphäre oder direkt aus Industrieprozessen sind für größere Anwendungen derzeit größtenteils spekulativ, häufig energieintensiv (z.B. DACCS), verbrauchen wichtige Umweltressourcen (z.B. BECCS) und finden zudem wenig öffentliche Akzeptanz. Diese sich entwickelnden Technologien sollten daher nicht als Teil von Strategien zur Minderung der notwendigen Emissionsreduktionen verplant werden. Eine rechnerische Erhöhung des nationalen CO₂-Budgets durch negative Emissionen darf nicht erfolgen. Das Ziel der Treibhausgasneutralität bedeutet, die Emissionen in allen Sektoren möglichst stark zu reduzieren und insbesondere in der Energiewirtschaft und im Verkehr weitestgehend zu vermeiden. Die Menge negativer Emissionen, die durch organische Kohlenstoffspeicherung, wie zum Beispiel eine nachhaltige Wald- und Bodenbewirtschaftung, möglich ist, ist für die Zukunft sehr unsicher und von den klimatischen Bedingungen abhängig. Ein Ausbau der natürlichen Senken kann jedoch die Wahrscheinlichkeit erhöhen, das Budget einzuhalten. Obwohl das Potenzial negativer Emissionen derzeit nicht Teil der strategischen Planung sein sollte, ist deren weitere wissenschaftliche Erforschung und technologische Entwicklung sinnvoll.

Budgetlogik und ambitionierte Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen in der Klimagovernance verankern

116. *Mit Blick auf das begrenzte CO₂-Budget, das deutsche Langfristziel 2050 und die europäischen Debatten bedürfen die deutschen Klimaziele für 2030 und 2040 einer deutlichen Verschärfung.* Eine politische Debatte über die Anhebung der deutschen Klimaziele und zur Verabschiedung weiterer Klimaschutzmaßnahmen sollte daher zeitnah geführt und kontinuierlich weiterverfolgt werden. Das Bundes-Klimaschutzgesetz sieht die Möglichkeit der Zielanhebung explizit vor, sollte dies zur Erfüllung europäischer oder internationaler Klimaschutzziele not-

wendig sein. Dies ist der Fall, wie die Berechnung eines Paris-kompatiblen CO₂-Budgets gezeigt hat. Das Ambitionsniveau der Klimaziele sollte daher an diesem CO₂-Budget gemessen und eine mögliche Ambitionsücke offen diskutiert werden. Dazu ist es nicht notwendig, zukünftig allein auf Treibhausgasbudgets zur politischen Steuerung zu setzen. Vielmehr sollten die Reduktionsziele so ausgestaltet werden, dass sie mit einem Paris-kompatiblen CO₂-Budget vereinbar sind.

Da es sich die neue Europäische Kommission mit dem European Green Deal zum Ziel gesetzt hat, das Ambitionsniveau der Klimaziele 2030 anzuheben und Treibhausgasneutralität bis 2050 anzustreben, bedürfen die deutschen Klimaziele auch in dieser Hinsicht einer Anpassung. Hebt Europa das Treibhausgasreduktionsziel 2030 auf 50 bis 55 % an, wie von der Europäischen Kommission vorgeschlagen, und senkt die jährlichen Emissionszuweisungen der Klimaschutzverordnung, drohen erhebliche Kosten für die Bundesrepublik durch den notwendigen Erwerb weiterer Emissionsberechtigungen anderer Mitgliedstaaten über das bereits projektierte Maß hinaus.

117. *Das Bundes-Klimaschutzgesetz ist ein Schritt in die richtige Richtung. Es sollte nachfolgend systematisch darauf ausgerichtet werden, sowohl die Ambitions- als auch die Umsetzungslücke zu schließen.* Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz sind die nationalen Klimaziele erstmalig gesetzlich verankert. Zulässige Jahresemissionsmengen tragen zu einem höheren Maß an Ressortverantwortung bei und helfen, zukünftige Umsetzungslücken zu vermeiden. Für den LULUCF-Bereich ist im nächsten Jahrzehnt europarechtlich ein verbindlicher Ausgleich von Emissionen und Senken durch die Landnutzung vorgesehen. Da auch hier das Ressortprinzip zum Tragen kommt, könnte die Landnutzung als eigener Sektor mit einem jährlichen, an den europäischen Vorgaben orientierten Budget bei den zulässigen Jahresemissionsmengen ergänzt werden.

Das existierende Klimaschutzprogramm reicht voraussichtlich nicht aus, um die gesetzlich festgelegten Jahresemissionsmengen einzuhalten. Die Umsetzungslücke der Klimapolitik wird für Deutschland zum Haushaltsrisiko, die Kosten werden aber nicht von den Verursachern getragen. Würden die Kosten für den Erwerb zusätzlicher Emissionsrechte aus anderen Mitgliedstaaten an den entsprechenden Ressorthaushalt übertragen, entspräche dies dem Verursacherprinzip. Denkbar wäre auch eine sektorale Anpassung der CO₂-Bepreisung bzw. eine Verteuerung der CO₂-Zertifikate des nationalen Emissionshandelssystems in Folge einer sektoralen Zielverfeh-

lung. Dies würde zusätzliche Einnahmen für den Erwerb der notwendigen Emissionsrechte generieren und dämpfend auf die Emissionsentwicklung im entsprechenden Sektor wirken.

118. *Die Einbindung und Berücksichtigung von wissenschaftlicher Expertise für klimapolitische Zielsetzungen sowie der Entwurf von Maßnahmen und die Evaluation ihrer Wirksamkeit sind zu stärken.* Mit dem durch das Bundes-Klimaschutzgesetz etablierten Expertenrat für Klimafragen existiert zukünftig ein Gremium, welches umfassende wissenschaftliche Kompetenz im Bereich der Klimawissenschaft, -politik und -ökonomie besitzt. In Anbetracht dessen fällt sein Mandat verhältnismäßig klein aus.

Der Expertenrat soll zukünftig die Emissionsentwicklung sowie eine mögliche Umsetzungslücke dokumentieren und wird beim Beschluss von Klimaschutzprogrammen von der Regierung zur Bestätigung der Treibhausgasminde rungswirkung konsultiert. Damit beschränkt sich sein Mandat weitgehend auf die Evaluation. Ein wirksames Monitoring umfasst aber weitere Aspekte. Um Umsetzungslücken bereits frühzeitig zu erkennen und eine wissenschaftliche öffentliche Debatte über Klimaschutzmaßnahmen zu ermöglichen, sollte daher das Mandat des Expertenrats für Klimafragen aufgewertet werden:

- Das Gremium sollte das Ambitionsniveau der deutschen Klimaziele evaluieren und gegebenenfalls eine Anpassung empfehlen. Zudem sollte die Größe einer Ambitions lücke festgestellt und transparent kommuniziert werden. Mit einem Paris-kompatiblen CO₂-Budget, zu dem sich die Bundesregierung bekennen sollte, läge ein entsprechender Bewertungsmaßstab vor. Sollte sich der Stand der Wissenschaft zur Größe des verbleibenden globalen CO₂-Budgets verändern, kann der Expertenrat der Bundesregierung, falls notwendig, eine Anpassung des nationalen Budgets empfehlen.
- Der Expertenrat sollte eigenständig emissionsmindernde Maßnahmen vorschlagen, Gutachten verfassen und Dekarbonisierungsszenarien entwickeln dürfen, statt ausschließlich die Vorschläge der Bundesregierung auf Plausibilität zu überprüfen. Die vorhandene wissenschaftliche Expertise ließe sich nutzen, um alternative, kostenoptimierte und auch sozialverträgliche sektorale Szenarien für die budget-kompatiblen Treibhausgasminde rungspfade zu entwerfen, eine öffentliche Debatte zu ermöglichen und der Politik realistische Entscheidungsgrundlagen zur

Zielerreichung zu bieten. Nur so kann von vorn herein das Risiko weiterer Umsetzungslücken minimiert werden.

119. *Die Bundesregierung sollte sich im Rahmen der Umsetzung des European Green Deal und der Langfriststrategie europaweit für ambitionierten Klimaschutz einsetzen.* Mit der deutschen EU-Ratspräsidentschaft im 2. Halbjahr 2020 hat die Bundesregierung die Chance, Paris-kompatible Klimaziele und den Budgetgedanken im europäischen Klimagesetz und im aktualisierten europäischen NDC 2020 zu verankern. Die Europäische Kommission schlägt vor, auch das mittelfristige EU-Treibhausgasreduktionsziel bis 2030 von 40 % auf 50 bis 55 % im Vergleich zu 1990 anzuheben (Europäische Kommission 2019b, S. 5). Die Bundesregierung sollte dieses Vorhaben im Europäischen Rat unterstützen. Da sich sowohl aus dem EU ETS als auch aus der Klimaschutzverordnung Emissionsmengen bis 2030 ableiten lassen, können die existierenden und möglichen zukünftigen Ziele und ihre Umsetzung auf ihre Paris-Kompatibilität im Sinne des Budgetgedankens überprüft werden.

120. *Die deutsche Klimapolitik sollte besser auf EU-Ziele und -prozesse abgestimmt werden.* Die rechtzeitige Ausarbeitung der Maßnahmenprogramme und die turnusgemäße Überarbeitung des Klimaschutzplans (BMU 2019a, S. 78) wurde verpasst, was Auswirkungen auf die europäischen Berichtspflichten hatte. Zukünftig sollten die Überarbeitung des Klimaschutzplans und der Klimaschutzprogramme so erfolgen, dass sie die europäischen Berichtspflichten im Rahmen der Governance-Verordnung erfüllen und eine angemessene Beteiligung der Öffentlichkeit sicherstellen. Bis zum 30. Juni 2023 muss Deutschland einen aktualisierten NECP vorlegen. Spätestens zu diesem Zeitpunkt muss eine Fortschreibung des Klimaschutzplans mit einer möglichst Paris-kompatiblen Ambitionserhöhung, eine entsprechende Verschärfung der Jahresemis sionsmengen bis 2030 und die Fortschreibung des Klimaschutzprogramms 2030 zur sicheren Zielerreichung beschlossen sein.

2.6 Fazit

121. Die drohenden dramatischen Folgen eines ungebremsten Klimawandels sind wissenschaftlich seit langem gut dokumentiert. In den letzten Jahren wurden erste Auswirkungen auch in Deutschland erlebbar. Auch in Folge dessen rückt die Klimapolitik wieder verstärkt in den Fokus der öffentlichen Debatte. Während Deutsch-

land in der Vergangenheit oft als klimapolitischer Vorreiter galt, ist dies nun nicht länger der Fall. Da die Wirksamkeit der klimapolitischen Maßnahmen hinter dem Notwendigen deutlich zurückbleibt, werden klimapolitische Ziele wie das Treibhausgasreduktionsziel 2020 voraussichtlich verfehlt. Die Bundesregierung hat angesichts dieser Situation ein Klimaschutzgesetz sowie das Klimaschutzprogramm 2030 auf den Weg gebracht, dessen Wirksamkeit im Einzelnen abzuwarten bleibt. Es ist jedoch absehbar, dass die eingeleiteten Klimaschutzmaßnahmen in der Summe nicht ausreichen werden, um die deutschen Klimaziele bis 2030 zu erreichen, geschweige denn einen angemessenen Beitrag zur Einhaltung des Pariser Klimaabkommens zu liefern. In Anbetracht dieser Abweichungen sollten zwei Vorhaben entschlossen verfolgt werden: Zum einen sollte die bestehende Umsetzungslücke zwischen existierenden Klimazielen und Emissionsentwicklung durch entsprechende Maßnahmen zügig geschlossen werden. Zum anderen sollte das Ambitionsniveau der deutschen Klimaziele neu beurteilt und erhöht werden, um es an die aus dem Pariser Klimaabkommen folgenden Notwendigkeiten anzupassen.

122. Aus Sicht des SRU stellt das CO₂-Budget eine geeignete Bewertungsgrundlage dar, um die deutschen Klimaziele und Maßnahmen an ihrem Beitrag zur Einhaltung des Pariser Klimaabkommens zu messen. Das globale CO₂-Budget ist eine naturwissenschaftlich ableitbare Größe, die angibt, wie viele CO₂-Emissionen bis zum Erreichen der Treibhausgasneutralität maximal noch ausgestoßen werden dürfen. Dabei darf die globale Temperaturerhöhung den im Klimaabkommen von Paris festgelegten Maximalwert von deutlich unter 2 °C nicht überschreiten. Wird ein globales CO₂-Restbudget ermittelt, sind dabei wissenschaftliche Unsicherheiten zu berücksichtigen, die aus der Komplexität der Klimareaktionen im Erdsystem resultieren. Trotzdem lässt sich ein robustes Budget ermitteln, welches auch vom IPCC berichtet wird. Das globale CO₂-Budget lässt sich auf die Staatengemeinschaft verteilen, um nationale Restbudgets zu definieren. Da im Pariser Klimaabkommen weder verbindliche nationale Reduktionsziele noch ein Verteilungsschlüssel für das globale Budget festgelegt wurden, sind hierfür verschiedene Varianten denkbar, welche jedoch verschiedenen Vorstellungen von Verteilungsgerechtigkeit und Leistungsfähigkeit der einzelnen Staaten folgen.

Der SRU empfiehlt der Bundesregierung, sowohl die bestehende Umsetzungslücke als auch die noch bestehende Ambitionsücke zwischen den nationalen und globalen klimapolitischen Zielen transparent zu machen. Darauf aufbauend sollte die Bundesregierung die natio-

nale Verpflichtung, die sich aus ihrer Sicht aus dem Pariser Klimaabkommen ergibt, mithilfe eines nationalen CO₂-Budgets quantitativ bestimmen und begründen. Der SRU schlägt eine Variante vor, mit der aus dem globalen ein deutsches CO₂-Budget abgeleitet werden kann. Die Rechnung steckt dabei die Obergrenze eines naturwissenschaftlich, völkerrechtlich und unter dem Blickwinkel der globalen Verteilungsgerechtigkeit vertretbaren nationalen Budgets ab. Dabei sind insbesondere die historischen Emissionen und die Wirtschaftskraft Deutschlands sowie die Risiken, die von einer globalen Erwärmung über 1,5 °C ausgehen, belastbare Gründe, sich zu einem ambitionierten Restbudget zu bekennen.

123. Unabhängig von Details der Festlegung auf ein bestimmtes CO₂-Budget ist es angesichts der derzeit zu langsam sinkenden Emissionen dringend notwendig, dass weitere Maßnahmen ergriffen werden. Langfristige Investitionszyklen und die Substituierbarkeit fossiler durch erneuerbare Energieträger sowie notwendige Forschungs- und Entwicklungsarbeit müssen aus der Perspektive des Budgets vorausschauend in die Planung von Klimaschutzmaßnahmen einbezogen werden. Die Dekarbonisierungspfade sollten möglichst geringe Rohstoffbedarfe inklusive Umweltwirkungen aufweisen und Optionen für das Recycling berücksichtigen. Um die notwendigen Ausstiegspfade aus fossilen Energieträgern zu realisieren, ist der entsprechende Ausbau erneuerbarer Energien essenziell. Die Nutzung von Kohle, Erdöl, Erdgas, Benzin und Diesel kann ohne diese Kopplung nicht rechtzeitig reduziert und anschließend beendet werden. Die Atomenergie ist aus ökonomischen, ökologischen und sicherheitspolitischen Gründen keine Option zur klimaschonenden Stromerzeugung. Der SRU empfiehlt, den Einsatz von CCS-Technologien, welche sich durchweg noch in der Entwicklung befinden und deren ökologische Folgen strittig sind, unter Wahrung strenger Kriterien lediglich für Prozesse mit dauerhaft unvermeidbaren Restemissionen vorzuhalten. In diesem Zusammenhang ist auch Biomasse limitiert einzusetzen, die großskalige energetische Nutzung von eigens geerntetem Stammholz ist gänzlich zu vermeiden. Der Klimaschutzbeitrag der Biomasse muss hinsichtlich der CO₂-Wirkung und möglicher Potenziale genau geprüft werden. Ihre Nutzung sollte insbesondere bei Bezug aus internationalen Märkten dahingehend wirksam reguliert werden, dass ausschließlich ein nachhaltiger, klimaschutzfreundlicher Einsatz gewährleistet ist.

124. Mit der Einigung auf ein Klimaschutzprogramm 2030 und das Bundes-Klimaschutzgesetz geht die Bundesregierung einen ersten Schritt in Richtung Verrechtlichung der Klimapolitik und einer verbesserten

Überprüfbarkeit des Reduktionsfortschritts. Um die bestehende Umsetzungslücke zügig zu reduzieren und dem Budgetgedanken Rechnung zu tragen, sollten jedoch die sektorale Verantwortlichkeit sowie das Monitoring und die Evaluation der Klimapolitik effektiv gestärkt werden. Dazu würde eine deutliche Erweiterung des Mandats des Expertenrats für Klimafragen beitragen. Dieser sollte aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse über die Größe des verbleibenden globalen CO₂-Budgets sammeln. Falls notwendig, sollte er der Bundesregierung empfehlen, das als Maßstab für die Klimaziele geltende nationale CO₂-Budget an die neuen Erkenntnisse anzupassen. Zu dem Mandat des Expertenrats könnte weiterhin gehören, die Bundesregierung bei der Anpassung der Jahresemissionsmengen des Bundes-Klimaschutzgesetzes und der Anhebung existierender Reduktionsziele proaktiv zu beraten sowie deren Umsetzung fortlaufend zu begleiten. Dazu wäre durch das Gremium nicht nur die Umsetzungslücke zu dokumentieren, sondern es sollte der Bundesregierung alternative budgetkompatible Dekarbonisierungspfade für verschiedene Sektoren vorschlagen, die auf dem Stand der Forschung basieren.

125. Die Europäische Kommission verhandelt derzeit im Rahmen des European Green Deal über eine Anhebung der europäischen Klimaziele 2030 und das Ziel der Klimaneutralität bis 2050. Sie erkennt damit an, dass die bisherigen europäischen Klimaziele nicht ambitioniert genug sind, um einen fairen Beitrag zur Begrenzung des Temperaturanstiegs gemäß dem Pariser Klimaabkommen zu leisten. Eine zügige Ausrichtung der deutschen Klimaziele am Klimaabkommen von Paris ist daher auch europapolitisch sinnvoll und notwendig.

2.7 Literatur

AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energienbilanzen) (2019): Energieverbrauch in Deutschland – Daten für das 1.–4. Quartal 2018. Berlin: AGEB. https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=quartalsbericht_q4_2018.pdf (13.12.2019).

Agentur für Erneuerbare Energien (2019): Grafik-Dossier: Akzeptanzumfrage 2019. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien. <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/grafik-dossier-akzeptanzumfrage-2019> (11.11.2019).

Agora Energiewende (2018): 65 Prozent Erneuerbare bis 2030 und ein schrittweiser Kohleausstieg. Auswir-

kungen der Vorgaben des Koalitionsvertrags auf Strompreise, CO₂-Emissionen und Stromhandel. Berlin: Agora Energiewende. <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/65-prozent-erneuerbare-bis-2030-und-ein-schrittweiser-kohleausstieg/> (13.01.2019).

Agora Energiewende (2017): Das Klimaschutzziel von -40 Prozent bis 2020: Wo landen wir ohne weitere Maßnahmen? Berlin: Agora Energiewende. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2015/Kohlekonsens/Agora_Analyse_Klimaschutzziel_2020_07092016.pdf (30.08.2019).

Agora Energiewende, Agora Verkehrswende (2019): Klimaschutz auf Kurs bringen. Wie eine CO₂-Bepreisung sozial ausgewogen wirkt. Berlin: Agora Energiewende, Agora Verkehrswende. [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/CO₂-Bepreisung/Agora-Verkehrswende_Agora-Energiewende_CO₂-Bepreisung-WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/CO2-Bepreisung/Agora-Verkehrswende_Agora-Energiewende_CO2-Bepreisung-WEB.pdf) (09.12.2019).

Agora Energiewende, Agora Verkehrswende (2018): Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt. Die Klimaschutzverpflichtungen Deutschlands bei Verkehr, Gebäuden und Landwirtschaft nach der EU-Effort-Sharing-Entscheidung und der EU-Climate-Action-Verordnung. Berlin: Agora Energiewende, Agora Verkehrswende. https://www.stiftung-mercator.de/media/downloads/3_Publikationen/2018/Oktober/142_Nicht-ETS-Papier-WEB.pdf (18.12.2018).

Agostini, A., Giuntoli, J., Boulamanti, A. (2014): Carbon accounting of forest bioenergy. Conclusions and recommendations from a critical literature review. Luxembourg: Publications Office of the European Union. JRC Science for Policy Report EUR 25354 EN. http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC70663/eur25354en_online.pdf (29.08.2019).

Allen, M. R., Frame, D. J., Huntingford, C., Jones, C. D., Lowe, J. A., Meinshausen, M., Meinshausen, N. (2009): Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature* 458, S. 1163–1166.

Angerer, G., Buchholz, P., Gutzmer, J., Hagelüken, C., Herzig, P., Littke, R., K.Thauer, R., Wellmer, F.-W. (2016): Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Geologie, Märkte, Umwelteinflüsse. München, Halle (Saale), Mainz: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. *Energiesysteme der Zukunft*.

- Antoni, J., Borger, J., Kalis, M., Schäfer-Stradowsky, S., Selinger, J., Rodi, M. (2019): Verfassungsmäßigkeit des Entwurfs zum Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG-E). Rechtswissenschaftliches Kurzgutachten und Stellungnahme im Auftrag der Stiftung Neue Energie. Berlin: Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2019/11/2019-11-05_IKEM_Kurzgutachten_BEHG-E_final.pdf (09.12.2019).
- Appunn, K. (2019): Germany's climate obligations under the EU Effort Sharing scheme. Berlin: Clean Energy Wire CLEW. Factsheet. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-climate-obligations-under-eu-effort-sharing-scheme> (30.08.2019).
- Arnold, K. (2015): CCS und Biomasse. In: Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.): CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie. Heidelberg: Springer, S. 483–507.
- Bach, S., Isaak, N., Kemfert, C., Kunert, U., Schill, W.-P., Schmalz, S., Wäger, N., Zaklan, A. (2019a): CO₂-Bepreisung im Wärme- und Verkehrssektor. Diskussion von Wirkungen und alternativen Entlastungsoptionen. Endbericht des gleichnamigen Forschungsvorhabens im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Politikberatung kompakt 140. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.676034.de/diwkompakt_2019-140.pdf (05.11.2019).
- Bach, S., Isaak, N., Kemfert, C., Wäger, N. (2019b): Lenkung, Aufkommen, Verteilung: Wirkungen von CO₂-Bepreisung und Rückvergütung des Klimapakets. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. DIW aktuell 24/2019. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.683685.de/diw_aktuell_24.pdf (09.12.2019).
- BEE (Bundesverband Erneuerbare Energie) (2019): Das „BEE-Szenario 2030“ – 65% Erneuerbare Energien bis 2030 Berlin: BEE. https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Positionspapiere_Stellungnahmen/BEE/20190606_BEE_Szenario_2030_online.pdf (28.08.2019).
- Besnard, M., Buser, M., Fairlie, I., MacKerron, G., Macfarlane, A., Matyas, E., Marignac, Y., Sequens, E., Swahn, J., Wealer, B., Jungjohann, A. (2019): The World Nuclear Waste Report 2019. Focus Europe. Berlin, Brüssel: Heinrich-Böll-Stiftung u. a. https://www.boell.de/sites/default/files/2019-11/World_Nuclear_Waste_Report_2019_Focus_Europe_0.pdf?dimension1=division_nona (13.01.2019).
- BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung) (2019): Standortauswahlverfahren. Peine: BGE. <https://www.bge.de/standortsuche/standortauswahlverfahren/> (11.11.2019).
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (o. J.): Rohstoffverfügbarkeit. Hannover: BGR. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Rohstoffverfuegbarkeit/rohstoffverfuegbarkeit_node.html;jsessionid=0A28026D6933183B24D487412CB CA676.1_cid284 (10.07.2017).
- Blagoeva, D. T., Patrícia Aves Dias, P., Marmier, A., Pavel, C. C. (2016): Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU. Wind Power, photovoltaic and electric vehicles technologies, time frame 2015–2030. Luxembourg: Publications Office of the European Union. JRC Science for Policy Report EUR 28192 EN.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2019a): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. 2. Aufl. Berlin: BMU. http://www.bmu.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf (22.02.2019).
- BMU (2019b): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Berlin: BMU. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1> (27.01.2020).
- BMU (2019c): Projektionsbericht 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Berlin: BMU. <https://www.bmu.de/download/projektionsbericht-der-bundesregierung-2019/> (19.12.2019).
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2017): Projektionsbericht 2017 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Berlin: BMUB. <https://www.bmu.de/download/projektionsbericht-der-bundesregierung-2017/> (30.08.2019).

- BMUB (2015): Projektionsbericht 2015 gemäß Verordnung 525/2013/EU. Berlin: BMUB.
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2019): Einordnung. Berlin: BMVI. <https://twitter.com/BMVI/status/1172515377433251841> (11.11.2019).
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2019a): Die Energie der Zukunft. Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende. Berichtsjahr 2017. Berlin: BMWi. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/zweiter-fortschrittsbericht-zur-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=18 (11.11.2019).
- BMWi (2019b): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019. Berlin: BMWi. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=52 (13.12.2019).
- BMWi (2019c): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Stand: August 2019. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2018.pdf;jsessionid=3F0257252B53C7D3BF9D995AD261B6F1?__blob=publicationFile&v=22 (11.11.2019).
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie), BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin: BMWi, BMU.
- Bodansky, D. (2016): The Paris Climate Change Agreement: A New Hope? *American Journal of International Law* 110 (2), S. 288–319.
- Boden, T. A., Marland, G., Andres, R. J. (2016): Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Oak Ridge, Tenn.: Carbon Dioxide Information Analysis Center, U. S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory. http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/overview_2013.html (19.12.2019).
- Bongartz, R., Markewitz, P., Biß, K. (2015): CO₂-Abscheidung. In: Wietschel, M., Ullrich, S., Markewitz, P., Schulte, F., Genoese, F. (Hrsg.): *Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 77–92.
- Booth, M. S. (2018): Not carbon neutral: Assessing the net emissions impact of residues burned for bio-energy. *Environmental Research Letters* 13 (3). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaac88/pdf> (29.08.2019).
- Brack, D. (2017): *Woody Biomass for Power and Heat. Impacts on the Global Climate*. London: Chatham House, The Royal Institute for International Affairs, Environment, Energy and Resources Department. <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2017-02-23-woody-biomass-global-climate-brack-final2.pdf> (29.08.2019).
- Bruhin, A., Dinges, K., Ackva, J. (2018): *The Swedish Climate Act. Study*. Berlin: Beacon, Navigant, adelphi. https://www.euki.de/wp-content/uploads/2019/09/20181205_SE_Swedish-Climate-Act_Study.pdf (13.01.2019).
- Brunnengräber, A. (2019): *Ewigkeitslasten: Die „Endlagerung“ radioaktiver Abfälle als soziales, politisches und wissenschaftliches Projekt*. 2., aktualisierte und überarb. Aufl. Baden Baden: Nomos.
- Buchert, M., Dolega, P., Degreif, S. (2019): *Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050. Kurzstudie erstellt im Rahmen des BMBFVerbundprojektes Fab4Lib – Erforschung von Maßnahmen zur Steigerung der Material- und Prozesseffizienz in der Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion über die gesamte Wertschöpfungskette*. Freiburg, Berlin, Darmstadt: Öko-Institut. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Fab4Lib-Rohstoffe-Elektromobilitaet.pdf> (30.01.2020).
- Bundesregierung (2007): *Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm*. Berlin: Bundesregierung.
- Bunge, R., Stäubli, A. (2014): *Metalle. Reserven, Preise, Umwelt*. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*. Bd. 7. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 269–288.
- Cambridge Econometrics (2014): *The Impact of Including the Road Transport Sector in the EU ETS. A report for the European Climate Foundation*. Cambridge: Cambridge Econometrics. www.ebb-eu.org/EBBpressreleases/Cambridge_ETS_transport_Study.pdf (04.11.2019).

- CDU (Christlich Demokratische Union Deutschlands), CSU (Christlich-Soziale Union in Bayern), SPD (Sozialdemokratische Partei Deutschlands) (2018): Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode. Berlin: CDU, CSU, SPD. https://www.cdu.de/system/tdf/media/dokumente/koalitionsvertrag_2018.pdf?file=1 (13.04.2018).
- Chahoud, T., Henseling, K.-O., Burger, A., Hain, B. (1999): Mineralische Rohstoffe und nachhaltige Entwicklung. Hannover: Schweizerbart. Geologisches Jahrbuch / SH, Reihe H: Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft 11.
- Climate Analytics, NewClimate Institute (2019): Climate Action Tracker. Update June 2019. Köln, Berlin: Climate Analytics, Ecofys, NewClimate Institute. https://climateactiontracker.org/documents/537/CAT_2019-06-19_SB50_CAT_Update.pdf (28.08.2019).
- Committee on Climate Change (2018): Biomass in a low-carbon economy. London: Committee on Climate Change. <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Biomass-in-a-low-carbon-economy-CCC-2018.pdf> (29.08.2019).
- Committee on Climate Change (2017): Advice on the new Scottish Climate Change Bill. London: Committee on Climate Change. <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2017/03/Advice-to-Scottish-Government-on-Scottish-Climate-Change-Bill-Committee-on-Climate-Change-March-2017.pdf> (11.11.2019).
- Coumou, D., Robinson, A., Rahmstorf, S. (2013): Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures. *Climatic Change* 118 (3–4), S. 771–782.
- Dale, V. H., Kline, K. L., Parish, E. S., Cowie, A. L., Emory, R., Malmsheimer, R. W., Slade, R., Smith, C. T., Wigley, T. B., Bentsen, N. S., Berndes, G., Bernier, P., Brandão, M., Chum, H. L., Diaz-Chavez, R., Egnell, G., Gustavsson, L., Schweinle, J., Stupak, I., Trianosky, P., Walter, A., Whittaker, C., Brown, M., Chescheir, G., Dimitriou, I., Donnison, C., Goss Eng, A., Hoyt, K. P., Jenkins, J. C., Johnson, K., Levesque, C. A., Lockhart, V., Negri, M. C., Nettles, J. E., Wellisch, M. (2017): Status and prospects for renewable energy using wood pellets from the south-eastern United States. *GCB Bioenergy* 9 (8), S. 1296–1305.
- Danish Council on Climate Change (2019): Rammer for dansk klimapolitik. Copenhagen: Danish Council on Climate Change. https://klimaraadet.dk/da/system/files_force/downloads/rammer_for_dansk_klimapolitik.pdf (11.11.2019).
- Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I. L., Benson, S. M., Bradley, T., Brouwer, J., Chiang, Y.-M., Clack, C. T. M., Cohen, A., Doig, S., Edmonds, J., Fennell, P., Field, C. B., Hannegan, B., Hodge, B.-M., Hoffert, M. I., Ingersoll, E., Jaramillo, P., Lackner, K. S., Mach, K. J., Mastrandrea, M., Ogden, J., Peterson, P. F., Sanchez, D. L., Sperling, D., Stagner, J., Trancik, J. E., Yang, C.-J., Caldeira, K. (2018): Net-zero emissions energy systems. *Science* 360 (6396), eaas9793. <https://science.sciencemag.org/content/sci/360/6396/eaas9793.full.pdf> (29.08.2019).
- Department for Business, Energy & Industrial Strategy of the United Kingdom (2018): Clean Growth. The UK carbon capture usage and storage deployment pathway. An action plan. London: Department for Business, Energy & Industrial Strategy of the United Kingdom. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/759637/beis-ccus-action-plan.pdf (29.08.2019).
- Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste (2018): Aktuelle Klimaschutzziele auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene Nominale Ziele und Rechtsgrundlagen. Berlin: Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste. WD 8 - 3000 - 009/18. <https://www.bundestag.de/resource/blob/543798/743f401f49bea64a7af491c6d9a0b210/wd-8-009-18-pdf-data.pdf> (05.11.2019).
- Deutscher Bundestag (2018): Unterrichtung durch die Bundesregierung. Evaluierungsbericht der Bundesregierung über die Anwendung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes sowie die Erfahrungen zur CCS-Technologie. Berlin: Deutscher Bundestag. Bundestagsdrucksache 19/6891.
- Drax Group (2018): Drax biomass feedstock mix by country of origin, 2017. Selby: Drax Group. <https://shared-assets.adobe.com/link/176cbe98-6f9e-40a0-7cc0-ab05d88102c9> (13.01.2019).
- Dütschke, E., Schumann, D., Pietzner, K. (2015): Chances for and limitations of acceptance for CCS in Germany. In: Liebscher, A., Münch, U. (Hrsg.): *Geological Storage of CO₂-Long Term Security Aspects*. Heidelberg:

- Springer. GEOTECHNOLOGIEN Science Report 22, S. 229–245.
- Duwe, M., Maxter, M., Mederake, L., Ostwald, R., Riedel, A., Umpfenbach, K., Zelljadt, E., Knoblauch, D., Iwaszuk, E., Freundt, M., Finnegan, J., Rüdinger, A. (2017): „Paris compatible“ governance: long-term policy frameworks to drive transformational change. Berlin: Ecologic Institute. https://www.ecologic.eu/sites/files/publication/2018/2138-governance-to-fight-climate-change-112018_0.pdf (02.05.2019).
- Duwe, M., Stockhaus, H. (2019): Klimaschutzgesetze in Europa – Überblick und Bedeutung für ein deutsches Klimaschutzgesetz. Berlin: WWF Deutschland. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_KSG_Gutachten2_EU_Klimaschutzgesetze_DE_Webfassung.pdf (30.08.2019).
- Eckhardt, A., Rippe, K. P. (2016): Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- Edenhofer, O., Flachsland, C., Kalkuhl, M., Knopf, B., Pahle, M. (2019): Bewertung des Klimapakets und nächste Schritte. CO₂-Preis, sozialer Ausgleich, Europa, Monitoring. Berlin: Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change. https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Working%20Paper/2019_MCC_Bewertung_des_Klimapakets.pdf (11.11.2019).
- EEA (European Environment Agency) (2019a): EEA greenhouse gas – data viewer. Data viewer on greenhouse gas emissions and removals, sent by countries to UNFCCC and the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism (EU Member States). Stand: 17.12.2019. Copenhagen: EEA. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer> (16.04.2020).
- EEA (2019b): Trends and projections in Europe 2019. Tracking progress towards Europe’s climate and energy targets. Luxembourg: Publications Office of the European Union. EEA Report 15/2019. <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-1> (11.11.2019).
- EEA (2018): Trends and projections in Europe 2018. Tracking progress towards Europe’s climate and energy targets. Copenhagen: EEA. EEA Report 16/2018. <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2018-climate-and-energy> (30.08.2019).
- Ekardt, F., Wieding, J., Zorn, A. (2018): Paris Agreement, Precautionary Principle and Human Rights: Zero Emissions in Two Decades? Sustainability 10 (8), 2812. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2812/html> (05.12.2019).
- Endres, A. (2013): Umweltökonomie. 4., aktualisierte und erw. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer.
- Ericsson, M., Söderholm, P. (2010): Mineral Depletion and Peak Production. Dundee: University of Dundee, Centre for Energy, Petroleum and Mineral Law and Policy. POLINARES working paper 7.
- Esken, A., Höller, S., Luhmann, H.-J., Pietzner, K., Valentini, D., Viebahn, P., Dietrich, L., Nitsch, J. (2010): RECCS plus: Regenerative Energien (RE) im Vergleich mit CO₂-Abtrennung und -Ablagerung (CCS). Update und Erweiterung der RECCS-Studie. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Ethikkommission Sichere Energieversorgung (2011): Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft. Ein Bericht im Auftrag der Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel. Berlin: Ethikkommission Sichere Energieversorgung.
- Europäische Kommission (2019a): Empfehlung der Kommission vom 18.6.2019 zum Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplanes Deutschlands für den Zeitraum 2021–2030. COM(2019) 4405 endg. Brüssel: Europäische Kommission.
- Europäische Kommission (2019b): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Der europäische Grüne Deal. COM(2019) 640 final. Brüssel: Europäische Kommission.
- Europäische Kommission (2018a): In-depth analysis in support of the Commission Communication COM (2018) 773. A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Brüssel: Europäische Kommission.
- Europäische Kommission (2018b): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss, den Ausschuss der Regionen und die Europä-

ische Investitionsbank. Ein sauberer Planet für alle. Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft. COM(2018) 773 final. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission (2008): Proposal for a decision of the European Parliament and of the Council on the effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020. COM(2008) 17 final. Brüssel: Europäische Kommission.

Europäischer Rat (2019): Tagung des Europäischen Rates (12. Dezember 2019) – Schlussfolgerungen. Brüssel: Rat der Europäischen Union.

Europäischer Rat (2014): Tagung des Europäischen Rates (23./24. Oktober 2014). Schlussfolgerungen zum Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. Brüssel: Europäischer Rat.

European Investment Bank (2019): EIB energy lending policy. Supporting the energy transformation. Luxembourg: European Investment Bank. https://www.eib.org/attachments/strategies/eib_energy_lending_policy_en.pdf (13.01.2019).

Eurostat (2018): The EU in the world – population. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/The_EU_in_the_world_-_population (29.08.2019).

Falkner, R. (2016): The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs* 92 (5), S. 1107–1125.

Feess, E. (2007): *Umweltökonomie und Umweltpolitik*. 3., vollst. überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen.

Finkenrath, M., Nick, S., Bettzüge, M. O. (2015): Ökonomische Aspekte von CCS. In: Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.): *CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie*. Heidelberg: Springer, S. 571–604.

Fishedick, M., Samadi, S., Venjakob, J. (2012): Die Rolle Erneuerbarer Energien für den Klimaschutz am Beispiel Deutschlands. In: Müller, T. (Hrsg.): *20 Jahre Recht der Erneuerbaren Energien*. Baden-Baden: Nomos. Schriften zum Umweltenergie recht 10, S. 51–73.

FÖS (Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft) (2019): *Ist das Klimapakete noch zu retten?* Berlin: FÖS. Policy Brief 11/2019. <http://www.foes.de/pdf/2019-11-FOES-Nachbesserungen%20oekonomische%20Instrumente%20Klimapakete.pdf> (09.12.2019).

Frankfurter Allgemeine Zeitung (20.04.2011): Köcher, R.: Eine atemraubende Wende. <https://www.faz.net/aktuell/politik/energiepolitik/umfrage-fuer-die-f-a-z-zur-atomkraft-eine-atemraubende-wende-1628015.html> (28.08.2019).

Fridays for Future (2019): Unserer Forderungen an die Politik. o. O.: Fridays for Future. <https://fridaysforfuture.de/forderungen/> (11.11.2019).

Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Bakker, D. C. E., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., Bopp, L., Buitenhuis, E., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Currie, K. I., Feely, R. A., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Gruber, N., Gutekunst, S., Harris, I., Haverd, V., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Joetzger, E., Kaplan, J. O., Kato, E., Klein Goldewijk, K., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Marland, G., McGuire, P. C., Melton, J. R., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S. I., Neill, C., Omar, A. M., Ono, T., Peregón, A., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Séférian, R., Schwinger, J., Smith, N., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., Werf, G. R. van der, Wiltshire, A. J., Zaehle, S. (2019): *Global Carbon Budget 2019*. *Earth System Science Data* 11 (4), S. 1783–1838.

Frondel, M., Grösche, P., Huchtemann, D., Oberheitmann, A., Peters, J., Vance, C., Angerer, G., Sartorius, C., Bucholz, P., Röhling, S., Wagner, M. (2006): *Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen*. Endbericht. Hannover, Karlsruhe, Essen: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/angebots-nachfragesituation-mineral-rohstoffe-endber2006.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (10.07.2017).

Frondel, M., Sommer, S. (2019): *Schwindende Akzeptanz für die Energiewende? Ergebnisse einer wiederhol-*

- ten Bürgerbefragung. *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 43 (1), S. 27–38.
- Fujimori, S., Rogelj, J., Krey, V., Riahi, K. (2019): A new generation of emissions scenarios should cover blind spots in the carbon budget space. *Nature Climate Change* 9 (11), S. 798–800.
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Oliveira Garcia, W. de, Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., Zamora Dominguez, M. del M., Minx, J. C. (2018): Negative emissions. Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* 13 (6), 063002. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>.
- Geden, O., Schäfer, S. (2016): „Negative Emissionen“ als klimapolitische Herausforderung. Berlin: Stiftung Wissenschaft und Politik. SWP-Aktuell 70/2016.
- Geden, O., Schenuit, F. (2019): Klimaneutralität als Langfrist-Strategie. Berlin: Stiftung Wissenschaft und Politik. SWP-Aktuell 38/2019.
- Gerbert, P., Herhold, P., Burchardt, J., Schönberger, S., Rechenmacher, F., Kirchner, A., Kemmler, A., Wünsch, M. (2018): Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI) durch The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos. München, Hamburg, Berlin, Basel: The Boston Consulting Group, Prognos AG. <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/> (04.11.2019).
- Gibon, T., Hertwich, E. (2014): A Global Environmental Assessment of Electricity Generation Technologies with Low Greenhouse Gas Emissions. *Procedia CIRP* 15, S. 3–7.
- Global CCS Institute (2018): The Global Status of CCS. Melbourne: Global CCS Institute. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/download/> (11.11.2019).
- Gores, S., Graichen, J. (2018): Abschätzung des erforderlichen Zukaufs an Annual Emission Allowances bis 2030. Berlin: Öko-Institut e.V. Memo. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Abschaetzung-des-Zukaufs-von-AEA-bis-2030.pdf> (24.10.2018).
- Greenpeace (2014): Alternde Atomreaktoren: eine neue Ära des Risikos. Kurzfassung zum Greenpeace-Report. Hamburg: Greenpeace. <https://www.greenpeace.de/presse/publikationen/alternde-atomreaktoren-eine-neue-ara-des-risikos> (28.08.2019).
- Gronwald, M., Ketterer, J. (2009): Zur Bewertung von Emissionshandel als Politikinstrument. *ifo Schnelldienst* 62 (11), S. 22–25.
- Haberl, H., Sprinz, D., Bonazountas, M., Cocco, P., Desaubies, Y., Henze, M., Hertel, O., Johnson, R. K., Kastrup, U., Laconte, P., Lange, E., Novak, P., Paavola, J., Reenberg, A., Hove, S. van den, Vermeire, T., Wadhams, P., Searchinger, T. (2012): Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. *Energy Policy* 45, S. 18–23.
- Hagedorn, G., Loew, T., Seneviratne, S. I., Lucht, W., Beck, M.-L., Hesse, J., Knutti, R., Quaschnig, V., Schleimer, J.-H., Mattauch, L., Breyer, C., Hübener, H., Kirchengast, G., Chodura, A., Clausen, J., Creutzig, F., Darbi, M., Daub, C.-H., Ekardt, F., Göpel, M., Judith N, H., Hertin, J., Hickler, T., Köhncke, A., Köster, S., Krohmer, J., Kromp-Kolb, H., Leinfelder, R., Mederake, L., Neuhaus, M., Rahmstorf, S., Schmidt, C., Schneider, C., Schneider, G., Seppelt, R., Spindler, U., Springmann, M., Staab, K., Stocker, T. F., Steining, K., Hirschhausen, E. von, Winter, S., Wittau, M., Zens, J. (2019): The concerns of the young protesters are justified: A statement by Scientists for Future concerning the protests for more climate protection. *GAIA* 28 (2), S. 79–87.
- Hainsch, K., Burandt, T., Kemfert, C., Löffler, K., Oei, P.-Y., Hirschhausen, C. von (2018): Emission Pathways Towards a Low-Carbon Energy System for Europe: A Model-Based Analysis of Decarbonization Scenarios. Berlin: DIW Berlin. DIW Discussion Papers 1745.
- Harthan, R. O., Repenning, J., Blanck, R., Böttcher, H., Bürger, V., Emele, L., Görz, W. K., Hennenberg, K., Jörß, W., Ludig, S., Matthes, F. C., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Scheffler, M., Wiegmann, K. (2020): Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (Kurzbericht). Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerien IX“)“. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Climate Change 12/2020. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-05_climate-change_12-2020_treibhausgasminderungswirkungen-klimaschutzprogramm-2030.docx.pdf (18.03.2020).

- Hennenberg, K., Böttcher, H., Wiegmann, K., Reise, J., Fehrenbach, H. (2019): Kohlenstoffspeicherung in Wald und Holzprodukten. *AFZ – Der Wald* 74 (17), S. 36–39.
- Hennenberg, K. J., Böttcher, H., Bradshaw, C. J. A. (2018): Revised European Union renewable-energy policies erode nature protection. *Nature Ecology & Evolution* 2 (10), S. 1519–1520.
- Henning, H.-M., Palzer, A. (2012): 100 % erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Hertwich, E. G., Gibon, T., Bouman, E. A., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G. A., Bergesen, J. D., Ramirez, A., Vega, M. I., Shi, L. (2015): Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low carbon technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (20), S. 6277–6282.
- Hillerbrand, R. (2009): Unsicherheiten in der Klimavorhersage als Herausforderung für die Entscheidungstheorie. *Journal für Generationengerechtigkeit* 9 (3), S. 95–101.
- Hoelt, C., Messinger-Zimmer, S., Zilles, J. (Hrsg.) (2017): Bürgerproteste in Zeiten der Energiewende: Lokale Konflikte um Windkraft, Stromtrassen und Fracking. Bielefeld: transcript. Studien des Göttinger Instituts für Demokratieforschung zur Geschichte politischer und gesellschaftlicher Kontroversen 12.
- Höhne, N., Elzen, M. den, Escalante, D. (2014): Regional GHG reduction targets based on effort sharing: a comparison of studies. *Climate Policy* 14 (1), S. 122–147.
- Holtmark, B. (2012): Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. *Climatic Change* 112 (2), S. 415–428.
- IAEA - PRIS (Power Reactor Information System by the International Atomic Energy Agency) (2019): Nuclear Power Capacity Trend Vienna: IAEA - PRIS. <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/WorldTrendNuclearPowerCapacity.aspx> (29.04.2019).
- IEA (International Energy Agency) (2018): World Energy Outlook 2018. Paris: IEA.
- Infratest dimap (2019): ARD-DeutschlandTREND Oktober 2019. Berlin: Infratest dimap. https://www.infratest-dimap.de/fileadmin/user_upload/DT1910_Bericht.pdf (18.12.2019).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2019): Climate Change and Land. An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva: IPCC. <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/> (08.08.2019).
- IPCC (2018a): 1.5 °C Globale Erwärmung. Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Bonn, Wien, Bern: Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle – DLR Projektträger, ProClim, Umweltbundesamt. <https://www.de-ipcc.de/128.php> (29.04.2019).
- IPCC (2018b): Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: IPCC. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> (12.12.2018).
- IPCC (2014): Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, NY: Cambridge University Press.
- IPCC (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 2: Energy. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies.
- Jacquet, J., Jamieson, D. (2016): Soft but significant power in the Paris Agreement. *Nature Climate Change* 6 (7), S. 643–646.
- Jänicke, M. (2017): The Multi-Level System of Global Climate Governance – the Model and its Current State. *Environmental Policy and Governance* 27 (2), S. 108–121.

- Jeffery, M. L., Gütschow, J., Rocha, M. R., Gieseke, R. (2018): Measuring Success: Improving Assessments of Aggregate Greenhouse Gas Emissions Reduction Goals. *Earth's Future* 6 (9), S. 1260–1274.
- Johnston, C. M. T., Radeloff, V. C. (2019): Global mitigation potential of carbon stored in harvested wood products. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 116 (29), S. 14526–14531.
- Kemfert, C., Burandt, T., Hainsch, K., Konstantin, L., Oei, P.-Y., Hirschhausen, C. von (2017): Atomkraft für Klimaschutz unnötig-kostengünstigere Alternativen sind verfügbar. *DIW Wochenbericht* 84 (47), S. 1049–1058.
- Kemfert, C., Gerbault, C., Hirschhausen, C. von, Lorenz, C., Reitz, F. (2015): Europäische Klimaziele sind auch ohne Atomkraft erreichbar. *DIW Wochenbericht* 82 (45), S. 1063–1070.
- Kemfert, C., Schill, W.-P., Wägner, N., Zaklan, A. (2019a): Umweltwirkungen der Ökosteuer begrenzt, CO₂-Bepreisung der nächste Schritt. *DIW Wochenbericht* 86 (13), S. 216–221.
- Kemfert, C., Schmalz, S., Wägner, N. (2019b): CO₂-Bepreisung im Wärme- und Verkehrssektor. Erweiterung des Emissionshandels löst aktuelles Klimaschutzproblem nicht. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. *DIW Discussion Papers* 1818.
- Kemfert, C., Schmalz, S., Wägner, N. (2019c): CO₂-Steuer oder Ausweitung des Emissionshandels. Wie sich die Klimaziele besser erreichen lassen. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. *DIW aktuell* 20/2019. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.672965.de/diw_aktuell_20.pdf (05.11.2019).
- Klepper, G., Thrän, D. (2019): Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte. München, Halle (Saale), Mainz: acatech, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Union der Akademien der Wissenschaften. *Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft*. https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2019/02/ESYS_Analyse_Biomasse.pdf (29.08.2019).
- Klinski, S., Keimeyer, F. (2019): Zur finanzverfassungsrechtlichen Zulässigkeit eines nationalen Zertifikatehandels für CO₂-Emissionen aus Kraft- und Heizstoffen. *Rechtswissenschaftliches Kurzgutachten*. Berlin: Hochschule für Wirtschaft und Recht, Öko-Institut e.V. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Verfassungsrecht_Emissionshandel_Gebaeude-Verkehr.pdf (04.11.2019).
- Kommission „Wachstum Strukturwandel und Beschäftigung“ (2019): Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“. Abschlussbericht. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (19.12.2019).
- Kost, C., Shammugam, S., Jülich, V., Nguyen, H.-T., Schlegl, T. (2018): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Kunz, C., Kirrmann, S. (2015): Die neue Stromwelt. Szenario eines 100% erneuerbaren Stromversorgungssystems. Eine Studie der Agentur für Erneuerbare Energien. Erstellt im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90 / Die Grünen. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e. V. https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/390.AEE_Neue_Stromwelt_mrz15_Final.pdf (29.04.2019).
- Laganière, J., Paré, D., Thiffault, E., Bernier, P. Y. (2017): Range and uncertainties in estimating delays in greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy sourced from Canadian forests. *GCB Bioenergy* 9 (2), S. 358–369.
- Lazard (2018): Lazard's levelized cost of energy analysis – Version 12.0. o. O.: Lazard. <https://www.lazard.com/media/450773/lazards-levelized-cost-of-energy-version-120-vfinal.pdf> (29.04.2019).
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F. M., Hoppema, M., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Johannessen, T., Jones, C. D., Kato, E., Keeling, R. F., Goldewijk, K. K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S. I., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregon, A., Peters, W., Peylin, P., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., Laan-Luijkx, I. T. van

- der, Werf, G. R. van der, Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., Wright, R., Zaehle, S., Zheng, B. (2018): Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data* 10 (4), S. 2141–2194.
- Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften, acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften), Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften (2018): Governance für die Europäische Energieunion. Gestaltungsoptionen für die Steuerung der EU-Klima und Energiepolitik bis 2030. München, Halle (Saale), Mainz: acatech, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Union der Akademien der Wissenschaften. Stellungnahme. https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/12/ESYS_Stellungnahme_Energieunion.pdf (30.08.2019).
- Lippke, B., Wilson, J., Meil, J., Taylor, A. (2010): Characterizing the Importance of Carbon Stored in Wood Products. *Wood and Fiber Science* 42 (Suppl. 1), S. 5–14.
- 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: Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“.
- Luderer, G., Vrontisi, Z., Bertram, C., Edelenbosch, O. Y., Pietzcker, R. C., Rogelj, J., Boer, H. S. de, Drouet, L., Emmerling, J., Fricko, O., Fujimori, S., Havlík, P., Iyer, G., Keramidas, K., Kitous, A., Pehl, M., Krey, V., Riahi, K., Saveyn, B., Tavoni, M., Vuuren, D. P. van, Kriegler, E. (2018): Residual fossil CO₂ emissions in 1.5–2 °C pathways. *Nature Climate Change* 8 (7), S. 626–633.
- Lüpke, H. von, Neuhoff, K. (2019): Ausgestaltung des deutschen Klimaschutzgesetzes: Grundlage für eine bessere Governance-Struktur. *DIW Wochenbericht* 86 (5), S. 76–81.
- Mace, M. J. (2016): Mitigation Commitments Under the Paris Agreement and the Way Forward. *Climate Law* 6 (1–2), S. 21–39.
- Marcotullio, P. J., Bruhwiler, L., Davis, S., Engel-Cox, J., Field, J., Gately, C., Gurney, K. R., Kammen, D. M., McGlynn, E., McMahon, J., Morrow, W. R., Ocko, I. B., Torrie, R. (2018): Chapter 3: Energy systems. In: Cavallaro, N., Shrestha, G., Birdsey, R., Mayes, M. A., Najjar, R. G., Reed, S. C., Romero-Lankao, P., Zhu, Z. (Hrsg.): *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*. Washington, DC: U.S. Global Change Research Program, S. 110–188.
- Markewitz, P., Zhao, L., Robinius, M. (2017): Technologiebericht 2.3 CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. In: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Fraunhofer ISI (Fraunhofer-Institut Systemtechnik und Innovationsforschung), IZES (Institut für ZukunftsEnergie-Systeme) (Hrsg.): *Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)*. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Fraunhofer ISI, Institut für ZukunftsEnergieSysteme. https://epub.wupperinst.org/files/7051/7051_CCS.pdf (11.11.2019).
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Espinoza, L. T., Angerer, G., Marwede, M., Benecke, S. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Auftragsstudie. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. *DERA Rohstoffinformationen* 28.
- Matthes, F. C. (2010): Der Instrumenten-Mix einer ambitionierten Klimapolitik im Spannungsfeld von Emissionshandel und anderen Instrumenten. Bericht für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin, Darmstadt, Freiburg: Öko-Institut.
- Matthes, F. C., Kallenbach-Herbert, B. (2006): *Mythos Atomkraft. Über die Laufzeitverlängerung von Atomkraftwerken*. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung.
- MCC (Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change) (2016): *Vorsicht beim Werten auf Negative Emissionen*. Berlin: MCC. MCC-Kurz dossier 2/2016. https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Kurz dossiers/Negative_Emissionen/Policy_Brief_NET_DE.pdf (29.08.2019).
- Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S. C. B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D. J., Allen, M. R. (2009): Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature* 458 (7242), S. 1158–1162.
- Mendelevitch, R., Kemfert, C., Oei, P.-Y., Hirschhausen, C. von (2018): *The Electricity Mix in the European Low-Carbon Transformation: Coal, Nuclear, and Renewables*. In: Hirschhausen, C. von, Gerbaulet, C., Kemfert, C., Lorenz, C., Oei, P.-Y. (Hrsg.): *Energiewende „Made in*

- Germany“. *Low Carbon Electricity Sector Reform in the European Context*. Cham: Springer, S. 241–282.
- Meyer-Ohlendorf, N., Meinecke, L. F. (2018): *A Climate Law for Europe. Making the Paris Agreement Real*. Berlin: Ecologic Institut. <https://www.ecologic.eu/15657> (11.11.2019).
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Oliveira Garcia, W. de, Hartmann, J. (2018): Negative emissions. Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters* 13 (6), 063001. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9b/meta#back-to-top-target> (29.04.2019).
- Mitchell, S. R., Harmon, M. E., O’Connell, K. E. B. (2012): Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. *GCB Bioenergy* 4 (6), S. 818–827.
- Morrow, D. R., Buck, H. J., Burns, W. C. G., Nicholson, S., Turkaly, C. (2018): *Why Talk about Carbon Removal?* Washington, DC: Institute for Carbon Removal Law and Policy, American University.
- Mudd, G. M., Ward, J. D. (2008): *Will Sustainability Constraints Cause ‘Peak Minerals’?* University of Auckland. 3rd International Conference on Sustainability Engineering & Science: Blueprints for Sustainable Infrastructure. <http://users.monash.edu.au/~gmudd/files/2008-NZ-Sust-EngSci-Mudd-Ward-SustConstraints-v-Peak-Minerals.pdf> (24.07.2017).
- Myhre, G., Aas, W., Cherian, R., Collins, W., Faluvegi, G., Flanner, M., Forster, P., Hodnebrog, O., Klimont, Z., Lund, M. T., Muelmenstaedt, J., Myhre, C. L., Olivie, D., Prather, M., Quaas, J., Samset, B. H., Schnell, J. L., Schulz, M., Shindell, D., Skeie, R. B., Takemura, T., Tsyro, S. (2017): Multi-model simulations of aerosol and ozone radiative forcing due to anthropogenic emission changes during the period 1990–2015. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17 (4), S. 2709–2720.
- NETL (National Energy Technology Laboratory) (2019): *Best Practices Manuals*. Pittsburgh: NETL. <https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/strategic-program-support/best-practices-manuals> (11.11.2019).
- Neuhoff, K., Richtstein, J., Zipperer, V. (2019): *Klimapfad für eine klimafreundlichere Industrie*. DIW Wochenbericht 86 (18), S. 324–325.
- Norton, M., Baldi, A., Buda, V., Carli, B., Cudlin, P., Jones, M. B., Korhola, A., Michalski, R., Novo, F., Oszlányi, J., Santos, F. D., Schink, B., Shepherd, J., Vet, L., Walloe, L., Wijkman, A. (2019): Serious mismatches continue between science and policy in forest bioenergy. *GCB Bioenergy* 11 (11), S. 1256–1263.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2019): *Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences*. Paris: OECD.
- Oei, P.-Y., Göke, L., Kemfert, C., Kendzierski, M., Hirschhausen, C. von (2019a): *Erneuerbare Energien als Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele im Stromsektor: Studie im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen*. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. *Politikberatung kompakt* 133. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.616181.de/diwkompakt_2019-133.pdf (28.08.2019).
- Oei, P.-Y., Kendzierski, M., Walk, P., Kemfert, C., Hirschhausen, C. von (2019b): *Wann Deutschland sein Klimaziel für 2020 tatsächlich erreicht*. Forschungsprojekt im Auftrag von Greenpeace e. V. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. *Politikberatung kompakt* 143. https://www.diw.de/de/diw_01.c.694705.de/publikationen/politikberatung_kompakt/2019_0143/wann_deutschland_sein_klimaziel_fuer_2020_tatsaechlich_erreicht_forschungsprojekt_im_auftrag_von_greenpeace_e.v.html (13.01.2019).
- Öko-Institut (2017): *Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität*. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Berlin: Agora Verkehrswende.
- Osterath, B. (2017): *Holz statt Kohle – eine gute Idee?* Bonn, Berlin: Deutsche Welle. <https://www.dw.com/de/holz-statt-kohle-eine-gute-idee/a-41609377> (13.01.2019).
- Pause, F., Kahles, M. (2019): *Die finalen Rechtsakte des EU-Winterpakets „Saubere Energie für alle Europäer“*. Teil 1: Governance für die Energieunion und Erneuerbare Energien. *EnergieRecht* 8 (1), S. 9–17.
- Peters, G. (2018a): *Beyond Carbon Budgets*. *Nature Geoscience* 11 (6), S. 378–380.
- Peters, G. (2018b): *Beyond Carbon Budgets*. Oslo: CICERO Center for International Climate Research.

- <https://cicero.oslo.no/no/posts/klima/beyond-carbon-budgets> (18.01.2019).
- Peters, G. P. (2016): The best available science to inform 1.5 °C policy choices. *Nature Climate Change* 6 (7), S. 646–649.
- Rahmstorf, S. (2017): Is there really still a chance for staying below 1.5 °C global warming? o. O.: RealClimate. <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2017/09/is-there-really-still-a-chance-for-staying-below-1-5-c-global-warming/> (16.01.2019).
- Rajamani, L., Werksman, J. (2018): The legal character and operational relevance of the Paris Agreement's temperature goal. *Philosophical Transactions of the Royal Society / A* 376 (2119). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29610368> (05.12.2019).
- Ram, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, S. A., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., Barbosa, L. S. N. S., Fasihi, M., Khalili, S., Breyer, C., Fell, H.-J. (2019): Global Energy System based on 100% Renewable Energy. Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. Lappeenranta, Berlin: Lappeenranta University of Technology, Energy Watch Group. Lappeenranta University of Technology Research Reports 91.
- Ram, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, S. A., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., Barbosa, L. S. N. S., Fasihi, M., Khalili, S., Breyer, C., Fell, H.-J. (2018): Global Energy System based on 100% Renewable Energy. Energy Transition in Europe Across Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. Lappeenranta, Berlin: Lappeenranta University of Technology, Energy Watch Group. Lappeenranta University of Technology Research Reports 89.
- Ramanathan, V., Feng, Y. (2008): On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (38), S. 14245–14250.
- Raupach, M. R., Davis, S. J., Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jotzo, F., Vuuren, D. P. van, Le Quéré, C. (2014): Sharing a quota on cumulative carbon emissions. *Nature Climate Change* 4 (8), S. 873–879.
- Reid, W. V., Ali, M. K., Field, C. B. (2020): The future of bioenergy. *Global Change Biology* 26 (1), S. 274–286.
- Robiou du Pont, Y., Jeffery, M. L., Gütschow, J., Christoff, P., Meinshausen, M. (2016): National contributions for decarbonizing the world economy in line with the G7 agreement. *Environmental Research Letters* 11 (5), 054005. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/5/054005/pdf> (29.08.2019).
- Robiou du Pont, Y., Meinshausen, M. (2018): Warming assessment of the bottom-up Paris Agreement emissions pledges. *Nature Communications* 2018 (9), Art. 4810.
- Rockström, J., Gaffney, O., Rogelj, J., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Schellnhuber, H. J. (2017): A roadmap for rapid decarbonization. *Science* 355 (6331), S. 1269–1271.
- Rodi, M. (2017): Die deutsche Klimaschutzplanung im Lichte einer internationalen „best practice“ Analyse von Klimaschutzgesetzgebung. In: Folz, H.-P. L., Stefan (Hrsg.): *Recht und Realität. Festschrift für Christoph Vedder*. Baden-Baden: Nomos, S. 750–769.
- Rogelj, J., Elzen, M. den, Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., Meinshausen, M. (2016a): Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 534 (7609), S. 631–639.
- Rogelj, J., Forster, P. M., Kriegler, E., Smith, C. J., Séférian, R. (2019): Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets. *Nature* 571 (7765), S. 335–342.
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., Vuuren, D. P. van, Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., Havlík, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Tavoni, M. (2018): Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Climate Change* 8 (4), S. 325–332.
- Rogelj, J., Schaeffer, M., Friedlingstein, P., Gillett, N. P., Vuuren, D. P. van, Riahi, K., Allen, M., Knutti, R. (2016b): Differences between carbon budget estimates unraveled. *Nature Climate Change* 6 (3), S. 245–252.
- Rost, D. (2015): Konflikte auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung-Perspektiven und Erkenntnisse aus dem Streit um die Carbon Capture and Storage-Technologie (CCS). Essen: Kulturwissenschaftliches Institut. <https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/>

- document/42466/ssoar-2015-Rost-Konfliktanalyse_CCS_Abschlussbericht_Modul_A_Demoenergie.pdf?sequence=4&isAllowed=y&lnkname=ssoar-2015-Rost-Konfliktanalyse_CCS_Abschlussbericht_Modul_A_Demoenergie.pdf (29.08.2019).
- RUB (Ruhr-Universität Bochum) (2019): Projekte mit Bundesförderung. Carbon2Chem. Bochum: RUB. <https://forschung.ruhr-uni-bochum.de/de/carbon2chem> (11.11.2019).
- Sachs, N. (2019): The Paris Agreement in the 2020s: Breakdown or Breakup? *Ecology Law Quarterly* 46 (1). <https://ssrn.com/abstract=3463892> (19.12.2019).
- Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (2019): Aufbruch zu einer neuen Klimapolitik. Sondergutachten. Wiesbaden: Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/sg2019/sg_2019.pdf (04.11.2019).
- Sandbag (2019): Playing with fire. An assessment of company plans to burn biomass in EU coal power stations. London: Sandbag. <https://sandbag.org.uk/project/playing-with-fire/> (13.01.2019).
- Schellnhuber, H. J., Rahmstorf, S., Winkelmann, R. (2016): Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Climate Change* 6 (7), S. 649–653.
- Schlacke, S., Lammers, S. (2018): Das Governance-System der Europäischen Energieunion. Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele durch weiche Steuerung? *Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht* 16 (4), S. 424–437.
- Schlesinger, W. H. (2018): Are wood pellets a green fuel? *Science* 359 (6382), S. 1328–1329.
- Schleussner, C.-F., Rogelj, J., Schaeffer, M., Lissner, T., Licker, R., Fischer, E. M., Knutti, R., Levermann, A., Frieler, K., Hare, W. (2016): Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nature Climate Change* 6 (9), S. 827–835.
- Schleussner, C.-F., Tokarska, K. B., Stolpe, M., Pflieger, P., Lejeune, Q., Hare, B. (2018): Carbon budgets for the 1.5°C limit. Berlin: Climate Analytics. https://climateanalytics.org/media/carbon_budgets_1o5c_updated_18092018.pdf (29.04.2019).
- Schmidt, C., Gagern, M. von, Lachor, M., Hage, G., Hoppenstedt, A., Schuster, L., Kühne, O., Weber, F., Rossmeyer, A., Bruns, D., Münderlein, D., Bernstein, F. (2018a): *Landschaftsbild & Energiewende*. Bd. 1: Grundlagen. Bonn-Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz.
- Schmidt, C., Gagern, M. von, Lachor, M., Hage, G., Hoppenstedt, A., Schuster, L., Kühne, O., Weber, F., Rossmeyer, A., Bruns, D., Münderlein, D., Bernstein, F. (2018b): *Landschaftsbild & Energiewende*. Bd. 2: Handlungsempfehlungen. Bonn-Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz.
- Schmidt, H.-P., Anca-Couce, A., Hagemann, N., Werner, C., Gerten, D., Lucht, W., Kammann, C. (2018): Pyrogenic carbon capture and storage. *GCB Bioenergy* 2018. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gcbb.12553> (20.02.2019).
- Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., Katsuta, T., Lovins, A. B., Ramana, M. V., Hirschhausen, C. v., Wealer, B., Stienne, A., Meinass, F. (2019): *The World Nuclear Industry Status Report 2019*. Paris, London: Mycle Schneider Consulting Project. <https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2019-.html> (13.01.2019).
- Searchinger, T. D., Beringer, T., Holtmark, B., Kammen, D. M., Lambin, E. F., Lucht, W., Raven, P., Ypersele, J.-P. van (2018): Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. *Nature Communications* 9 (1), Art. 3741. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-06175-4.pdf> (29.08.2019).
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Bertsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B. J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T. F., Whetton, P., Wood, R. A., Wratt, D. (2007): Technical Summary. In: IPCC (Hrsg.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, S. 19–91.
- Der Spiegel (13.09.2019): Medick, V., Traufetter, G.: Verkehrsministerium verweigert Prüfung seiner Klimaschutzpläne. <https://www.spiegel.de/politik/deutschland/verkehrsministerium-verweigert-pruefung-seiner-klima-schutzplaene-a-1286634.html> (11.11.2019).

- SPP 1689 (Schwerpunktprogramm 1689 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Climate Engineering: Risks Challenges Opportunities?“) (2019): Climate Engineering und unsere Klimaziele – eine überfällige Debatte. o. O.: SPP 1689. https://www.spp-climate-engineering.de/index.php/news.html?file=files/ce-projekt/media/download_PDFs/climateengineering_spp1689_brosch.pdf (13.01.2019).
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2019): Demokratisch regieren in ökologischen Grenzen – Zur Legitimation von Umweltpolitik. Sondergutachten. Berlin: SRU.
- SRU (2017a): Kohleausstieg jetzt einleiten. Berlin: SRU. Stellungnahme.
- SRU (2017b): Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor. Sondergutachten. Berlin: SRU.
- SRU (2016a): Stellungnahme des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) zur Konsultation der Bundesregierung zur Neuauflage der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. Berlin: SRU. http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/06_Hintergrundinformationen/2016_2020/2016_08_Stellungnahme_Nachhaltigkeitsstrategie.pdf?__blob=publicationFile (27.09.2016).
- SRU (2016b): Umweltgutachten 2016. Impulse für eine integrative Umweltpolitik. Berlin: Erich Schmidt.
- SRU (2016c): Zum Entwurf des Klimaschutzplans 2050. Berlin: SRU. Kommentar zur Umweltpolitik 18. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/05_Kommentare/2016_2020/2016_11_KzU_18_Kommentar_Klimaschutzplan.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (11.07.2017).
- SRU (2015): 10 Thesen zur Zukunft der Kohle bis 2040. Berlin: SRU. Kommentar zur Umweltpolitik 14.
- SRU (2013): Den Strommarkt der Zukunft gestalten. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt.
- SRU (2011): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt.
- SRU (2009): Abscheidung, Transport und Speicherung von Kohlendioxid: Der Gesetzentwurf der Bundesregierung im Kontext der Energiedebatte. Berlin: SRU. Stellungnahme 13.
- Statistisches Bundesamt (2019): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Direkte und indirekte CO₂-Emissionen in Deutschland 2010 – 2015. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W. de, Wit, C. A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S. (2015): Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347 (6223), 1259855.
- Sterman, J. D., Siegel, L., Rooney-Varga, J. N. (2018): Does replacing coal with wood lower CO₂ emissions? Dynamic lifecycle analysis of wood bioenergy. *Environmental Research Letters* 13 (1), Art. 015007. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaa512/pdf> (30.08.2019).
- Sussams, L. (2018): Carbon Budgets Explainer. London: Carbon Tracker Initiative. <https://www.carbontracker.org/carbon-budgets-explained/> (15.01.2019).
- Tagesspiegel Background Mobilität & Transport (07.11.2019): Roeser, M.: Gesetze werden durchgepeitscht. <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet-transport/gesetze-werden-durchgepeitscht> (14.01.2019).
- Ter-Mikaelian, M. T., Colombo, S. J., Lovekin, D., McKechnie, J., Reynolds, R., Titus, B., Laurin, E., Chapman, A.-M., Chen, J., MacLean, H. L. (2015): Carbon debt repayment or carbon sequestration parity? Lessons from a forest bioenergy case study in Ontario, Canada. *GCB Bioenergy* 7 (4), S. 704–716.
- Thrän, D., Schaubach, K., Peetz, D., Junginger, M., Mai-Moulin, T., Schipfer, F., Olsson, O., Lamers, P. (2019): The dynamics of the global wood pellet markets and trade – key regions, developments and impact factors. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 13 (2), S. 267–280.
- UBA (Umweltbundesamt) (2020): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2018. Dessau-Roßlau: UBA. http://cdr.eionet.europa.eu/Converters/run_conversion?file=de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envxh8awg/2020-01-07_EU-NIR_2020_final.docx&conv=tohtml&source=local (30.01.2020).
- UBA (2019a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen

- Treibhausgasinventar 1990–2017. Dessau-Roßlau: UBA. Climate Change 23/2019. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-28_cc_23-2019_nir-2019_0.pdf (30.08.2019).
- UBA (2019b): CO₂-Bepreisung in Deutschland. Ein Überblick über die Handlungsoptionen und ihre Vor- und Nachteile. Dessau-Roßlau: UBA. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/factsheet_CO₂-bepreisung_in-deutschland_2019_08_29.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/factsheet_CO2-bepreisung_in-deutschland_2019_08_29.pdf) (04.11.2019).
- UBA (2019c): Daten. Klima. Klimaschutzziele Deutschlands. Stand: 05.06.2019. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/klimaschutzziele-deutschlands> (05.11.2019).
- UBA (2019d): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. 2. Aufl. mit methodischen Anpassungen und Teilneuberechnung in Kapitel 2 und 3. Dessau-Roßlau: UBA. UBA-Hintergrund. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf (18.03.2020).
- UBA (2019e): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2018. Dessau-Roßlau: UBA. UBA-Hintergrund. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_hgp_einzahlen_2019_bf.pdf (14.01.2019).
- UBA (2019f): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE. Kurzfassung. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_kurzfassung_dt_final_komp.pdf (11.11.2019).
- UBA (2019g): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE - Studie. Dessau-Roßlau: UBA. Climate Change 36/2019. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wegen_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf (13.01.2019).
- UBA (2018a): Fact Sheet: EU 2050 strategic vision „A Clean Planet for All“. Brief Summary of the European Commission proposal. Dessau-Roßlau: UBA. . https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/eu_2050_strategic_vision_a_clean_planet_for_all.pdf (02.05.2019).
- UBA (2018b): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990–2017. Stand: 19.12.2018. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2018_12_19_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.0.1.xlsx (28.08.2019).
- UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau: UBA. Climate Change 07/2014.
- UBA (2013a): Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. UBA-Positionspapier. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA (2013b): Themen. Wirtschaft/Konsum. Industriebranchen. Feuerungsanlagen. Stand: 29.07.2013. Dessau-Roßlau: UBA. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebranchen/feuerungsanlagen> (27.06.2014).
- UBA (2011): Geo-Engineering. Wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn? Methoden – Rechtliche Rahmenbedingungen – Umweltpolitische Forderungen. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4125.pdf> (13.01.2019).
- UBA (2010): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf (15.07.2010).
- UBA (2008): CO₂-Abscheidung und Speicherung im Meeresgrund. Meeresökologische und geologische Anforderungen für deren langfristige Sicherheit sowie Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens. Dessau-Roßlau: UBA. UBA-Texte Texte 24/2008. [https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/CO₂-abscheidung-speicherung-im-meeresgrund](https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/CO2-abscheidung-speicherung-im-meeresgrund) (11.11.2019).
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2019a): Emissions Gap Report 2019. Nairobi: UNEP.
- UNEP (2019b): Global Resources Outlook 2019. Natural Resources for the Future we want. Nairobi: UNEP. https://www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/unep_252_global_resource_outlook_2019_web.pdf (06.12.2019).
- UNEP (1992): The Rio Declaration on Environment and Development. Geneva: UNEP. www.unesco.org/education/pdf/RIO_E.PDF (29.04.2019).

- Vidal, O., Goffeé, B., Arndt, N. (2013): Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience* 6 (11), S. 894–896.
- Vielstädte, L., Linke, P., Schmidt, M., Sommer, S., Haeckel, M., Braack, M., Wallmann, K. (2019): Footprint and detectability of a well leaking CO₂ in the Central North Sea: Implications from a field experiment and numerical modelling. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 84, S. 190–203.
- Wachsmuth, J., Michaelis, J., Neumann, F., Wietschel, M., Duscha, V., Degünther, C., Köppel, W., Asif, Z. (2019): Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. *Climate Change* 12/2019. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_cc_12-2019_roadmap-gas_2.pdf (28.08.2019).
- Walker, S., Lydann, C., Perritt, W., Pilla, L. (2015): An Analysis of UK Biomass Power Policy, US South Pellet Production and Impacts on Wood Fiber. Markets Prepared for the American Forest & Paper Association. o. O.: RISI. <https://docplayer.net/25281897-An-analysis-of-uk-biomass-power-policy-us-south-pellet-production-and-impacts-on-wood-fiber-markets-prepared-for-the-american-forest-paper.html> (13.01.2020).
- Walter, A., Wiehe, J., Schlömer, G., Hashemifarzad, A., Wenzel, T., Albert, I., Hofmann, L., Hingst, J. zum, Haaren, C. van (2018): Naturverträgliche Energieversorgung aus 100% erneuerbaren Energien 2050. Bonn: Bundesamt für Naturschutz. BfN-Skripten 501.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag: Der Budgetansatz. Berlin: WBGU. Sondergutachten.
- WBGU (1998): Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Jahresgutachten 1998. Berlin: Springer.
- Wealer, B., Bauer, S., Göke, L., Hirschhausen, C. von, Kemfert, C. (2019): Zu teuer und gefährlich: Atomkraft ist keine Option für eine klimafreundliche Energieversorgung. *DIW Wochenbericht* 86 (30), S. 511–520.
- Wietschel, M., Haendel, M., Boßmann, T., Schubert, G., Michaelis, J., Doll, C., Schломann, B., Köppel, W., Degünther, C. (2018): Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung, Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3714_41_107_sektorkopplungsoptionen_analyse_bf.pdf (29.08.2019).
- World Bank (2017): The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. Washington, DC: World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf> (10.08.2017).
- World Bank (2013): Turn the Heat Down. Climate Extremes, Regional Impacts, and the Case for Resilience. A report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics. Washington, DC: The World Bank.
- Zaluski, W., El-Kaseeh, G., Lee, S.-Y., Piercey, M., Duguid, A. (2016): Monitoring technology ranking methodology for CO₂-EOR sites using the Weyburn-Midale Field as a case study. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 54 (2), S. 466–478.