

# **Klimawandel**

von Ulrich Platt, Norbert Frank, Nicole Aeschbach, Sebastian Harnisch und  
Stefan Wurster

Dieser Text ist die herausgeberisch und redaktionell bearbeitete, aber noch nicht abschließend  
lektorierte und ungesetzte Vorabveröffentlichung eines Kapitels, das im Band

**Umwelt interdisziplinär  
Grundlagen – Konzepte – Handlungsfelder**

**herausgegeben von Thomas Meier, Frank Keppler, Ute Mager,  
Ulrich Platt und Friederike Reents**

bei Heidelberg University Publishing (heiUP; <https://heiup.uni-heidelberg.de/>) Open Access und  
in gedruckter Form erscheinen wird.

Text © die Autoren 2022



Dieser Text ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0 veröffentlicht.

**DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00031288>**

# Klimawandel

Ulrich Platt<sup>1,2</sup>, Norbert Frank<sup>1,2</sup>, Nicole Aeschbach<sup>3,2</sup>, Sebastian Harnisch<sup>4,2</sup>, Stefan Wurster<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg

<sup>2</sup> Heidelberg Center for the Environment (HCE), Universität Heidelberg

<sup>3</sup> Geographisches Institut Heidelberg, Universität Heidelberg

<sup>4</sup> Institut für Politische Wissenschaften, Universität Heidelberg

<sup>5</sup> Hochschule für Politik der Technischen Universität München

**Zusammenfassung:** Unter Klima verstehen wir das über Jahrzehnte gemittelte Wetter. Klima umfasst damit nicht nur die Temperatur, sondern auch andere meteorologische Größen wie Niederschlag, Feuchte, Wind und deren Extremwerte. Wie in dem Beitrag erklärt wird, ist Klimawandel einerseits ein natürliches Phänomen, andererseits wird das Erdklima zunehmend vom Menschen beeinflusst (zu einem großen Teil durch Treibhausgasemissionen). Während diese Tatsache unter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern unstrittig ist, wird über die erforderlichen Gegenmaßnahmen hart gerungen, denn letztere erfordern große Anstrengungen von der Gesellschaft und die Versuchung, auf den Maßnahmen anderer (Staaten) „Trittbrett zu fahren“ ist groß. Eine Reaktion der Politik ist u. a. die UN-Klimarahmenkonvention zur Eindämmung der globalen Treibhausgasemissionen, sie ist Teil der *Climate Governance*.

**Schlüsselworte:** Klima, Klimawandel, Holozän, Treibhausgase, Internationale Abkommen

## Einleitung

Klima nennen wir das über Jahrzehnte gemittelte Wetter. Klima umfasst damit nicht nur die Temperatur, sondern auch Niederschlag, Feuchte, Wind und deren Extremwerte. Klimawandel ist einerseits ein natürliches Phänomen (zwischen Warmzeiten und Eiszeiten ändert sich die mittlere Temperatur der Erde um ca. 2–5 Grad) andererseits wird schon seit mehr als einem Jahrhundert von der Naturwissenschaft prognostiziert (siehe z. B. Arrhenius 1896, →Physik), dass die Emission von Treibhausgasen (wie etwa Kohlendioxid) durch die Aktivität der Menschheit – wenn sie im bisherigen Umfang fortgesetzt wird – Änderungen im Klimasystem verursachen, beziehungsweise bereits verursacht hat (IPCC 2013). Dieser anthropogen-induzierte Klimawandel ist das drängendste und zugleich schwierigste globale Umweltproblem unserer Zeit (→Risiko).

In den Sozial- und Rechtswissenschaften wird der Klimawandel primär als krisenhafte Veränderung der Mensch-Umweltbeziehungen erfasst, die durch kurzfristige, großskalige und schadhafte Verschiebungen von (Lebens-)Ressourcen, Entwicklungschancen und Wertordnungen geprägt sind (Schanze et al. 2020). In der umweltorientierten →Politikwissenschaft wird der sich beschleunigende Klimawandel, der disziplinär erst seit Mitte der 1980er-Jahre systematisch the-

matisiert wurde, zunehmend im Rahmen von „Kipppunkten“ diskutiert, einem interdisziplinären Konzept, indem ein dynamischer Systemzustand kurzfristig und unwiederbringlich in einen neuen (schadhaften) Systemzustand übergeht (Schellnhuber 2009).

## **Naturwissenschaftliche Perspektiven** (→Umweltphysik, →Geowissenschaften)

### **Klima**

In erster Näherung (siehe dazu auch Hansen et al. 2011) ergibt sich die Temperatur der Erdoberfläche durch ein Gleichgewicht zwischen Energiezufuhr durch die Sonneneinstrahlung und Energieabfuhr durch Abgabe von Wärmestrahlung in den Weltraum (der Wärmefluss aus dem heißen Erdinneren beträgt nur etwas mehr als 1/10000 der mittleren Sonneneinstrahlung und ist daher vernachlässigbar). In diesem Zusammenhang ist der sogenannte Treibhauseffekt, also die Erwärmung der Erdoberfläche aufgrund der Rückstreuung von Wärmestrahlung durch atmosphärische Gase, ein für das Leben auf der Erde sehr wichtiges physikalisches Phänomen. Ohne diesen Treibhauseffekt wäre die mittlere Erdtemperatur um ca. 33 Grad geringer (ca.  $-18^{\circ}\text{C}$  statt  $+15^{\circ}\text{C}$ ) und flüssiges Wasser würde kaum existieren. Wenn umgangssprachlich also von einem Treibhauseffekt die Rede ist, so ist damit in aller Regel der zusätzliche Treibhauseffekt durch die oben beschriebene Erhöhung der Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre gemeint. Wasserdampf ist das für unser Klima wichtigste Treibhausgas, dieser ist für ca. 2/3 des natürlichen Treibhauseffektes verantwortlich. Allerdings wird der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre nicht durch anthropogene Emissionen bestimmt, sondern er ist eine Funktion der Erdtemperatur: Bei steigender Temperatur steigt auch der Wasserdampfgehalt und damit der durch ihn verursachte Treibhauseffekt. Dieser Verstärkungseffekt führt dazu, dass der Einfluss (also der zusätzliche Treibhauseffekt) der oben genannten Treibhausgase gegenüber einer hypothetischen Erde ohne Wasserdampf etwa verdreifacht wird. Die für die kommenden Jahrzehnte prognostizierten Veränderungen können den Unterschieden zwischen Kalt- und Warmzeiten der Erdgeschichte entsprechen oder sogar darüber hinausgehen.

Es ist wichtig festzuhalten, dass der Klimawandel ein globales Phänomen darstellt, das aber regional sehr unterschiedliche Auswirkungen hat. Zwei regionale Extreme im natürlichen als auch vom Menschen verursachten Klimawandel bilden die Tropen einerseits und die Polgebiete andererseits. In den Tropen dominiert der Einfluss der Weltmeere und die hohe Sonneneinstrahlung, die eine hohe Luftfeuchte zur Folge hat. Das resultierende Klima ist daher warm und feucht mit geringen saisonalen Schwankungen. Nimmt die Erdtemperatur zu oder ab, so ändern sich die lokalen Rahmenbedingungen in den Tropen vergleichsweise wenig, da die durch Treibhausgase zusätzlich zurückgestrahlte Leistung überwiegend zur Verdampfung von Wasser dient und in mittlere und hohe Breiten transportiert wird. Niederschläge nehmen bei Erwärmung meist zu und die mittlere Temperatur steigt, gedämpft durch die Wärmespeicher der Ozeane. Die Ozeaner-

wärmung im Zusammenhang mit dem menschengemachten Klimawandel ist bereits messbar (ca. 0,4–0,5 Grad seit 1900, siehe z. B. Abraham et al. 2013).

In den Polgebieten zeigt sich Klimawandel dramatisch anders. Hier kann Eis schmelzen, was die Polregionen dunkler erscheinen lässt (das Rückstreuvermögen für Einstrahlung, die Albedo, wird vermindert) und so wird (deutlich) mehr Energie der Sonne gespeichert. Steigende Temperaturen erhöhen regional die Luftfeuchte und damit die Energie der Atmosphäre. Es kommt zu deutlich mehr Niederschlägen und extremen Wetterereignissen. Dies bedeutet, dass Wärme effizienter in die Polregion gebracht wird und die Temperaturen steigen bei Erwärmungen schneller und stärker an. Umgekehrt werden auch Abkühlungen durch mehr Eis und weniger Luftfeuchte verstärkt (Smith et al. 2019). Vegetationsgrenzen sind in den Polgebieten eng mit der saisonalen Verteilung von Sonne, Regen und Wärme verbunden und so führen Klimaveränderungen rasch zu Veränderungen der Vegetation.<sup>1</sup>

Am Ende der letzten Eiszeit sind gigantische Eisschilde über Nordeuropa und Skandinavien sowie über Kanada verschwunden und haben völlig neue Landschaften geschaffen (Lambeck et al. 2014). Künftige Erwärmungen könnten auch das Grönländische Eis zum Schmelzen bringen oder gar Randgebiete der Antarktis. Kurzum, Klimawandel ist in den Tropen nur mäßig zu erwarten, während die Polregionen wesentlich sensibler sind. Eine Ausnahme bildet der Anstieg des globalen Meeresspiegels, der durch das Abschmelzen von polaren Eisschilden und Gletschern verursacht wird, aber deutlich erkennbar auch in den Tropen spürbar ist, während die Entlastung der Antarktis und von Grönland vom Eisdruck sowie die abnehmende Schwerkraft auf die umliegenden Ozeane den Meeresspiegelanstieg in Polregionen mindert. Dazwischen befinden sich die Mittleren Breiten die beide Extreme miteinander verbinden. Achtung also: Regional ausbleibende Veränderungen sind keine Gegenanzeiger für globale Veränderungen. Ebenso sind regional dramatische Veränderungen nicht notwendig Anzeiger für globalen Wandel. Aus naturwissenschaftlicher Perspektive ist es wichtig, die regionalen Beobachtungen zu gewichten und in ihrem jeweiligen regionalen Kontext zu bewerten. Indes bleibt festzuhalten, dass eine globale Erwärmung langfristig die gesamte Erde einschließlich der Tiefenozeane erwärmen wird, denn der Überschuss an Energie, der im Klimasystem durch mehr Treibhausgase erzeugt wird, muss die Erdtemperatur erhöhen, da die Energie nicht einfach aus der Atmosphäre entweichen kann.

Was anhand der hier betrachteten zwei Regionen (Tropen bzw. Polarregionen) zu sichtbaren Unterschieden im Klimawandel führt, gilt auch für zahlreiche kleinere Regionen, deren langfristiges gemittelttes Wetter von regionalen Klimaprozessen überlagert ist. Zum Beispiel sind die Klimabedingungen in Europa stark beeinflusst durch die Westwinde (die Verteilung von Hoch- und Tiefdruckgebieten) sowie den Golfstrom. Die Ausbildung dieses dominanten Wettersystems hängt von der Polregion und den subtropischen Klimabedingungen (Temperatur, Niederschlag, Feuchte und Wind) ab, und so ist unser Klima nicht nur von globalen Trends, sondern auch von Veränderungen der regionalen Wettersysteme geprägt.

---

<sup>1</sup> Fact sheet WWF: Effects\_of\_Climate\_Change\_on\_Arctic\_Vegetation\_fact\_sheet.pdf.

## Natürlicher Klimawandel

Begeben wir uns auf eine kurze Reise in die Vergangenheit. Das Klimasystem der Erde ist auf geologischen Zeitskalen sehr variabel, denn nicht nur äußere Einflüsse, wie die Stärke der Sonneneinstrahlung, die saisonale Verteilung der Strahlung, die Präsenz von Eis und Treibhausgasen in der Atmosphäre veränderten sich, sondern auch die Lage der Kontinente. Zusätzlich ändert(e) sich die Verteilung der Sonneneinstrahlung auf die Nord- und Südhemisphäre und dadurch das Klima durch astronomische Einflüsse – bekannt als *Milankowitch Effekt* (siehe z. B. Huybers und Curry 2006). Die Klimageschichte der Erde zu rekonstruieren, ist daher ein weites Forschungsfeld, in dem wenig (eigentlich fast nichts) über das gemittelte Wetter im Vergleich zur heutigen Situation bekannt ist (→Geowissenschaften). Das Interesse an der Klimageschichte hat seine Wurzeln sicherlich in Erkenntnissen, dass zum Beispiel mitten in Schleswig-Holstein Moränen vergangener Gletscher zu finden sind oder das Flachland vor nicht allzu langer Zeit einmal ein Meer gewesen ist. Auch die Beringstraße zwischen Asien und dem amerikanischen Kontinent war während der Eiszeiten trocken. Vermutlich hat der Mensch dadurch damals die neue Welt entdecken können.

Glücklicherweise hat sich das Interesse an der Variabilität des Klimas mit dem Verständnis, dass es nicht nur Wetter, sondern auch Klima gibt, sehr stark gewandelt. Abbildung 1 zeigt daher eine Synthese der Temperaturgeschichte der Erde, wie sie aus einer großen Anzahl von Studien und mittels sehr unterschiedlicher wissenschaftlicher Methoden abgeleitet wurde. Die Unsicherheiten einer solchen Rekonstruktion über Zeitskalen von bis zu 500 Millionen Jahren sind beachtlich. Die Tatsache, dass es einen solchen wissenschaftlichen Fortschritt und Konsens gibt, ist aber ebenso beachtlich. Von Interesse ist hier weniger, dass das Klima in weit zurückliegender Zeit mit einer unterschiedlichen Lage der Kontinente variierte, sondern die Daten aus den vergangenen etwa eine Million Jahren, denn hier wurde mit Hilfe von Eisbohrkernen, eine plausible Schätzung der Erdmitteltemperatur vorgenommen.<sup>2</sup>

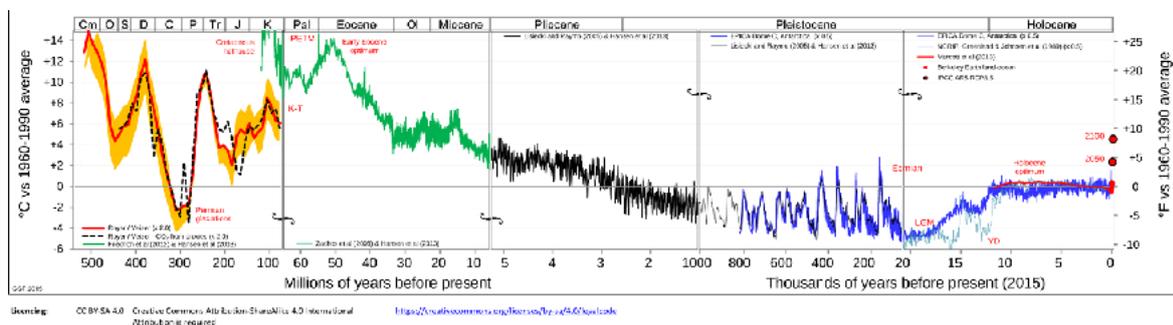


Abb. 1: Schätzungen der globalen mittleren Oberflächentemperaturen der letzten ~540 Mio. Jahre des Phanerozoikums, seit der ersten Entwicklung komplexerer Lebensformen auf unserem Planeten

<sup>2</sup> Diese Rekonstruktion basiert auf sogenannten Proxy-Daten, zum Beispiel auf der Temperaturabhängigkeit der Isotopenzusammensetzung von Kohlendioxid in den Kalkschalen von ozeanischen Kleinstlebewesen (Foraminiferen). Hier ist also nicht wie heute die Lufttemperatur an der Erdoberfläche dargestellt, sondern eine mit großen Unsicherheiten behaftete Modellvorstellung der Temperaturgeschichte der Erde, die sich mit zahlreichen anderen Klimaindizes der Entwicklung von Fauna und Flora, der Vereisung des Planeten und des Meeresspiegels, sowie weiteren Klimaindikatoren in Einklang befindet und als Synthese tausender wissenschaftlicher Arbeiten der Methodenentwicklung und deren Anwendung verstanden werden muss.

Natürliche Klimavariabilität im Zusammenhang der globalen anthropogenen Klimaveränderung bezieht sich auf die vergangenen Klimazyklen von Eis- und Warmzeiten. In diesen können wir neben Veränderungen der antreibenden Kräfte auch interne Rückkopplungen und Oszillationen oder gar seltene Extremereignisse wie große Vulkanausbrüche beobachten, die (bislang) keinen direkten Einfluss auf das Klima der letzten 100 Jahre genommen haben. Dies ist von besonderer Bedeutung, da zahlreiche Kompartimente der Erde auf Zeitskalen von Jahrhunderten bis zu Jahrtausenden Energie und Wärme speichern oder abgeben können (→Skalen), und so auch künftig unser Klima beeinflussen werden, auch wenn wir keinen anthropogenen Beitrag hätten. Aufgrund technischer und numerischer Innovationen als auch der Forschungsarbeit von Paläoklimaforscherinnen und -forschern lernen wir täglich Neues über die Veränderungen des Erdklimas in der jüngeren Klimageschichte: über die Verschiebung von Klimazonen anhand von „Archiven“ wie Meeressedimenten, Baumringen, Tropfsteine, Seesedimenten, Eisbohrungen und vieles mehr (→Geowissenschaften). Unerwartete Entdeckungen sind gelungen wie die Beobachtung abrupter Klima-Instabilität in der letzten Eiszeit, deren Ursprung vermutlich in der Rückkopplung der Ozeandynamik mit der Dynamik und Instabilität globaler Eisschilde und der Meereisverteilung in der Nord- und Südhemisphäre zu suchen ist – sogenannte *Dansgaard-Oeschger-Ereignisse* (siehe z. B. Dansgaard et al. 1993; Li und Born 2019). Diese Prozesse sind (glücklicherweise) in warmen Klimaphasen viel weniger ausgeprägt, wie bewiesen werden konnte (siehe z. B. Duhau und de Jager 2016).

Mithilfe moderner Klimamodelle, die alle heute bekannten treibenden und wechselwirkenden Prozesse, selbst der Wolkenbildung, der kleinskaligen Ozeankreisströme und der biogeochemischen Prozesse an Land und in den Ozeanen abbilden, lassen sich daher Hypothesen aus (paläoklimatischen) Beobachtungen testen und prüfen, ob lokale Variabilität im Zusammenhang mit globalen Veränderungen steht. Es existieren bereits zahlreiche solcher Modelle (→Modellierung), die eine hohe Komplexität besitzen und regelmäßig auf ihre Aussagefähigkeit getestet werden.<sup>3</sup> Indes: Sicherlich sind wir noch weit davon entfernt, lokale Vorhersagen über die Klimageschichte irgendeiner Region weltweit mit hoher Sicherheit zu machen.

## **Anthropogener Klimawandel**

Sicher ist hingegen bereits, dass sich das globale Klima heute in einem Maß und einer Geschwindigkeit ändert, die mit natürlicher Klimavariabilität nicht erklärt werden kann (IPCC 2021). Nach Jahrzehnten der Klimaforschung ist zudem klar, dass die Ursachen in menschlichen Eingriffen in das Erdsystem liegen (siehe z. B. IPCC 2021; Pierrehumbert 2010; Oreskes 2004). Hier gibt es einen breiten Konsens innerhalb der Naturwissenschaft (siehe z. B. Cook et al. 2013). Wir wissen jedoch auch, dass Veränderungen des Klimas in der jungen Erdgeschichte teilweise weitaus dramatischer waren als die zu erwartende globale Erwärmung. So sind in

---

<sup>3</sup> Internationale Projekte zum „Klimamodellvergleich“ existieren für Klimavorhersagen-Modelle und Klimarekonstruktionen – *Climate Model Intercomparison Projekt* (CMIP) (<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>) und *Paleo-Climat Model Intercomparison Projekt* (PMIP) (<https://pmip.lsce.ipsl.fr/>).

Nordeuropa Eisschilde von mehr als drei Kilometer Mächtigkeit verschwunden und bieten uns heute neuen Lebensraum; gleichsam im Gegenzug ist der Meeresspiegel seit der letzten Eiszeit um 140 m gestiegen (Lambeck et al. 2014) und hat dadurch an vielen Stellen den menschlichen Lebensraum zerstört, aber auch neue Ökosysteme geschaffen.

Seit nunmehr 10.000 Jahren (dem Holozän) entwickeln sich Menschen und Ökosysteme unter – im Vergleich zum Millennium davor – überraschend stabilen Bedingungen. Diese Zeit relativer Stabilität geht nun offenbar zu Ende. Ursache ist überwiegend der massive Eingriff des Menschen durch Emission von Treibhausgasen und Landnutzungsänderung, wie etwa Abholzen von Wäldern. Die Emissionen von Treibhausgasen, vor allem von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (Distickstoffmonoxid, N<sub>2</sub>O), werden im Wesentlichen durch Gewinnung und Verbrennung fossiler Brennstoffe verursacht. Zum Ausstoß von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O tragen auch Landwirtschaft, Viehzucht und andere anthropogene Quellen bei (siehe z. B. Janssens-Maenhout et al. 2019).

Um eine lange Geschichte kurz zu machen: Die Erdoberfläche verkraftet solche natürlichen Veränderungen des Erdklimas und reagiert mit (erheblichen) Verschiebungen von Ökosystemen. Eine rasche globale Erwärmung von +2°C wird solche spürbaren Verschiebungen verursachen. Wir wissen aus der Vergangenheit, dass Veränderungen von +2°C global (dies entspricht in etwa dem Wechsel der letzten Eiszeit in die heutige Warmzeit),<sup>4</sup> besonders dramatisch in den polaren Regionen spürbar sind, während die warmen Tropen eher warme Tropen bleiben werden. Sollte diese Erwärmung aber zu einem beschleunigten Abschmelzen des Grönländischen Eises oder des Westantarktischen Eisschildes führen, wie es zuletzt vor mehr als 400.000 Jahren der Fall war, dann werden sich für Millionen Menschen die Küstenlinien und damit auch die Lebensbedingungen rapide und sehr dramatisch verändern. Die Regionalität der Veränderung zu begreifen, ist daher ein wichtiger Teil der Klimageschichte der Erde. Diese Prozesse haben bereits begonnen, wie Abbildung 2 eindrucksvoll mit einem Anstieg der gemittelten Erdoberflächentemperatur um +1°C seit 1910 zeigt. Die Ozeane werden durch die globale Erwärmung wärmer und durch die Zunahme des atmosphärischen Kohlendioxid Gehaltes auch saurer, d. h. durch den zunehmenden Eintrag von CO<sub>2</sub> in die Ozeane nimmt der pH-Wert ab. Diese Ozean-Versauerung hat bereits gravierende Folgen für das Leben im Ozean, vor allem Kalkstruktur bildende Organismen (Korallen, Muscheln etc.) werden schwer geschädigt. Zudem reduziert der erhöhte Säuregrad der Ozeane deren weitere CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch den sogenannten *Revelle-Effekt*.

Gemessen am natürlichen Treibhauseffekt ist der Effekt der anthropogenen Treibhausgase und weiterer anthropogener Eingriffe in das Erdsystem, wie etwa Waldrodung, zwar heute gering: nur knapp ein Grad Celsius seit 1910 gegenüber einem Gesamttreibhauseffekt von 33 Grad (siehe Abb. 2 und IPCC 2014). Wenn man aber in Betracht zieht, dass sich unsere Gesellschaft sehr genau an die jeweilige Klimazone angepasst hat, wird ersichtlich, warum und wie geringe Effekte erhebliche Auswirkungen auf menschliche Gesellschaften haben (IPCC 2014). Da sich die Polarregionen bereits um mehrere Grad erwärmt haben, sind die sommerlichen Meereisflä-

---

<sup>4</sup> Nach Schätzungen nahm die mittlere Temperatur der Weltozeane um 2,6°C zu, vgl. Bereiter et al. 2018.

chen auf etwa die Hälfte geschrumpft. Global schmelzen Gletscher ab, sodass sich die Vegetation und Ausbreitungsgebiete von Insekten schnell ändern. Zudem besteht die Gefahr, dass sich selbst verstärkende Prozesse auftreten, welche das Klima irreversibel ändern, d. h. diese Änderungen können bestehen bleiben, selbst wenn die Bedingungen (z. B. die Temperatur) wieder auf den Wert vor der Änderung zurückgehen. Diese sogenannte „Kippelemente“ finden sich in vielen Bereichen, etwa das Abschmelzen des Arktischen Meereises oder die Abschwächung der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation (siehe z. B. Schellnhuber 2015).

Ein wichtiger Aspekt, der häufig übersehen wird, ist dabei die Variabilität der Klimaparameter (also etwa der Temperatur oder der Niederschlagsintensität). Der Klimawandel zeigt sich nicht nur in der Änderung der Mittelwerte, also etwa der erwähnten Erhöhung der mittleren Erdtemperatur, sondern auch in Änderungen der Variabilität dieser Werte. Daher ist es wahrscheinlich, dass extreme Ereignisse, wie etwa Hitzewellen, Überflutungsereignisse oder Trockenperioden in einem geänderten Klima sehr viel häufiger werden. Zudem können sich auch diese Extremereignisse gegenseitig verstärken (Zscheischler et al. 2018). Klimaprognosen für die kommenden Jahrzehnte beruhen naturgemäß auf den zugrundeliegenden Annahmen über die zukünftigen Treibhausgasemissionen, den so genannten „Szenarien“. Sie reichen von ca. 0,8 Grad Erwärmung bei einem sofortigen Stopp aller anthropogenen Treibhausgasemissionen bis zu 5 Grad (oder mehr) bei einer Fortschreibung der Emissionssteigerungen der letzten Jahrzehnte (IPCC 2014). Dieser letzte Wert entspricht einer Veränderung um mehr als eine Klimazone und hätte sicherlich global gewaltige Auswirkungen. Bis zu einem gewissen Grad wäre Anpassung an diese Veränderungen möglich (siehe unten) und würde sicherlich auch vorgenommen werden. Die zu erwartenden Anpassungskosten können dabei schnell ein Mehrfaches des jährlichen Bruttosozialprodukts sogar „reicher“ Nationen erreichen (Sterner 2015; Stern und Taylor 2007).

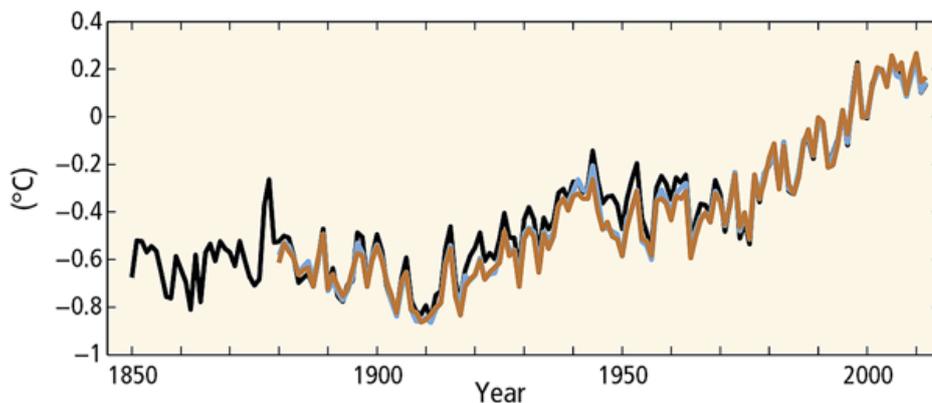


Abb. 2: Jährlich und global gemittelte kombinierte Land- und Meeresoberflächentemperatur-Anomalien, bezogen auf das Mittel des Zeitraums 1986 bis 2005. Die Farben geben unterschiedliche Datensätze an. Schwarz: HadCRUT4 Datensatz des Englischen Meteorologischen Institutes und der Universität von East Anglia (Version 4.1.1.0). Blau: NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) and GISS (Goddard Institute for Space Studies, USA) Datensatz GISTEMP v4. Orange: Ein Datensatz auf  $5 \times 5^\circ$  gemittelt vom Nationalen Klima Daten Zentrum der NOAA (National Ocean and Atmosphere Administration) MLOST (Version 3.5.2). Weitere Datensätze wurden mit verschiedenen Statistischen Methoden von der Universität Berkeley (Earth-Group) und der Universität Delaware erstellt, die alle vergleichbare Trends und Anomalien ergeben. In den Details der räumlichen Mittelung, der Glättung zwischen Messpunkten oder zwischen Ozean und Kontinent sind diese Datensätze verschieden

## Maßnahmen gegen den Klimawandel

Grundsätzlich lassen sich drei Gruppen von Maßnahmen für den Umgang mit dem bereits eingetretenen beziehungsweise zukünftigen Klimawandel unterscheiden (siehe Abb. 3). Idealerweise könnte das Problem mit einer der Maßnahmengruppen gelöst werden, zum Beispiel der Mitigation. Es ist aber sehr wahrscheinlich, u. a. aufgrund der Größe des Problems, dass tatsächlich eine Kombination der aufgelisteten Maßnahmen ergriffen werden muss, um kurz-, mittel- und langfristige negative Effekte einzudämmen.

*Abwendung des Wandels (Mitigation)*, d. h. rasche Eindämmung der Ursachen des anthropogenen Klimawandels. Die Mitigation umfasst die Rückführung der Treibhausgasemissionen und die Beschränkung von klimawirksamen Landnutzungsänderungen (z. B. Waldrodung). Die dazu erforderlichen Maßnahmen, also etwa den Ausbau von erneuerbarer Energie oder der Kernenergie, werden bereits seit Jahrzehnten diskutiert und zu einem kleineren Teil auch umgesetzt. Allerdings verläuft die Einführung bislang schleppend und wird begleitet von einem Chor skeptischer Stimmen, die aus Unwissenheit oder auch wider besseres Wissen (siehe Robinson und Robbins 1968) – aufgrund gegenläufiger (kurzfristiger) wirtschaftlicher Interessen, beispielsweise in „fossilen“ Industrien, motiviert sind und weitergehende Mitigationsmaßnahmen ablehnen.

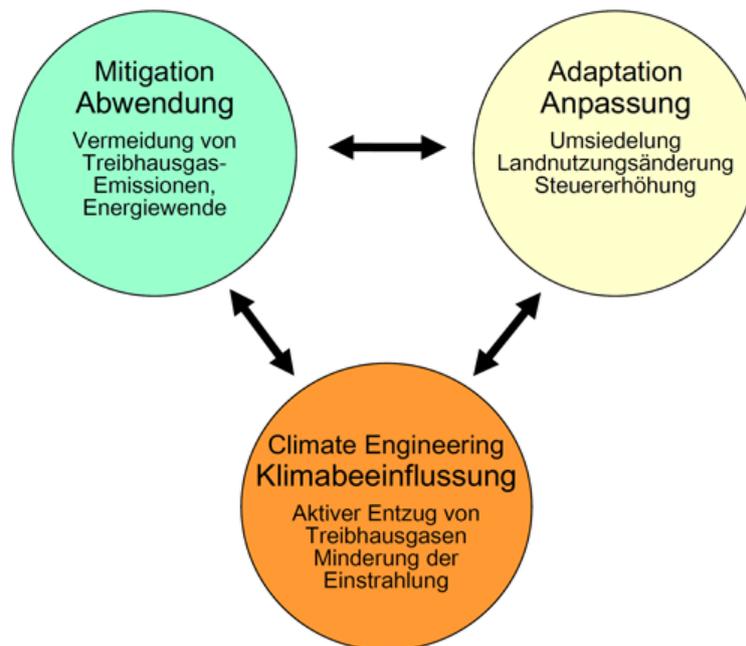


Abb. 3: Das „Umgang mit dem Klimawandel“ Dreieck. Idealerweise könnte das Problem mit jeweils einer der aufgelisteten Maßnahmengruppen gelöst werden, es ist aber sehr wahrscheinlich, dass tatsächlich eine Kombination der Maßnahmen ergriffen werden wird (bzw. werden muss)

Mittlerweile hat sich daher eine gewisse Skepsis in der Naturwissenschaft ausgebreitet, ob die – an sich erfolgversprechende – Abwendungsstrategie wirklich rasch genug durchgeführt werden kann. Ein großes Problem ist dabei, dass verschiedene Nationen beziehungsweise Bevölkerungsgruppen den Klimawandel verursachen (z. B. die Industriestaaten) und davon nach wie vor profi-

tieren, während primär andere Gruppen und Staaten von dessen Folgen betroffen sind (z. B. viele Entwicklungsländer; vgl. unten).

*Anpassung an den Klimawandel* (Adaption, im Extremfall ohne Maßnahmen zur Abwendung). Die Adaption umfasst eine Vielfalt von Maßnahmen, um mit den eingetretenen Effekten von Klimawandel zurechtzukommen. Diese betreffen die Umstellung der Landwirtschaft auf eine dem geänderten Klima angepasste Wirtschaftsweise, die Anpassung der Infrastruktur an Extremereignisse, den Deichbau zur Begrenzung von Überflutung, Maßnahmen zur Wasserversorgung, Anpassungen von Rechts- und Gesundheitssystemen und vieles mehr. Es ist wahrscheinlich und auch bereits erkennbar, dass Anpassungsmaßnahmen in jedem Fall durchgeführt werden, da jene, die durch Auswirkungen des Klimawandels bedroht sind, unabhängig davon, ob sie zur Verursachung beigetragen haben, an der Reduzierung der negativen Folgen interessiert sind.

*Climate Engineering*. Üblicherweise umfasst der Begriff „großskalige Maßnahmen, die auf absichtliche Änderung des Klimas zur Abwendung von negativen Auswirkungen des Klimawandels abzielen“.<sup>5</sup> Konkret werden damit zwei sehr unterschiedliche Gruppen von Maßnahmen bezeichnet: Einerseits die Entfernung von Treibhausgasen aus der Atmosphäre – im Wesentlichen CO<sub>2</sub>, daher auch oft synonym als *Carbon Dioxide Removal (CDR)* bezeichnet –, andererseits die Abschwächung der Sonneneinstrahlung, um die Erde zu kühlen – das sogenannte *Solar Radiation Management (SRM)* (vgl. Abschnitt 2.7 unten).

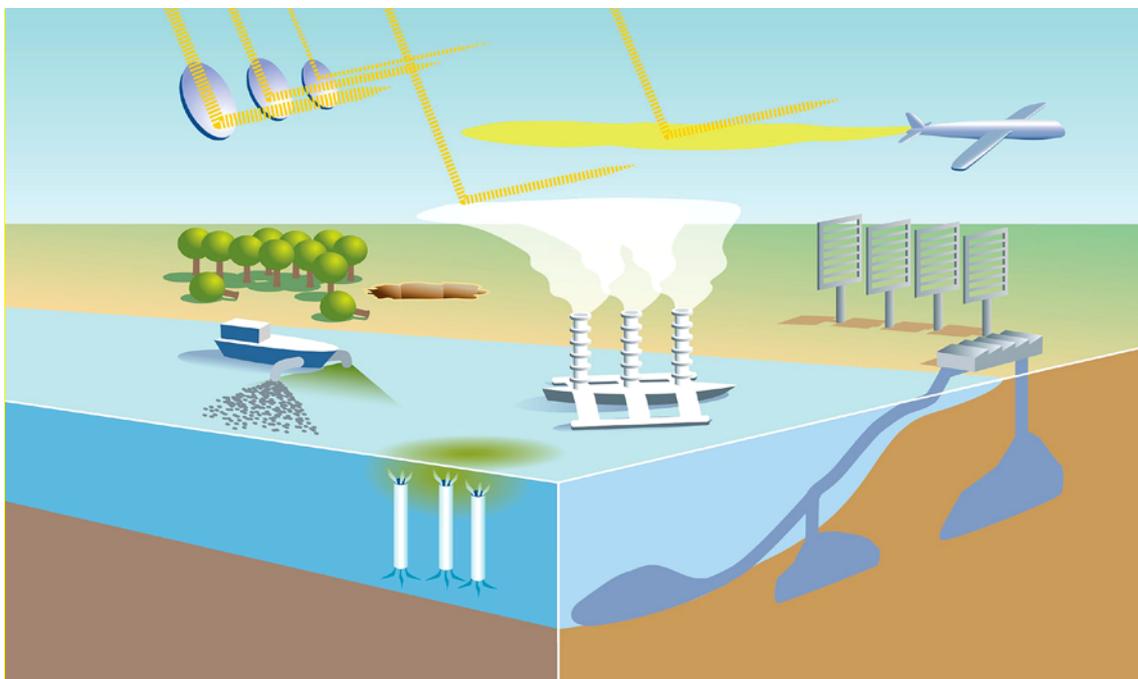


Abb. 4: Symbolische Darstellung verschiedener Maßnahmen, zur absichtlichen Beeinflussung des Klimas (*Climate Engineering*). Vorgeschlagene und diskutierte SRM-Maßnahmen umfassen: Weltraumspiegel bzw. durch hochfliegende Flugzeuge in die Stratosphäre eingebrachtes Aerosol um die Sonneneinstrah-

<sup>5</sup> Der Begriff ist nicht unumstritten, suggeriert er doch, dass das Klima ingenieurmäßig vom Menschen kontrolliert werden könnte (siehe z. B. auch Platt und Leisner 2019; Rickels et al. 2011; The Royal Society 2009; Bericht des National Research Council 2015a).

lung zu reduzieren, oder Schiffe, die Aerosole in die Grenzschicht einbringen könnten, um die Bewölkung über dem Ozean weißer zu machen. Maßnahmen zur Kohlendioxidreduktion (CDR) sind ebenso vielfältig: Aufforstung, Ozeandüngung, „künstliche Bäume“, also Anlagen, die der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entziehen, oder Hochpumpen von kaltem Tiefenwasser im Ozean, das mehr CO<sub>2</sub> aufnehmen kann. Während alle drei vorgestellten Maßnahmenbündel Mitigation, Adaption und *Climate Engineering* sowohl (problematische) Wechselwirkungen als auch Vor- und Nachteile zeitigen, werden *Climate-Engineering*-Maßnahmen und hier besonders die Erforschung, Erprobung oder spätere Anwendung unterschiedlicher SRM-Techniken kontrovers in der Fachwissenschaft und Teilen der Öffentlichkeit diskutiert (vgl. Abschnitt 2.7 unten)

## **Implementierung potenzieller Maßnahmen**

Die Umsetzung unterschiedlicher Maßnahmenbündel muss also nicht nur deren regionale, temporale und funktional unterschiedliche Wirkweisen berücksichtigen und daher Zielkonflikte zwischen zahlreichen Akteuren innerhalb von Staaten (Energie- und Automobilindustrie, Verbraucher, Regulierungsbehörden etc.), sondern auch zwischen Staaten in den Zonen unterschiedlicher Betroffenheit. Dabei sind zahlreiche Wechselwirkungen im Mensch-Umweltverhältnis zu berücksichtigen, die eine interdisziplinäre Zusammenarbeit beispielsweise zwischen Umweltphysik, Rechts- und Politikwissenschaft und Ökonomie notwendig machen, wenn es um die Entwicklung neuer Haftungsregeln für Klimawandelfolgeschäden geht.

Regulierungspolitisch besonders vertrackt sind Klimawandel induzierte Probleme aber deshalb, weil sie sich zumeist über lange Wirkketten und mehrere Altersgenerationen erstrecken. Kurz: einer sehr schädlichen zukünftigen Entwicklung muss (präventiv) begegnet werden, bevor das volle Ausmaß und die Verteilung der Kosten erkennbar sind. Das führt geradezu zwangsläufig dazu, dass jene Industrien und gesellschaftlichen Akteure, die am stärksten vom Status-Quo profitieren, die Notwendigkeit von präventiven Veränderungen in Zweifel ziehen (Supran und Oreskes 2017; Banerjee, Song und Hasemyer 2015). Ob und wenn ja, welches Ausmaß an Gewissheit bei Umweltwissen ausreichend ist, um präventive Maßnahmen zu begründen, die zumindest potenziell erhebliche (wirtschaftliche) Nachteile nach sich ziehen könnten, ist daher zunehmend umstritten (Oreskes und Conway 2010). Es folgt, dass die Umweltwissenschaften, aber beispielsweise auch die öffentliche Gesundheitsvorsorge, nicht nur um gesichertes Wissen an sich, sondern auch um die Geltung dieses Wissens in der Gesellschaft ringen müssen (Schröder et al. 2002; siehe auch Abschnitt 2.6 unten). Das zunehmende Eintreten von prognostizierten Veränderungen – extreme Klimaereignisse, jährliche Hitzerekorde, Dürren, Überschwemmungen, Ökosystemverschiebungen, Abschmelzen von Gletschern und Eisschilden, Erwärmung und Versauerung der Ozeane – hat in der Gesellschaft bereits eine breite Wahrnehmung geschaffen, die sich in Deutschland auch in politischen Veränderungen manifestiert (siehe 1.5.2 zum Pariser Abkommen).

## **Bisherige Maßnahmen**

Warnungen vor der exzessiven Nutzung fossiler Energieträger, teils wegen deren erwarteter Erschöpfung und teils wegen der damit verbunden Treibhausgasmissionen gibt es seit dem Ende des 19. Jahrhunderts (Arrhenius 1896; Ostwald 1909). In Deutschland und in vielen anderen Na-

tionen der Welt wurden daher spätestens seit den 1980er-Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen, nachhaltige und treibhausgasemissionsfreie Energieträger zu nutzen. Die resultierende „Energiewende“ betrifft in Deutschland aber nicht alle Sektoren des Energiesystems gleichermaßen: Bisher wurden die größten Fortschritte im Hinblick auf die Reduktion der Treibhausgasmission im Elektrizitätssektor gemacht. Hier werden zum Beispiel in Deutschland mehr als 50 % der Energie „CO<sub>2</sub>-frei“ bereitgestellt (→Energie). Zudem beteiligte sich die Bundesrepublik im Rahmen der Europäischen Gemeinschaften und dann der Europäischen Union an der Aushandlung und Umsetzung internationaler Klimaschutzvereinbarungen, insbesondere der Klimarahmenkonvention (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC; *21st Conference of the Parties*, COP 21), die 2015 in die Pariser Klimaschutzübereinkunft mündeten, die erstmals nationale Selbstverpflichtungen für alle 195 Mitgliedstaaten beinhaltet und völkerrechtlich verbindliche Prozedere zu deren Umsetzung vorsieht (vgl. Abschnitt 2.2).

### **Notwendige zukünftige Maßnahmen**

Die Verpflichtungen der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris (COP 21) verlangen die Rückführung der Treibhausgasemissionen auf „netto Null“, das heißt die Aktivitäten der Menschheit müssen so verändert werden, dass entweder keine Treibhausgasmissionen mehr auftreten oder die dann noch verbleibenden Emissionen bis etwa Mitte dieses Jahrhunderts durch Maßnahmen kompensiert werden, die der Atmosphäre die Treibhausgase wieder entziehen. Solche Maßnahmen sind etwa die direkte Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) oder Aufforstung.

Technische Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen sind unter dem Schlagwort „Energiewende“ bekannt geworden. Bisher sind wesentliche Fortschritte bei der Einführung der „Erneuerbaren Energie“ in der Elektrizitätsbereitstellung erzielt worden (die in Industriestaaten etwa ein Viertel des Primärenergiebedarfs verschlingt), also etwa der Einführung der Solar- und Windenergie wie im Kapitel →Energie eingehend diskutiert wird. Die Herausforderung ist nun, die Treibhausgasemissionen der übrigen Sektoren (hauptsächlich Verkehr, Industrie, Raumheizung) entsprechend zu vermindern (→Energie).

Wie die gesellschaftliche Diskussion zeigt, sind jenseits der rein naturwissenschaftlich-technischen Machbarkeit die politischen – und auch ökonomischen – Voraussetzungen von größter Bedeutung. Dies überrascht nicht, angesichts der gewaltigen Umstellung fast aller Lebensbereiche, die die zukünftige Rückführung der Treibhausgasmission auf „netto Null“ verlangt. Besonders betroffen sind die Bereiche Energieversorgung, damit auch Verkehr, Wohnen (→Verstädterung), →Ernährung, Handel, Dienstleistungen und Industrie (→Wachstum und Wohlstand, →Produktion und Konsum).

## Sozialwissenschaftliche Perspektiven

### Politikwissenschaftliche Betrachtung des Klimawandelproblems

Der anthropogen-induzierte Klimawandel ist das drängendste und zugleich schwierigste globale Umweltproblem unserer Zeit. Seit Ende des 19. Jahrhunderts ist in den Naturwissenschaften die Erkenntnis gereift, dass die vermehrte Emission von CO<sub>2</sub> und anderen sogenannten Treibhausgasen maßgeblich zur Erwärmung der durchschnittlichen atmosphärischen Mitteltemperatur beiträgt (vgl. Einleitung bzw. Abschnitt Naturwissenschaftliche Perspektive). In der →Politikwissenschaft ist dieser Wandel, seine Beschleunigung und politische Bedeutsamkeit im 20. Jahrhundert, gleichwohl erst seit Mitte der 1980er-Jahre systematisch thematisiert worden. Seither hat sich rasch eine global-vernetzte und interdisziplinär-agierende internationale politikwissenschaftliche Klimaforschung gebildet (Dauvergne 2012; Harris 2014; Luterbacher und Sprinz 2018), die bislang zwei größere Fragenkomplexe untersucht hat: Welche politischen Ziele, Strategien und Instrumente werden von unterschiedlichen Akteuren genutzt, um den anthropogenen Klimawandel zu begrenzen, zu stoppen oder gar rückgängig zu machen und wie lassen sich diese Reaktionsmuster theoretisch erklären? Welche ethischen und normativen Ziele (und damit verbundenen Strategien) sollten Gesellschaften verfolgen, um bestimmte Formen des Wandels zu verhindern beziehungsweise zu gestalten (Cass 2017)? Im Folgenden werden wir exemplarisch anhand einiger zentraler Strategien und Instrumente (→Governance) die Rolle der internationalen, nationalen und subnationalen politischen Ebene für die weitgehende Abwendung (Mitigation, siehe Abschnitt 1.4.1 und Abb. 3) des Klimawandels beleuchten. Dabei wird neben klassischen Steuerungsinstrumenten, wie öffentlicher Planung und materiell-rechtlichen Geboten vor allem ein Augenmerk auf neuere Steuerungsinstrumente (marktgestützte Anreizinstrumente, Quasimärkte, Evaluations- und Benchmarkingmechanismen, öffentlich-private Governancenetze) gelegt (vgl. Wurster 2013). Die aktuellen politischen Auseinandersetzungen im Zuge des Aufkommens neuer populistischer Bewegungen und Parteien betten die Diskussion um einzelne Steuerungsinstrumente in eine breitere Debatte ein. Im Anschluss wird schließlich die kontrovers diskutierte Frage des *Climate Engineerings* (vgl. Abschnitt Naturwissenschaftliche Perspektive) aus sozialwissenschaftlicher Perspektive näher beleuchtet. Zunächst wenden wir uns den internationalen Anstrengungen zur Verminderung des Klimawandels zu und blicken auf globale und transnationale Klimaregime.

### Die Entwicklung des Globalen Klimaregimes

Konzeptionell werden inter- und transnationale politische Reaktionen auf den globalen Klimawandel in der politikwissenschaftlichen Forschung zumeist über die Begriffe der *Global Governance* und der „internationalen Regime“ erschlossen: *Global Governance* bezeichnet dabei ein System von Regeln auf allen Ebenen (lokal, regional, national, global), das darauf gerichtet ist, ohne formale hierarchische Steuerung durch Regierungen, mittels nicht-hierarchischer Koordination und Kontrolle zwischen staatlichen und nicht-staatlichen Akteuren verbindliche Überein-

künfte zu treffen (Rosenau 1995). Internationale Regime sind politikfeldspezifische Institutionen, die durch Prinzipien, Normen, Regeln und Verhaltensweisen das Verhalten von staatlichen und nicht-staatlichen Akteuren prägen, ohne dass sie selbst Akteursqualität besitzen (Breitmeier, Young und Zürn 2006). Zentral für die ethische und normative Debatte sind der Begriff der Klimaethik (Arnold 2014) und der Klimagerechtigkeit, der Verantwortung für zurückliegendes klimarelevantes Handeln und daraus resultierende Rechte und Pflichten für die Zukunft von Individuen und Gruppen (Gardiner 2011) (→Politische Ökologie).

Empirisch-analytisch wird die Genese und der Wandel des globalen Klimaregimes auf das Zusammenwirken langfristiger Umweltbelastungen und krisenhafter Einzelformen in den 1980er-Jahren (bspw. sog. Waldsterben und Ozonloch) und deren verbesserte naturwissenschaftliche Erkennung und Thematisierung sowie die daraus resultierende gesellschaftliche Sensibilisierung und Politisierung zurückgeführt. Mithilfe des idealtypischen Modells eines umweltpolitischen Politikzyklus, der von der Agendasetzung, über die Politikformulierung und Implementation bis zur Evaluation reicht, kann die Phase der internationalen Thematisierung des Klimawandels durch die *World Meteorological Organization* (WMO), die *World Commission on Environment and Development* (WCED) (Brundtland Report 1987) sowie durch den 1988 etablierten *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) Ende der 1980er-Jahre datiert werden (Bolin 2007). Mandatiert durch die UN-Generalversammlung, verhandelt das *Intergovernmental Negotiating Committee for a Framework Convention on Climate Change* (INC) seit Dezember 1990 ein Rahmenabkommen, das als *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) auf dem UN-Gipfel von Rio de Janeiro im Jahr 1992 seither den Kern des Weltklimaregimes bildet.

Primäres Ziel der UN-Klimarahmenkonvention ist es, die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre auf einem Niveau zu stabilisieren, das eine gefährliche anthropogene Einwirkung auf das Klimasystem verhindert. Zentral für die Ausgestaltung der Rechte und Pflichten der Mitglieder (2018: 196 Staaten und die Europäische Union) ist Artikel 3.1 der Rahmenkonvention, der das Prinzip der geteilten, aber differenzierten Verantwortung und respektiven Fähigkeiten festschreibt. Da die industrialisierten Länder historisch sehr viel mehr Treibhausgase emittiert haben, werden sie verpflichtet, größere Treibhausgasreduktionen vorzunehmen und zusätzlich sich entwickelnde Gesellschaften technologisch und finanziell darin zu unterstützen, die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration zu erwirken (Bodansky 1993). Die Rahmenkonvention selbst enthält keine konkreten Treibhausgas-Reduktionsziele für bestimmte Staaten, keine Mechanismen, wie die Reduktion stattfinden soll, und keine Kontroll- und Sanktionsmechanismen. Stattdessen enthält sie zwei Regelungen, die Umsetzung und Weiterentwicklung der Konvention maßgeblich sicherstellen: Zum einen, in Annex I der Konvention, werden all jene Industrieländer genannt (darunter auch die EU-Staaten), die weiterreichende, wenn auch nicht verbindliche, Verpflichtungen haben. Nicht-Annex-I-Staaten, darunter die aufstrebenden Schwellenländer China, Indien und Brasilien wurden von Reduktionen freigestellt. Annex-II Staaten werden dazu verpflichtet, zusätzliche Unterstützung für Entwicklungsländer bereitzustellen. Zum anderen sorgt das zentrale, jährlich tagende Beschlussfassungsgremium der Konvention, die Konferenz

der Teilnehmer (*Conference of the Parties*, COP), durch seine Beschlüsse dafür, dass verbindliche Regeln (COP 1, Berlin 1995), sowie konkrete und verpflichtende Reduktionsziele beispielsweise im sogenannten Kyoto-Protokoll (COP 3, Kyoto 1997) festgehalten werden oder im sogenannten *Bali Action Plan* (COP 13) neue Ziele für das Kyoto-Protokoll sowie in der Durban-Plattform (COP 17) für den Post-Kyoto-Zeitraum ab 2020 etabliert werden. In seiner Top-Down-Struktur zielte das Klimaregime in dieser frühen Phase auf verbindliche Reduktionsziele für die Industriestaaten und deren verstärkte Unterstützung für Entwicklungsländer, die sich in den konkreten Reduktionsmargen (-8 bis + 10 % gegenüber dem Referenzjahr 1990) und Mechanismen, wie einem internationalen Emissionshandelsregime (*International Emission Trading*, IET; siehe zum europäischen Emissionshandelssystem weiter unten), dem *Clean Development Mechanism* (CDM) und der *Joint Implementation* (JI), welche es den Vertragsstaaten erlaubte, durch die Bepreisung von Kohlenstoffprodukten Emissionsrechte zu bewerten und zu tauschen, um so wirtschaftliche Entwicklung und Emissionsreduktion zu ermöglichen (Pattberg und Widerberg 2018).

Mit dem Abkommen von Paris (PA) (UN 2016) verändert sich die politische Struktur des Weltklimaregimes maßgeblich: Zum einen basiert die Umsetzung der geteilten, aber differenzierten Verantwortung der Rahmenkonvention nun auf nationalen Klimaschutzplänen und Reduktionsbeiträgen, die die Begrenzung der mittleren Erderwärmung auf 2 Grad sicherstellen und auf 1,5 Grad gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter ermöglichen sollen (vgl. Ekardt und Wieding 2016). Es werden sodann Regeln für die Erstellung der *Nationally Determined Contributions* (NDC) aufgestellt, deren Konkretisierung und Umsetzung auf der COP 24 in Katowice weiter vorangetrieben wurde. Zum anderen wurde ein „Verschärfungsmechanismus“ (*ratcheting mechanism*) eingeführt, der in Zyklen von fünf Jahren überprüft, ob die jeweiligen NDC dazu geeignet sind, die beiden verpflichtenden Ziele des PA, das frühestmögliche Erreichen des Treibhausgasemissionsmaximums sowie der Treibhausgasneutralität – Treibhausgase dürfen nur in dem Maß ausgestoßen werden, wie sie der Atmosphäre durch sogenanntes Senken, beispielsweise Wälder, wieder entzogen werden – bis 2050 zu erreichen. Bei den regelmäßigen globalen Überprüfungskonferenzen (*Stocktaking*) müssen die Staaten jeweils ambitioniertere Ziele vorlegen, während weiterhin gilt, dass Staaten mit höheren Emissionen und größeren Ressourcen sich entwickelnde Gesellschaften dabei unterstützen, ihre nationalen Aktionspläne umzusetzen (Rajamani 2016).

Neben die jährliche COP der UNFCCC tritt mit der Pariser Vereinbarung auch ein jährliches Treffen der Unterzeichnerstaaten der PA (CMA), das gemeinsam mithilfe einer Vielzahl an technischen, wissenschaftlichen und administrativen Gruppen und Organen die Umsetzung der Ziele des Weltklimaregimes fördern soll. Neben die Emissionsreduktion treten in der Pariser Vereinbarung verstärkt Maßnahmen zur Adaptation, zur Anpassung an Klimawandel induzierte Veränderungen, beispielsweise den Anstieg des Meeresspiegels, und erstmalig auch Vorkehrungen für „Schäden und Verluste“ (*Loss and Damages*), d. h. Zerstörungen, die durch Anpassungsmaßnahmen nicht verhindert werden konnten.

Vergleicht man die Vereinbarungen von Kyoto mit jenen von Paris, so hat im Weltklimaregime seit 2015 ein „Regimewechsel“ stattgefunden (Harnisch und Tosun 2016; Wirth 2017). Das Regime umfasst und verpflichtet jetzt deutlich mehr Akteure (insbesondere die rasch größer werdenden Treibhausgasemittenten China und Indien) in einem größeren funktionalen Umfang, während es die Anpassung an und den Schadensausgleich von Klimaschäden stärker betont als das Vorsorgeprinzip. Hinzu kommt, dass seine flexiblere Bottom-up-Struktur die Einbindung skeptischer Parlamente und gesellschaftlicher Gruppen sowie Unternehmen einfacher gestalten dürfte (Keohane und Oppenheimer 2016), auch wenn dadurch der Verpflichtungscharakter und das Ambitionsniveau der nationalen Klimaaktionspläne geschwächt werden könnte (Cléménçon 2016). Legt man die bisherigen Erfahrungen mit der Implementation von Klimaschutzpolitiken zugrunde, so bleiben diese Politiken zumeist hinter den erwarteten Wirkungen zurück. Und dies nicht nur, weil die einheitliche Messung und Bewertung von Reduktions- und Anpassungsmaßnahmen technisch und politisch anspruchsvoll ist und weil deren politikfeldübergreifende Wirkung, beispielsweise des Emissionshandels für die Verteilungsgerechtigkeit zwischen den Vertragsparteien und in deren Gesellschaften von vielen weiteren Faktoren abhängig ist (Pattberg und Widerberg 2018).

Unter dem Stichwort des „Regimekomplexes“ (Keohane und Victor 2011), der Fragmentierung (van Asselt und Zelli 2014) und der „polyzentrischen Governence-Strukturen“ (van Asselt und Zelli 2018) im Weltklimaregime wird zudem darauf hingewiesen, dass sich eine Vielzahl weiterer zwischenstaatlicher Institutionen und Organe, wie die G-7- und die G-20-Gruppe, die Weltbank, die Internationale Seeschiffahrt Organisation (IMO), sowie etliche transnationale und private Initiativen, wie das C40-Netzwerk (90 der weltweit größten Städte), die *Under2 Coalition* (Gruppe von ca. 220 subnationalen Einheiten) und weitere Multi-Stakeholder-Initiativen, wie das *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* (REN21) gebildet haben, die teilweise mit divergierenden, aber auch mit konvergierenden Interessen direkt oder indirekt auf die formalen zwischenstaatlichen Verhandlungen, insbesondere die nationalen Umsetzungsmaßnahmen einwirken (Chan et al. 2015).

## **Emissionshandel auf europäischer Ebene**

Richtet man den Blick auf die Klimapolitik der Europäischen Union (EU), so zeigt sich ein komplexes Mehrebenensystem als Patchwork, zusammengesetzt aus diversen Entwürfen und Mustern (Schomaker 2017). Dabei haben sich die EU und im Zuge dessen auch deren Mitgliedsstaaten ambitionierte Klimaschutzziele gegeben. Die Ziele bis zum Jahr 2020 beinhalteten, dass im Vergleich zum Basisjahr 1990 bis 2020 zwanzig Prozent weniger Treibhausgasemissionen, zwanzig Prozent Energieeffizienzverbesserungen und zwanzig Prozent Anteil an erneuerbaren Energien im Energiemix (20-20-20) in der EU erreicht werden sollten. Für das Jahr 2030 sahen die Zielvorgaben deutlich ambitioniertere 40 Prozent weniger Treibhausgasemissionen als im Jahr 1990, mindestens 27 Prozent Energieeinsparungen und 27 Prozent Erneuerbare-Energie-

Anteil im Endenergieverbrauch vor (Rayner und Jordan 2016; Radtke et al. 2018).<sup>6</sup> Im Rahmen des sogenannten *European Green Deal* wurde am 11. Dezember 2019 ein noch ambitionierteres Konzept vorgestellt, mit dem Ziel, Europa als ersten Kontinent bis zum Jahr 2050 klimaneutral (null Netto-Emissionen von Treibhausgasen) zu machen (Europäische Kommission 2020).<sup>7</sup> Im Rahmen des neuen Europäischen Klimaschutzgesetzes aus dem Jahr 2021 wurden dieses Ziel nicht nur rechtlich verbindlich, sondern es wurde auch das Zwischenziel verschärft, indem nun bis zum Jahr 2030 eine Treibhausgasreduktion um 55 Prozent angestrebt wird (Verordnung 2021/1119 vom 30.06.2021 zur Schaffung eines Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität, ABl. 2021 Nr. L 243/1).

Um die von den EU-Mitgliedsstaaten schon im Rahmen des Kyoto-Protokolls 1997 eingegangenen Emissionsminderungsziele zu erreichen, hat die EU schon 2005 das europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) als zentrales Klimaschutzinstrument eingeführt. Es handelt sich hierbei um ein wettbewerbsorientiertes Steuerungsinstrument auf Basis eines von öffentlicher Hand künstlich geschaffenen Quasi-Marktes für Emissionszertifikate (*Cap and Trade*). Es basiert darauf, dass den Verursachern von Treibhausgasen für eine bestimmte Allokationsperiode Emissionsrechte zugeteilt werden, die insgesamt eine festgesetzte Gesamthöchstgrenze nicht übersteigen dürfen. So sollen die Treibhausgasemissionen der teilnehmenden Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie (seit 2012 nimmt auch der innereuropäische Luftverkehr teil) in kontrolliertem Umfang (klar definierte Obergrenze, *Cap*) reduziert werden. Ein Emissionszertifikat erlaubt den einbezogenen Unternehmen den Ausstoß einer festgelegten Menge an Treibhausgasen, wobei überschüssige Luftverschmutzungsrechte von diesen an einer Börse frei gehandelt werden können (*trade*, vgl. Dose 2008, 297). Unter idealen Bedingungen sorgt dieses auf regulativen Vorgaben fußende, marktgestützte Anreizinstrument dafür, dass auf eine besonders effiziente Art und Weise Emissionen dort vermindert werden, wo dies ökonomisch am günstigsten ist. Die schrittweise Reduktion der Zertifikatgesamtmenge erlaubt es zudem, die gewünschte Emissionsminderung zielgenau umzusetzen. Diese Vorteile sicherten dem Instrument sowohl die Unterstützung von Wirtschaftsseite und ließen es auch aus der Sicht regulativer Planung vorteilhaft erscheinen. Allerdings ist sein erfolgreicher Einsatz sehr voraussetzungsreich. Ob dieses Instrument in vergleichbarem Maße klimaschutzpolitisch effektiv sein kann wie andere Alternativen zur Emissionsminderung (harte regulative Vorgaben wie etwa Einschränkung der Produktion oder des Konsums klimaschädlicher Produkte, Flugverbote etc.; Emissionsabgaben oder Förderprogramme beispielsweise für den Ausbau erneuerbarer Energien), hängt in entscheidendem Maße davon ab, ob es der öffentlichen Seite, in diesem Falle der EU, gelingt, tatsächlich ehrgei-

---

<sup>6</sup> Während es für die 2020-Ziele noch möglich war, den Beitrag, den jedes einzelne EU-Mitgliedsland zur Erreichung der Gesamtziele zu erbringen hat, genau festzulegen, ist dies für die 2030-Ziele aufgrund von Konflikten zwischen den Mitgliedstaaten nicht mehr möglich. Dies kann als Hinweis darauf gelten, dass Länder, die sich in die Entscheidungsfindungsprozesse nicht hinreichend eingebunden fühlen und die die damit einhergehenden Kosten für sich für nicht akzeptabel halten, in Zukunft ehrgeizigen Klimaschutz-, Energieeffizienz- und Ausbauzielen für Erneuerbare-Energien eher verschließen könnten (Tews 2017).

<sup>7</sup> Im Zuge einer *Green Recovery* werden darüber hinaus Investitionen auf EU-Ebene geplant, um sowohl die wirtschaftlichen Folgen der Corona-Pandemie 2020 abzufedern, als auch einen Strukturwandel hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft in Europa voranzutreiben (Hepburn et al. 2020).

zige Minderungsvorgaben zu erlassen. Zweifel waren beim EU-ETS durchaus angebracht. So gelang es mächtigen verschmutzungsintensiven Industriezweigen in Europa, insbesondere in der ersten (2005–2007) und zweiten Phase (2008–2012) des EU-ETS, die Vorgaben stark zu ihren Gunsten zu verwässern. Ergebnis war, dass für diesen Zeitraum eine große Anzahl an Emissionsberechtigungen kostenlos verteilt wurden, so dass auch als Folge der wirtschaftlichen Rezession in der Weltwirtschaftskrise zu viele Zertifikate im System waren, weshalb die Preise dramatisch sanken (zum Teil weit unter 30 Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>-Emissionen, was nach Expertenmeinungen die Schwelle für die Entfaltung einer signifikanten Wirkung ist, Agentur für Erneuerbare Energien 2018). Auch wenn in den späteren Zuteilungsphasen die Anzahl der Emissionsberechtigungen deutlich reduziert werden konnte, bleibt hier eine gegenüber politischer und wirtschaftlicher Einflussnahme besonders zugängliche potenzielle Schwachstelle des Emissionshandelsystems bestehen. Des Weiteren kristallisierte sich als Herausforderung die Frage heraus, ob die Verwaltung die Regelbefolgung bei den Unternehmen (Abgabe korrekter Emissionszahlen) auch wirklich umfänglich kontrollieren kann (vgl. Dose 2008, 300–301). Die Ausweitung des Systems auf weitere Verursacherbereiche (Flugverkehr) und die Einführung komplexer Übertragungsmodelle (Joint-Implementation-Projekte und *Clean Development Mechanism*) hat dabei zu zusätzlichen Kontrollproblemen geführt. Hinzu tritt das Problem, dass das Emissionshandelssystem nicht ohne Weiteres mit anderen Klimaschutzinstrumenten wie Umweltabgaben oder speziellen Subventionsprogrammen (beispielsweise für Erneuerbare Energien) kompatibel ist (vgl. Wurster 2013). Damit das System nicht auf Grund einer als ungerecht empfundenen Lastenverteilung an öffentlicher Akzeptanz verliert, muss es den Spagat meistern, ausreichend viele Emissionsverursacher tatsächlich mitzuerfassen, ohne dabei an Effizienz und Konsistenz in seinem Regelungsumfeld zu verlieren.

### **Benchmarking auf nationalstaatlicher Ebene**

Betrachtet man die klimapolitischen Anstrengungen auf nationalstaatlicher Ebene und fokussiert hierbei auf Deutschland, so lassen sich ebenfalls ambitionierte Zielvorgaben feststellen. Dabei kann Deutschland auf eine mittlerweile recht lange Geschichte zentralstaatlich formulierter Klimaschutzziele zurückblicken. Sie gaben als Selbstverpflichtung von staatlicher Seite eingegangen immer wieder auch den Anstoß, im Angesicht eines drohenden Verfehlens weitergehende klimapolitische Instrumente ins Auge zu fassen. Dabei erwies es sich als hilfreich, dass relativ klar definierte klimapolitische Ziele von Anfang an auch in die im Zuge des Weltgipfels für nachhaltige Entwicklung in Johannesburg 2002 aufgelegte nationale Nachhaltigkeitsstrategie „Perspektiven für Deutschland“ eingestellt werden konnten. Mithilfe dieses ressortübergreifenden Planungsinstruments versucht die Bundesregierung seither eine Gesamtstrategie für nachhaltige Entwicklung in Deutschland voranzutreiben (u. a. Bundesregierung 2012). Dieses nationale Steuerungsinstrument wurde in der Zwischenzeit auch mit den von den Vereinten Nationen verabschiedeten *Sustainable Development Goals* (SDG) synchronisiert. Im Hinblick auf Klimaschutz, Ressourcenschonung und den Ausbau erneuerbarer Energien werden darin abgrenzbare Bereiche benannt, in denen Verbesserungen in Richtung eines jeweils klar definierten Zielzu-

stands erreicht werden sollen. Der Erfolg wird dabei durch die Betrachtung von Einzelindikatoren und deren Veränderungsdynamik gemessen. Es wird darauf geschaut, ob Deutschland sich dem jeweils anvisierten Ziel tatsächlich annähert. Von zentraler Bedeutung ist, dass in regelmäßigen Abständen die Entwicklung in einem Fortschrittsbericht (*Monitoring*) evaluiert wird (vgl. Grunwald und Kopfmüller 2012, 169) und dann auch Vorschläge zur Ergebnisverbesserung unterbreitet werden (Wurster 2013). Nur wenn die Ergebnisse kontinuierlich in die Arbeit staatlicher Organe einfließen und Schwachstellen sichtbar gemacht werden, kann genug Handlungsdruck aufgebaut werden (*Blaming*-Effekt). Obgleich die Koordination der Strategie auf höchster Ebene beim Bundeskanzleramt angesiedelt wurde, führen der Verzicht auf echte Sanktionsmöglichkeiten bei Zielverfehlung und die sektorale deutsche Regulierungstradition (dominierendes Ressortprinzip, föderale Kompetenzzersplitterung) häufig dazu, dass ein unabgestimmtes Nebeneinander von zahlreichen Einzelmaßnahmen mit divergierenden Zielstellungen eine kohärente Umsetzung eher behindern.

Betrachtet man die Entwicklung der klimapolitisch relevanten Bereiche und Indikatoren genauer, so zeigt sich entsprechend ein zweigespaltenes Bild. Auf der einen Seite ist es Deutschland als einem entwickelten Industrieland auf hohem ingenieurtechnischem Leistungsniveau auch aus international vergleichender Perspektive relativ gut gelungen, den Ausbau erneuerbarer Energien voranzutreiben. Schon früh konnten mit dem „100- und 250-Megawatt-Windprogramm“, dem Einspeisegesetz, dem „100.000-Dächer-Photovoltaikprogramm“ und insbesondere dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ein günstiger institutioneller Rahmen für diesen Ausbau geschaffen werden (→Energie). Insbesondere das EEG hat (bis zur Umstellung 2016/2017 vom Modell der Einspeisevergütungen hin zu Ausschreibungsverfahren) durch die Gewährung eines langfristorientierten Einspeisetarifs sehr günstige Bedingungen für die Förderung erneuerbarer Energien eröffnet. Die so erzeugte hohe Planungs- und Investitionssicherheit löste einen Boom der erneuerbaren Energien im deutschen Strommix aus, und die Regelung wurde zum Vorbild für viele andere Länder (vgl. Wurster und Hagemann 2020).

Während Deutschland ein Einstieg in erneuerbare Energien gelungen ist, tut sich das Land beim Ausstieg aus fossilen Energieträgern weiterhin deutlich schwerer. Eine drastische Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen würde dabei neben einem forcierten Ausstieg aus der Kohleverstromung, wie mit dem Kohleausstiegsgesetz zwar angedacht, aber auch mit einem späten Ausstiegsdatum (2038) versehen, und einer deutlichen Verteuerung des Ausstoßes von CO<sub>2</sub>-Emissionen (beispielweise in Form einer CO<sub>2</sub>-Steuer<sup>8</sup>) einen grundlegenden Systemwechsel über mehrere Handlungsfelder (Strom, Wärme, Mobilität) hinweg und eine damit verbundene Umstellung der bisherigen Wirtschafts- und Lebensstilmodelle erfordern.

---

<sup>8</sup> Dieses Anreizinstrument, das saubere Energien wettbewerbsfähiger und CO<sub>2</sub>-intensive Energien teurer machen würde, indem ein CO<sub>2</sub>-Mindestpreis festgesetzt wird, existiert (teilweise schon seit vielen Jahren) in mehreren anderen Industrieländern wie beispielsweise Großbritannien, Schweden oder Frankreich.

## **Partizipationsarrangements auf lokaler Ebene**

Ein grundlegender Umbau von Wirtschafts- und Lebensstilmodellen hin zu einem emissionsärmeren System setzt eine aktive Teilnahme der Bürgerinnen und Bürger sowie zivilgesellschaftlicher Akteure voraus. Partizipationsorientierten Initiativen vor Ort kommt dabei eine wichtige Rolle zu. Dem trägt das 1992 von der UNO verabschiedete Lokale Agenda-21-Programm Rechnung, das unter dem Motto „Global denken – lokal handeln!“ dazu anhält, im Rahmen einer engen Kooperation öffentlicher und privater Akteure nachhaltiger Entwicklungsziele auf kommunaler Ebene zu verwirklichen. Diese Ebene bietet sich für eine solche Kooperation und für mehr Beteiligung der Bürgerinnen und Bürger besonders an, weil hier ein hohes Sensibilisierungs- und Mobilisierungspotenzial besteht (vgl. Grunwald und Kopfmüller 2012, 164) und diese als Expertinnen und Experten ihrer Lebenswelt einen besonders wertvollen Beitrag zur Problembearbeitung beisteuern können. Unter günstigen Bedingungen können Vorteile wie die Erschließung privater Ressourcen und Potenziale besser an die kommunalen Bedingungen angepasste Lösungsstrategien, öffentliche Sensibilisierung für Nachhaltigkeitsfragen und Lernprozesse zwischen den beteiligten Akteuren verwirklicht werden (vgl. Wald und Jansen 2007). Zu beachten ist allerdings, dass der Erfolg lokaler (Agenda-21-)Initiativen stark davon abhängt, ob Interessenkonflikte und Machtasymmetrien zwischen den Akteuren in den Politiknetzwerken aufgelöst werden können und ein grundsätzlicher Konsens über die Notwendigkeit einer kommunalen Nachhaltigkeitsstrategie besteht. In Deutschland, wo viele lokale Agenda-21-Initiativen erst relativ spät initiiert wurden, lassen sich sowohl Erfolgsfälle (Wurster und Michel 2020) als auch zahlreiche gescheiterte Initiativen identifizieren.

## **Politische Kontroversen um Klimaschutz in Zeiten populistischer Bewegungen**

Voraussetzung für eine klimapolitische Transformation ist ein möglichst breiter gesellschaftspolitischer Konsens über die prinzipielle Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen und Nachhaltigkeitsanstrengungen. War in den vergangenen Dekaden eine Zunahme des umweltpolitischen Bewusstseins auf gesellschaftlicher Ebene (Klimaschutzanliegen rangieren zumeist sehr weit vorne bei Bevölkerungsbefragungen) und auch ein „Ergrünen“ zahlreicher Parteiensysteme (nicht zuletzt in Deutschland) feststellbar,<sup>9</sup> so scheint sich die Situation mit dem Aufkommen neuer populistischer Bewegungen und Parteien in jüngerer Zeit in zahlreichen Industrieländern grundlegend zu ändern. Eine neue kulturelle Konfliktlinie scheint die Gesellschaften in zwei Lager zu spalten. Auf der einen Seite stehen die Kosmopolitinnen und Kosmopoliten, tendenziell Bürgerinnen und Bürger aus bildungsnäheren Schichten und urbanen Milieus. Sie sehen sich

---

<sup>9</sup> In Bezug auf die Klimapolitik weist die Literatur zu Parteiunterschieden darauf hin, dass vor allem grüne Parteien eine hohe Affinität zu diesem Politikfeld aufweisen. Diese führte allerdings nicht dazu, dass nicht auch andere Parteien Umweltschutzfragen in ihre Programmatik aufgenommen haben. Vielmehr lassen sich für den deutschen Fall seit den 1980er-Jahren parteipolitische Ansteckungseffekte sowohl bei bürgerlichen als auch linken Parteien feststellen (Schmidt 2016). Für keine andere Partei in Deutschland ist die Klimapolitik programmatisch aber so wichtig wie für die GRÜNEN (*high issue salience*). Betrachtet man die Ausbaudynamik erneuerbarer Energien auf Bundesländerebene, so lassen sich dann auch korrespondierende Effekte grün gefärbter Landesregierungen in Richtung eines beschleunigten Ausbaus feststellen (Wurster und Hagemann 2018).

tendenziell als Gewinnerinnen und Gewinner der Globalisierung und setzen sich für internationalen Multilateralismus, offene Grenzen und liberale Werte wie Gleichheit aller Geschlechter ein. Auf der anderen Seite sammeln sich nationalstaatliche, zuweilen auch nationalistische Kommunitaristinnen und Kommunitaristen. Sie sehen sich tendenziell als Verliererinnen und Verlierer der Globalisierung und setzen auf den Nationalstaat, homogen gewachsene solidarische Gemeinschaften, eng kontrollierte Grenzen und stehen multilateralen Institutionen mit großer Skepsis gegenüber (Merkel 2017). Diese neue Konfliktlinie, die vor allem in der Flüchtlings- und Identitätspolitik virulent geworden ist, strukturiert zunehmend auch den Diskurs um klima- und umweltpolitische Fragen neu (Radtke et al. 2019). Trotz des keineswegs geringen ökologischen Fußabdrucks kosmopolitisch eingestellter Gruppen (*frequent flyers*) sind diese doch tendenziell bereit, Klimaschutzmaßnahmen zu unterstützen und internationale Umwelt- und Klimaabkommen als verpflichtend anzuerkennen. Klimaskeptikerinnen und Klimaskeptiker – in einem Artikel in der Zeit als „Klimakrieger“ betitelt (Blasberg und Kohlenberg 2012) –, die zunehmend ihre politische Heimat in nationalistisch-kommunitaristisch orientierten Parteien wie der AfD in Deutschland gefunden haben, stellen dagegen den von Menschen gemachten Klimawandel oder die daraus gezogenen Schlussfolgerungen ganz grundsätzlich in Frage (Brunnengräber 2013). Diese Positionen sind nicht zuletzt auch durch die Unterstützung von Seiten der Trump-Administration in den USA international auf dem Vormarsch. In Deutschland versuchen bundesweite Organisationen wie etwa „Vernunftkraft“ regionalen Widerstand gegen Windkraft-, Netzausbau und großflächige Photovoltaik-Anlagen aufzugreifen und zu verstärken. Obwohl Klimaschutzanliegen insgesamt in Umfragen immer noch eine breite Unterstützung in der deutschen Bevölkerung genießen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie zunehmend in einen polarisierten Meinungskampf hineingezogen werden. Dies könnte ähnlich wie im Falle der Flüchtlingspolitik die generelle Akzeptanz für einen ambitionierten Klimaschutz mindern (Radtke et al. 2019).

### **Die (politikwissenschaftliche) Debatte über *Climate-Engineering*-Technologien**

Angesichts der aufgezeigten Schwierigkeiten und manifester Konflikte der internationalen Klimadiplomatie sowie transnationaler und nationaler Anstrengungen, die Erderwärmung zu verlangsamen oder gar zu stoppen, sind Ideen, diesem Problem durch gezielte technische Eingriffe in das Klimasystem – sogenanntes *Climate Engineering* (CE) – zu begegnen, zum Gegenstand intensiver natur-, sozial- und zunehmend auch geisteswissenschaftlicher Diskussionen geworden (The Royal Society 2009; Burns und Strauss 2013; Caviezel und Revermann 2014; Preston 2016). Viele der vorgeschlagenen Technologien sind noch nicht grundlegend erforscht, andere werden indes bereits in ihrer potenziellen Wirkweise, beispielsweise durch Computersimulationen, untersucht.

Unter dem Begriff *Climate Engineering* (zuweilen auch *Geoengineering*) werden dabei zwei sehr unterschiedliche Technologiegruppen zusammengefasst (siehe auch Abschnitt 1.4.3): Sogenannte *Carbon-Dioxid-Removal*-Technologien (CDR) zielen darauf, durch biologische, chemische oder physikalische Prozesse das maßgeblich an der Klimaerwärmung beteiligte CO<sub>2</sub> aus der

Atmosphäre zu extrahieren, zum Beispiel durch massive Aufforstung, oder in anderen Kohlenstoffreservoirs des Erdsystems über möglichst lange Zeiträume zu binden, zum Beispiel durch *Carbon-Capture-and-Storage-Verfahren* (CCS) oder *Direct Air Capture* (DAC) (siehe z. B. Bericht des National Research Council 2015a).

Die sogenannte *Radiation Management*-Maßnahmen (RM) versuchen gezielt die Strahlungsbilanz der Erde zu verändern, indem sie zum Beispiel durch künstliche Wolkenbildung oder Reflektoren die Wärmeeinstrahlung der Sonne in die Atmosphäre reduzieren (National Research Council 2015b). RM-Technologien setzen also an den Symptomen, der Erderwärmung, an, während sie die Ursachen, die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration der Erdatmosphäre und deren Folgen wie die Versauerung der Ozeane, nicht beseitigen (Williamson und Turley 2012).

Während etwa ein Dutzend Staaten und nur wenige private Investoren die Erforschung von *Climate-Engineering*-Technologien vorantreiben, u. a. um deren potenzielle Wirkung besser zu verstehen, wollen andere Akteure diese erproben oder einsetzen (Oschlies und Klepper 2016). Dagegen ist die wissenschaftliche Debatte bislang nur in Einzelfällen zum Gegenstand politischer, zumeist parlamentarischer Beratungen über die Regulierung von CE-Forschung geworden (Harnisch, Uther und Boettcher 2015; Boettcher und Schäfer 2017).

Schwerpunkte der naturwissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Debatte bilden bisher zum einen die unterschiedlichen Wirkungen und Nebeneffekte sowie die Wechselwirkungen zwischen Regionen und Elementen des Klimasystems (z. B. Meeresströmungen, Wolkenbildung und Niederschlagsmustern), wie sie in regionalen und globalen integrierten Klimamodellen berechnet werden (Kravitz et al. 2015, 2016; Irvine et al. 2016; Kleinschmitt, Boucher und Platt 2018). Zum anderen untersuchen einige ingenieurwissenschaftliche Studien die grundsätzliche technische Machbarkeit einzelner Technologiekomponenten, beispielsweise feinsten Düsen zur künstlichen Wolkenbildung und deren finanzielle Kosten (Keith 2013; Smith, Dykema und Keith 2018; Sonntag et al. 2018).

Schwerpunkte in der sozialwissenschaftlichen Forschung zielen auf die unterschiedlichen Anreizstrukturen der beiden CE-Technologien für das Verhalten unterschiedlicher Akteure. Diskutiert wird, ob beide Technologien, insbesondere aber RM-Ansätze, übermäßiges Vertrauen in die Effektivität der Lösung kollektiver Handlungsprobleme bei den CO<sub>2</sub>-Reduktionsverhandlungen hervorrufen und dabei potenziell schwerwiegende negative Nebeneffekte in den Hintergrund geraten (Robock, Jerch und Bunzel 2008). In unterschiedlichen Wissenschaften wird diese Anreizstruktur unter der Überschrift des *Moral Hazard*-Effektes von RM-Technologien geführt, wonach das Bewusstsein über die (erwartete) Effektivität von RM (Versicherung) die Bereitschaft reduziert, die Erderwärmung durch weitergehende CO<sub>2</sub>-Reduktionsmaßnahmen zu stoppen (Anreiz zur Nutzung der Versicherung) (Lin 2013; McLaren 2016). Gleiches gilt für die Unsicherheit darüber, ob die Anreizstrukturen von CE-Technologien vor dem Hintergrund unterschiedlicher physischer und politischer Betroffenheiten nicht dazu führen könnte, dass einzelne Akteure unilateral den Einsatz herbeiführen und dadurch auch potentielle Gegenmaßnahmen hervorrufen könnten (Parker, Horton und Keith 2018; Heyen, Horton und Moreno-Cruz 2019) oder dass nach einem erfolgten Einsatz von RM-Technologien, die Aussetzung der RM-

Maßnahmen zu einer (möglicherweise ungewollten) schockartigen Erwärmung führen könnte (Parker und Irvine 2018).

Im Nachgang zu den Klimaverhandlungen von Paris im Jahr 2015 hat der IPCC einen Bericht vorgelegt, der die Erreichung des ambitionierten 1,5-Grad-Ziels der Pariser Vereinbarung in allen bekannten Projektionen an den großskaligen Einsatz von CDR-Maßnahmen bindet (IPCC 2018). Da bislang nur wenige rechtliche und politische Regeln für die Erforschung, die Produktion oder den Einsatz von CE-Technologien existieren (Reynolds 2018), zielt die interdisziplinäre wissenschaftliche Debatte darauf, Regeln für die Erforschung und den potenziellen Einsatz von CE-Technologien zu entwickeln und die Wechselwirkungen zwischen diesen und CO<sub>2</sub>-Reduktions-, Anpassungs- und gegebenenfalls Haftungsmaßnahmen zu analysieren (Burger und Gundlach 2018; C2G2 2019; Pfrommer et al. 2019; Stavins und Stowe 2019).

## Literaturverzeichnis

- Abraham, John P., Molly Baringer, Nathaniel L. Bindoff, Tim Boyer, Lijing Cheng, John A. Church, Jessica L. Conroy, Catia M. Domingues, John T. Fasullo, John Gilson, Gustavo Goni, Simon A. Good, John M. Gorman, Viktor Gouretski, Masao Ishii, Gregory C. Johnson, Shoichi Kizu, John M. Lyman, Alison M. MacDonald, W. J. Minkowycz, Sarah E. Moffitt, Matthew D. Palmer, Alberto R. Piola, Franco Reseghetti, Karina von Schuckmann, Kevin E. Trenberth, Isabella Velicogna und Josh K. Willis. 2013. „A Review of Global Ocean Temperature Observations: Implications for Ocean Heat Content Estimates and Climate Change.“ *Reviews of Geophysics* 51, Nr. 3: 450–83. <https://doi.org/10.1002/rog.20022>.
- Agentur für Erneuerbare Energien. 2018. „Preise für CO<sub>2</sub>-Zertifikate steigen.“ *Agentur für erneuerbare Energien*. Zugriff am 26. August 2021. <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/strom/preise-fuer-co2-zertifikate-steigen>.
- Arnold, Denis G. (Hrsg.). 2014. *The Ethics of Global Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Arrhenius, Svante. 1896. „On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.“ *Philosophical Magazine and Journal of Science* 41, Nr. 251: 237–76.
- Asselt, Harro van, und Fariborz Zelli. 2014. „Connect the Dots: Managing the Fragmentation of Global Climate Governance.“ *Environmental Economics and Policy Studies* 16, Nr. 2: 137–55. <http://doi.org/10.1007/s10018-013-0060-z>.
- Asselt, Harro van, und Fariborz Zelli. 2018. „International Governance.“ In *Governing Climate Change: Polycentricity in Action?*, herausgegeben von Andrew J. Jordan, Dave Huitema, Harro van Asselt und Johanna Forster, 29–46. Cambridge: Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/9781108284646.003>.
- Banerjee, Neela, Lisa Song und David Hasemyer. 2015. „Exxon: The Road Not Taken.“ *Inside Climate News*. Zugriff am 26. August 2021. <https://perma.cc/acy4-8nw5>.
- Bereiter, Bernhard, Sarah Shackleton, Daniel Baggenstos, Kenji Kawamura und Jeff Severinghaus. 2018. „Mean Global Ocean Temperatures During the Last Glacial Transition.“ *Nature* 553, Nr. 7686: 39–44. <https://doi.org/10.1038/nature25152>.
- Blasberg, Anita, und Kerstin Kohlenberg. 2012. „Die Klimakrieger.“ *Die Zeit*, 22. November. Zugriff am 7. November 2021. [https://www.zeit.de/2012/48/Klimawandel-Marc-Morano-Lobby-Klimaskeptiker?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com](https://www.zeit.de/2012/48/Klimawandel-Marc-Morano-Lobby-Klimaskeptiker?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com).
- Bodansky, Daniel, 1993, „The United Nations Framework Convention on Climate Change: A Commentary.“ *Yale Journal of International Law* 18, Nr. 2, 451–558. <https://digitalcommons.law.yale.edu/yjil/vol18/iss2/2>.
- Boettcher, Miranda, und Stefan Schäfer. 2017. „Reflecting upon 10 Years of Geoengineering Research: Introduction to the Crutzen + 10 Special Issue.“ *Earth's Future* 5, Nr. 3: 266–77. <https://doi.org/10.1002/2016EF000521>.

- Bolin, Bert. 2007. *A History of the Science and Politics of Climate Change: The Role of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Breitmeier, Helmut, Oran R. Young und Michael Zürn. 2006. *Analyzing International Environmental Regimes: From Case Study to Database*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Brunnengräber, Achim. 2013. „Klimaskeptiker in Deutschland und ihr Kampf gegen die Energiewende.“ IPW Working Paper 1/2013. Institut für Politikwissenschaft der Universität Wien.
- Bundesregierung. 2012. *Nationale Nachhaltigkeitsstrategie Fortschrittsbericht 2012*. Zugriff am 25. September 2021. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/nationale-nachhaltigkeitsstrategie-fortschrittsbericht-2012-370032>.
- Burger, Michael, und Justin Gundlach. 2018. „Research Governance.“ In *Climate Engineering and the Law: Regulation and Liability for Solar Radiation Management and Carbon Dioxide Removal*, herausgegeben von Michael B. Gerrard und Tracy Hester, 269–323. Cambridge: Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/9781316661864.006>.
- Burns, William C. G. und Andrew L. Strauss (Hrsg.). 2013. *Climate Change Geoengineering: Philosophical Perspectives, Legal Issues, and Governance Frameworks*. New York: Cambridge University Press.
- C2G2 (Carnegie Climate Engineering Governance Initiative). 2019. „Geoengineering: The Need for Governance.“ *Carnegie Council for Ethics in International Affairs*. Zugriff am 26. August 2021. <https://www.c2g2.net/wp-content/uploads/Geoengineering-Need-for-Governance.pdf>.
- Cass, Loren. 2017. „The Politics of Climate Change.“ *Oxford Research Encyclopedia of International Studies*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190846626.013.112>.
- Caviezel, Claudio, und Christoph Revermann. 2014. „Climate Engineering: Endbericht zum TA-Projekt ‚Geoengineering.‘“ *TAB-Arbeitsbericht* Nr. 159 (Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag). Zugriff am 26. August 2021. <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab159.pdf>.
- Chan, Sander, Robert Falkner, Matthew Goldberg und Harro van Asselt. 2016. „Effective and Geographically Balanced? An Output-Based Assessment of Non-state Climate Actions.“ *Climate Policy* 18, Nr. 1: 24–35. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1248343>.
- Clémençon, Raymond. 2016. „The Two Sides of the Paris Climate Agreement: Dismal Failure or Historic Breakthrough?“ *The Journal of Environment & Development* 25, Nr. 1: 3–24. <https://doi.org/10.1177/1070496516631362>.
- Cook, John, Dana Nuccitelli, Sarah A. Green, Mark Richardson, Bärbel Winkler, Rob Painting, Robert Way, Peter Jacobs und Andrew Skuce. 2013. „Quantifying the Consensus on Anthropogenic Global Warming in the Scientific Literature.“ *Environmental Research Letters* 8: 024024. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024024>.
- Dansgaard, Willi, Sigfus J. Johnsen, Henrik B. Clausen, Dorte Dahl-Jensen, Nils S. Gundestrup, Claus U. Hammer, Christine S. Hvidberg, Jørgen P. Steffensen, Árný E. Sveinbjornsdóttir, Jean Jouzel und Gerard C. Bond. 1993. „Evidence for General Instability of Past Cli-

- mate from a 250-kyr Ice-Core Record.“ *Nature* 364, Nr. 6434: 218–20. <http://doi.org/10.1038/364218a0>.
- Dauvergne, Peter (Hrsg.). 2012. *Handbook of Global Environmental Politics*. Cheltenham UK: Edward Elgar Publishing.
- Dose, Nicolai. 2008. *Problemorientierte staatliche Steuerung Ansatz für ein reflektiertes Policy-Design*. Staatslehre und politische Verwaltung, Band 13. Baden-Baden: Nomos.
- Duhau Silvia, und Cornelis de Jager. 2016. „On the Origin of the Dansgaard-Oeschger Events and Its Time Variability.“ In *Marine Isotope Stage 3 in Southern South America, 60 KA B.P.-30 KA B.P.*, herausgegeben von German M. Gasparini, Jorge Rabassa, Cecilia Deschamps und Eduardo P. Tonni, 23–47. Cham: Springer International Publishing.
- Ekardt, Felix, und Jutta Wieding. 2016. „Rechtlicher Aussagegehalt des Paris-Abkommens – eine Analyse der einzelnen Artikel.“ *Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht Sonderheft 39*: 36–57.
- Europäische Kommission. 2020. „Ein europäischer Grüner Deal: Erster klimaneutraler Kontinent werden.“ *Europäische Kommission*. Zugriff am 26. August 2021. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de).
- Gardiner, Stephen M. 2011. „Climate Justice.“ In *The Oxford Handbook of Climate Change and Society*, herausgegeben von John S. Dryzek, Richard B. Norgaard und David Schlosberg, 308–22. Oxford: Oxford University Press.
- Grunwald, Armin, und Jürgen Kopfmüller. 2012. *Nachhaltigkeit: Eine Einführung*. Frankfurt am Main: Campus Studium.
- Hansen, James, Makiko Sato, Pushker Kharecha und Karina von Schuckmann. 2011. „Earth’s Energy Imbalance and Implications.“ *Atmospheric Chemistry and Physics* 11: 13421–49. <http://doi.org/10.5194/acp-11-13421-2011>.
- Harnisch, Sebastian, Stephanie Uther und Miranda Boettcher. 2015. „From ‚Go□Slow‘ to ‚Gung□Ho‘? Comparing Climate Engineering Discourses in the UK, the US and Germany.“ *Global Environmental Politics* 15, Nr. 2: 56–78. [https://doi.org/10.1162/GLEP\\_a\\_00298](https://doi.org/10.1162/GLEP_a_00298).
- Harnisch, Sebastian, und Jale Tosun. 2016. „Die Klimavereinbarung von Paris: Eine erste politikwissenschaftliche Analyse.“ *Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht* 39: 72–87.
- Harris, Paul G. (Hrsg.). 2014. *Routledge Handbook of Global Environmental Politics*. London: Routledge.
- Hepburn, Cameron, Brian O’Callaghan, Nicholas Stern, Joseph Stiglitz und Dimitri Zenghelis. 2020. „Will COVID-19 Fiscal Recovery Packages Accelerate or Retard Progress on Climate Change?“ Working Paper 20-02. Oxford Smith School of Enterprise and Environment. Zugriff am 28. September 2021. <https://www.smithschool.ox.ac.uk/publications/wpapers/workingpaper20-02.pdf>.
- Heyen, Daniel, Joshua Horton und Juan Moreno-Cruz. 2019. „Strategic Implications of Counter-Geoengineering: Clash or Cooperation?“ *Journal of Environmental Economics and Management* 95: 153–77. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.03.005>.

- Huybers, Peter, und William Curry. 2006. „Links between Annual, Milankovitch and Continuum Temperature Variability.“ *Nature* 441, Nr. 7091: 329–32. <https://doi.org/10.1038/nature04745>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, herausgegeben von Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M. B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley und Working Group I Technical Support Unit. Zugriff am 28. September 2021. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectorial Aspects*, herausgegeben von Christopher B. Field, Vicente R. Barros, David Jon Dokken, Katharine J. Mach, Michael D. Mastrandrea, T. Eren Bilir, Monalisa Chatterjee, Kristie L. Ebi, Yuka Otsuki Estrada, Robert C. Genova, Betelhem Girma, Eric S. Kissel, Andrew N. Levy, Sandy MacCracken, Patricia R. Mastrandrea, Leslie L. White. Zugriff am 28. September 2021. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2015. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, herausgegeben von Rajendra K. Pachauri, Myles R. Allen, Vicente R. Barros, John Broome, Wolfgang Cramer, Renate Christ, John A. Church, Leon Clarke, Qin Dahe, Purnamita Dasgupta, Navroz K. Dubash, Ottmar Edenhofer, Ismail Elgizouli, Christopher B. Field, Piers Forster, Pierre Friedlingstein, Jan Fuglestvedt, Luis Gomez-Echeverri, Stephane Hallegatte, Gabriele Hegerl, Mark Howden, Kejun Jiang, Blanca Jimenez Cisneros, Vladimir Kattsov, Hoesung Lee, Katharine J. Mach, Jochem Marotzke, Michael D. Mastrandrea, Leo A. Meyer, Jan Minx, Yacob Mulugetta, Karen O'Brien, Michael Oppenheimer, Joy J. Pereira, Ramón Pichs-Madruga, Gian-Kasper Plattner, Hans-Otto Pörtner, Scott B. Power, Benjamin Preston, N.H. Ravindranath, Andy Reisinger, Keywan Riahi, Matilde Rusticucci, Robert Scholes, Kristin Seyboth, Youba Sokona, Robert Stavins, Thomas F. Stocker, Petra Tschakert, Detlef van Vuuren, Jean-Pascal van Ypersele. Zugriff am 24. November 2021. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. *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*, herausgegeben von Valérie Masson-Delmotte, Panmao Zhai, Hans-Otto Pörtner, Debra Roberts, Jim Skea, Priyadarshi R. Shukla, Anna Pirani, Wilfran Moufouma-Okia, Clotilde Péan, Roz Pidcock, Sarah Connors, J. B. Robin Matthews, Yang Chen, Xiao Zhou, Melissa I. Gomis, Elisabeth Lonnoy, Tom Maycock, Melinda

Tignor und Tim Waterfield. Zugriff am 1. September 2021. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15\\_SPM\\_version\\_stand\\_alone\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf).

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, herausgegeben von Valérie Masson-Delmotte, Panmao Zhai, Anna Pirani, Sarah L. Connors, Clotilde Péan, S. Berger, N. Caud, Yang Chen, L. Goldfarb, Melissa I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, Elisabeth Lonnoy, J.B. Robin Matthews, Tom K. Maycock, Tim Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu und B. Zhou. Im Druck.
- Irvine, Peter J., Ben Kravitz, Mark Lawrence, Dieter Gerten, Erica Hendy, Cyril Caminade, Simon Gosling, Belay Kassie, Daniel Kissling, Helene Muri, Andreas Oeschles und Steven Smith. 2016. „Towards a Comprehensive Climate Impacts Assessment of Solar Geoengineering.“ *Earth’s Future* 5, Nr. 1: 93–106. <http://doi.org/10.1002/2016EF000389>.
- Janssens-Maenhout, Greet, Monica Crippa, Diego Guizzardi, Marilena Muntean, Edwin Schaaf, Franciscus Dentener, Peter Bergamaschi, Valerio Pagliari, Jos G. J. Olivier, Jeroen A. H. W. Peters, John A. van Aardenne, Suvi Monni, Ulrike Doering, A. M. Roxana Petrescu, Efisio Solazzo und Gabriel D. Oreggioni. 2019. „EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major Greenhouse Gas Emissions for the Period 1970-2012.“ *Earth System Science Data* 11, Nr. 3: 959–1002. <https://doi.org/10.5194/essd-11-959-2019>.
- Keith, David W. 2013. *A Case for Climate Engineering*. Boston: MIT Press.
- Keohane, Robert O. und Michael Oppenheimer. 2016. „Paris: Beyond the Climate Dead End Through Pledge and Review?“ *Politics and Governance* 4, Nr. 3: 142–51. <http://doi.org/10.17645/pag.v4i3.634>.
- Keohane, Robert O. und David G. Victor. 2011. „The Regime Complex for Climate Change.“ *Perspectives on Politics* 9, Nr. 1: 7–23. <http://doi.org/10.1017/S1537592710004068>.
- Kleinschmitt, Christoph, Olivier Boucher und Ulrich Platt. 2018. „Sensitivity of the Radiative Forcing by Stratospheric Sulfur Geoengineering to the Amount and Strategy of the SO<sub>2</sub> Injection Studied With the LMDZ-S3A Model.“ *Atmospheric Chemistry and Physics* 18, Nr. 4: 2769–86. <https://doi.org/10.5194/acp-18-2769-2018>.
- Kravitz, Ben S., Douglas J. MacMartin, Hailong Wang und Philip J. Rasch. 2016. „Geoengineering as a Design Problem.“ *Earth System Dynamics* 7, Nr. 2: 469–97. <https://doi.org/10.5194/esd-7-469-2016>.
- Kravitz, Ben S., Alan Robock, Simone Tilmes, Olivier Boucher, Jason M. English, Peter J. Irvine, Andy Jones, Mark G. Lawrence, Michael MacCracken, Helene Muri, John C. Moore, Ulrike Niemeier, Steven J. Phipps, Jana Sillmann, Trude Storelvmo, Hailong Wang und Shingo Watanabe. 2015. „The Geoengineering Model Intercomparison Project Phase 6 (GeoMIP6): Simulation Design and Preliminary Results.“ *Geoscientific Model Development* 8: 3379–92. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3379-2015>.

- Lambeck, Kurt, Helene Rouby, Anthony Purcell, Yiyang Sun und Malcolm Sambridge. 2014. „Sea Level and Global Ice Volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene.“ *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111, Nr. 43: 15296–303. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111>.
- Li, Camille, und Andreas Born. 2019. „Coupled Atmosphere-Ice-Ocean Dynamics in Dansgaard-Oeschger Events.“ *Quaternary Science Review* 203: 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.031>.
- Lin, Albert C. 2013. „Does Geoengineering Present a Moral Hazard?“ *Ecology Law Quarterly* 40, Nr. 3: 673–712.
- Luterbacher, Urs, und Detlef F. Sprinz (Hrsg.). 2018. *Global Climate Policy: Actors, Concepts, and Enduring Challenges*. Cambridge: The MIT Press.
- McLaren, Duncan. 2016. „Mitigation Deterrence and the ‚Moral Hazard‘ of Solar Radiation Management.“ *Earth’s Future* 4, Nr. 12: 596–602. <http://doi.org/10.1002/2016EF000445>.
- Merkel, Wolfgang. 2017. „Kosmopolitismus versus Kommunitarismus: Ein neuer Konflikt in der Demokratie.“ In *Parties, Governments and Elites: The Comparative Study of Democracy*, herausgegeben von Philipp Harfst, Ina Kubbe und Thomas Poguntke, 9–23. Wiesbaden: Springer VS.
- National Research Council. 2015a. *Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration*. Washington, DC: The National Academies Press. <http://doi.org/10.17226/18805>.
- National Research Council. 2015b. *Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth*. Washington, DC: The National Academies Press. <http://doi.org/10.17226/18988>.
- Oreskes, Naomi. 2004. „The Scientific Consensus on Climate Change.“ *Science* 306, Nr. 5702: 1686. <http://doi.org/10.1126/science.1103618>.
- Oreskes, Naomi, und Erik M. Conway. 2010. *Merchants of Doubt: How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming*. New York: Bloomsbury Press.
- Oschlies, Andreas, und Gernot Klepper. 2016. „Research for Assessment, not Deployment, of Climate Engineering: The German Research Foundation’s Priority Program SPP 1689.“ *Earth’s Future* 5, Nr. 1: 128–34. <http://doi.org/10.1002/2016EF000446>.
- Ostwald, Wilhelm. 1909. *Energetische Grundlagen der Kulturwissenschaft*. Leipzig: Dr. Werner Klinkhardt Verlag. Zugriff am 31. Oktober 2021. <https://archive.org/details/energetischegru00ostwgoog/page/n7/mode/2up>.
- Parker, Andrew und Peter J. Irvine. 2018. „The Risk of Termination Shock from Solar Geoengineering.“ *Earth’s Future* 6, Nr. 3: 456–67. <https://doi.org/10.1002/2017EF000735>.
- Parker, Andrew, Joshua B. Horton, und David W. Keith. 2018. „Stopping Solar Geoengineering Through Technical Means: A Preliminary Assessment of Counter□ Geoengineering.“ *Earth’s Future* 6, Nr. 8: 1058–65. <https://doi.org/10.1029/2018EF000864>.

- Pattberg, Philipp, und Oscar Widerberg. 2018. „The Climate Change Regime.“ *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Zugriff am 18. Mai 2019. <https://oxfordre.com/climatescience/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001.0001/acrefore-9780190228620-e-46>.
- Pfrommer, Tobias, Timo Goeschl, Alexander Proelss, Martin Carrier, Johannes Lenhard, Henrike Martin, Ulrike Niemeier und Hauke Schmidt. 2019. „Establishing Causation in Climate Litigation: Admissibility and Reliability.“ *Climatic Change* 152: 67–84. <http://doi.org/10.1007/s10584-018-2362-4>.
- Pierrehumbert, Raymond T. 2010. *Principles of Planetary Climate*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Platt, Ulrich, und Thomas Leisner. 2019. „Ingenieurmäßige Klimakontrolle? Großskalige Maßnahmen können das Klima gezielt beeinflussen.“ *Meinungsbeitrag Physik Journal* 18, Nr. 7: 3. Zugriff am 4. November 2021. <https://www.pro-physik.de/restricted-files/133971>.
- Preston, Christopher J. (Hrsg.). 2016. *Climate Justice and Geoengineering: Ethics and Policy in the Atmospheric Anthropocene*. London: Rowman & Littlefield International.
- Radtke, Jörg, Weert Canzler, Miranda Schreurs und Stefan Wurster. 2018. „Die Energiewende in Deutschland: Zwischen Partizipationschancen und Verflechtungsfalle.“ In *Energiewende: Politikwissenschaftliche Perspektiven*, herausgegeben von Jörg Radtke und Norbert Kersting, 17–43. Wiesbaden: Springer VS.
- Radtke, Jörg, Weert Canzler, Miranda Schreurs und Stefan Wurster. 2019. „Energiewende in Zeiten populistischer Bewegungen. Einleitende Bemerkungen.“ In *Energiewende in Zeiten populistischer Bewegungen*, herausgegeben von Weert Canzler, Jörg Radtke, Miranda Schreurs und Stefan Wurster, 3–30. Wiesbaden: Springer VS.
- Rajamani, Lavanya. 2016. „Ambition and Differentiation in the 2015 Paris Agreement: Interpretative Possibilities and Underlying Politics.“ *International & Comparative Law Quarterly* 65, Nr. 2: 493–514. <http://doi.org/10.1017/S0020589316000130>.
- Rayner, Tim, und Andrew Jordan. 2016. „Climate Change Policy in the European Union.“ *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. <http://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.47>.
- Reynolds, Jesse L. 2018. „International Law.“ In *Climate Engineering and the Law: Regulation and Liability for Solar Radiation Management and Carbon Dioxide Removal*, herausgegeben von Michael B. Gerrard und Tracy Hester, 57–153. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rickels, Wilfried, Gernot Klepper, Jonas Dovern, Gregor Betz, Nadine Brachatzek, Sebastian Cacean, Kerstin Güssow, Jost Heintzenberg, Sylvia Hiller, Corinna Hoose, Thomas Leisner, Andreas Oschlies, Ulrich Platt, Alexander Proelß, Ortwin Renn, Stefan Schäfer und Michael Zürn. 2011. *Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering: Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung*

und Forschung. Zugriff am 7. September 2021. <https://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>.

- Robinson, Elmer, und Robert C. Robbins. 1968. *Sources, Abundance, and Fate of Gaseous Atmospheric Pollutants. Final Report and Supplement*. Menlo Park, Calif.: Stanford Research Institute.
- Robock, Alan, Kirsten Jerch und Martin Bunzl. 2008. „20 Reasons Why Geoengineering May Be a Bad Idea.“ *Bulletin of the Atomic Scientists* 64, Nr. 2: 14–59. <http://doi.org/10.2968/064002006>.
- Rosenau, James N. 1995. „Governance in the Twenty-First Century.“ *Global Governance* 1, Nr. 1: 13–43.
- Schanze, Jochen, Anna-Katharina Hornidge, Gérard Hutter, Andreas Macke und Daniel Osberg-haus. 2020. „Umweltkrisen.“ In *Handbuch Krisenforschung*, herausgegeben von Frank Bösch, Nicole Deitelhoff und Stefan Kroll, 179–204. Wiesbaden: Springer VS.
- Schellnhuber, Hans J. 2009. „Tipping Elements in the Earth System.“ *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, Nr. 49: 20561–63. <http://doi.org/10.1073/pnas.0911106106>.
- Schellnhuber, Hans J. 2015. *Selbstverbrennung: Die fatale Dreiecksbeziehung zwischen Klima, Mensch und Kohlenstoff*. München: C. Bertelsmann.
- Schmidt, Manfred G. 2016. *Das politische System Deutschlands: Institutionen, Willensbildung und Politikfelder*. München: C. H. Beck.
- Schomaker, Rahel. 2017. *Die europäische Energiewende*. Berlin: De Gruyter Oldenbourg.
- Schröder, Meinhard, Martin Claussen, Armin Grunwald, Andreas Hense, Gernot Klepper, Stephan Lingner, Konrad Ott, Dieter Schmitt und Detlef Sprinz. 2002. *Klimavorhersage und Klimavorsorge*. Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung, Band 16. Heidelberg: Springer.
- Smith, Doug M., James A. Screen, Clara Deser, Judah Cohen, John C. Fyfe, Javier García-Serrano, Thomas Jung, Vladimir Kattsov, Daniela Matei, Rym Msadek, Yannick Peings, Michael Sigmond, Jinro Ukita, Jin-Ho Yoon und Xiangdong Zhang. 2019. „The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) Contribution to CMIP6: Investigating the Causes and Consequences of Polar Amplification.“ *Geoscientific Model Development* 12: 1139–64. <http://doi.org/10.5194/gmd-12-1139-2019>.
- Smith, Jordan P., John Dykema und David Keith. 2018. „Production of Sulfates Onboard an Aircraft: Implications for the Cost and Feasibility of Stratospheric Solar Geoengineering.“ *Earth and Space Science* 5, Nr. 4: 150–62. <http://doi.org/10.1002/2018EA000370>.
- Sonntag, Sebastian, Miriam F. Gonzalez, Tatiana Ilyina, Daniela Kracher, Julia E. M. S. Nabel, Ulrike Niemeier, Julia Pongratz, Christian H. Reick und Hauke Schmidt. 2018. „Quantifying and Comparing Effects of Climate Engineering Methods on the Earth System.“ *Earth's Future* 6, Nr. 2: 149–68. <https://doi.org/10.1002/2017EF000620>.
- Stern, Nicholas, und Chris Taylor. 2007. „Economics. Climate Change: Risk, Ethics, and the Stern Review.“ *Science* 317, Nr. 5835: 203–4. <http://doi.org/10.1126/science.1142920>.

- Sterner, Thomas. 2015. „Higher Costs of Climate Change.“ *Nature* 527: 177–78. <http://doi.org/10.1038/nature15643>.
- Stavins, Robert N., und Robert C. Stowe (Hrsg.). 2019. *Governance of the Deployment of Solar Geoengineering*. Cambridge, Mass.: Harvard Project on Climate Agreements. Zugriff am 28. September 2021. [https://www.belfercenter.org/sites/default/files/files/publication/harvard\\_project\\_sg\\_governance-briefs\\_volume\\_feb\\_2019.pdf](https://www.belfercenter.org/sites/default/files/files/publication/harvard_project_sg_governance-briefs_volume_feb_2019.pdf).
- Supran, Geoffrey, und Naomi Oreskes. 2017. „Assessing ExxonMobil’s Climate Change Communications (1977–2014).“ *Environmental Research Letters* 12, Nr. 084019: 1–18. Zugriff am 4. November 2021. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa815f>.
- Tews, Kerstin. 2017. „Die Europäisierung der Energie- und Klimapolitik im Spannungsfeld konkurrierender Konzepte zur Koordination der Transformation der Energiesysteme.“ In *Die Energiewende verstehen – orientieren – gestalten*, herausgegeben von Jens Schippl, Armin Grunwald und Ortwin Renn, 371–400. Baden-Baden: Nomos.
- The Royal Society. 2009. *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*. RS Policy document 10/09. Zugriff am 5. Oktober 2021. [https://royalsociety.org/~media/royal\\_society\\_content/policy/publications/2009/8693.pdf](https://royalsociety.org/~media/royal_society_content/policy/publications/2009/8693.pdf)
- 
- UN (United Nations). 2016. *Report on the Conference of the Parties, Twenty-First Session, held in Paris from 30 November to 11 December 2015*. Zugriff am 25. September 2021. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>.
- Wald, Andreas, und Dorothea Jansen. 2007. „Netzwerk.“ In *Handbuch Governance. Theoretische Grundlagen und empirische Anwendungsfelder*, herausgegeben von Arthur Benz, Susanne Lütz, Uwe Schimank und Georg Simonis, 93–105. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Williamson, Philipp, und Carol Turley. 2012. „Ocean Acidification in a Geoengineering Context.“ *Philosophical Transactions of The Royal Society A* 370: 4317–42. <http://doi.org/10.1098/rsta.2012.0167>.
- Wirth, David A. 2017. „The Paris Agreement as a New Component of the UN Climate Regime.“ *International Organisations Research Journal* 12, Nr. 4: 185–214. Zugriff am 4. November 2021. <https://lawdigitalcommons.bc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2124&context=lsfp>.
- Wurster, Stefan. 2013. „Staatstätigkeit II: Neue Formen politischer Steuerung.“ In *Studienbuch Politikwissenschaft*, herausgegeben von Manfred G. Schmidt, Frieder Wolf und Stefan Wurster, 351–77. Wiesbaden: Springer VS.
- Wurster, Stefan, und Christian Hagemann. 2018. „Two Ways to Success: Expansion of Renewable Energies in Comparison between Germany’s Federal States.“ *Energy Policy* 119: 610–19. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.059>.

Wurster, Stefan, und Christian Hagemann. 2020. „Expansion of Renewables in a Federal Setting – Germany, Austria, and Belgium in Comparison.“ *Journal of Environment and Development* 29, Nr. 1: 147–68. <http://doi.org/10.1177/1070496519887488>.

Wurster, Stefan, und Alexandra Michel. 2020. „Determinanten des Lokalen-Agenda-21-Erfolgs in Heidelberg.“ *Journal of Self-Regulation and Regulation* 6: 47–67. <http://doi.org/10.11588/josar.2020.0.73399>.

Zscheischler, Jakob, Seth Westra, Bart J. J. M. van den Hurk, Sonia I. Seneviratne, Philip J. Ward, Andy Pitman, Amir AghaKouchak, David N. Bresch, Michael Leonard, Thomas Wahl und Xuebin Zhang. 2018. „Future Climate Risk from Compound Events.“ *Nature Climate Change* 8: 469–77. <http://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>.

## **Bildnachweis**

Abb. 1: CC BY-SA 4.0 (Glen Fergus)

Abb. 2: IPCC 2015

Abb. 3: Autoren

Abb. 4: Rickels et al. 2011