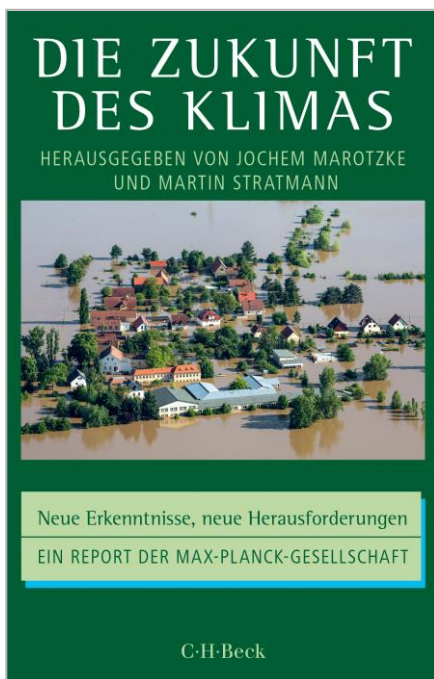


Unverkäufliche Leseprobe



Martin Stratmann, Jochem Marotzke
Die Zukunft des Klimas

Neue Erkenntnisse, neue
Herausforderungen

Ein Report der Max-Planck-Gesellschaft

230 Seiten mit 41 Abbildungen, davon 39 in Farbe,
und 1 Tabelle. Broschiert
ISBN: 978-3-406-66967-5

Weitere Informationen finden Sie hier:
<http://www.chbeck.de/13732095>

«Vorhersagen sind schwierig ...»

Möglichkeiten und Grenzen von Klimamodellen

Von Jochem Marotzke

Was verbindet Mark Twain, Niels Bohr, Albert Einstein und den amerikanischen Baseballspieler Yogi Berra? Ihnen allen wird wechselseitig das Bonmot zugeschrieben: «Vorhersagen sind schwierig, vor allem über die Zukunft.» Nochmals schwieriger sind Vorhersagen über eine Zukunft jenseits des menschlichen Erfahrungshorizonts, und um solche handelt es sich, wenn wir den Klimawandel bis zum Ende des 21. Jahrhunderts betrachten. Wir müssen uns bei diesen Vorhersagen auf höchst abstrakte Werkzeuge verlassen, nämlich auf Klimamodelle – Grund genug, hier deren Möglichkeiten und Grenzen auszuloten.¹

Globale Erwärmung im 21. Jahrhundert

Beginnen wir vom Ergebnis her und schauen uns zunächst die global gemittelte Oberflächenerwärmung an, die von der neuesten Generation an Klimamodellen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts vorhergesagt wird (Abb. 1). Die farbigen Balken am rechten Rand charakterisieren in ihrer Gesamtheit die Ergebnisse, die mit fast vierzig verschiedenen Klimamodellen in etwa 140 unterschiedlichen Simulationen gewonnen wurden; dargestellt ist, wie sich das zeitliche Mittel über die Periode von 2081 bis 2100 vom zeitlichen Mittel über die Periode von 1986 bis 2005 unterscheidet.²

Das Ergebnis ist auf den ersten Blick erkenntnistheoretisch ernüchternd: In einigen Simulationen erhalten wir eine Erwärmung um wenige Zehntel Grad Celsius – nach allen neuesten Erkenntnissen kaum ein Grund zur Besorgnis über Klimafolgen³ –, während wir in anderen Simulationen eine Erwärmung von fünf Grad Celsius erhalten – eine ebenso große Änderung wie vom Höhepunkt der letzten Eiszeit bis heute! Eine solche Erwärmung wäre mit gravierenden und schwer handhabbaren Folgen für Mensch und Natur verbunden. Wenige Zehntel oder fünf Grad – wissen wir denn praktisch gar nichts, nach Jahrzehnten intensiver Klimaforschung?

Klimamodelle

Wollen wir die Bandbreite der Ergebnisse verstehen, müssen wir die Erstellung der Simulationen genauer betrachten. Zu den Klimamodellen selbst soll hier nur angeführt werden, dass sie im Kern auf physikalischen Grundgesetzen beruhen, die das Geschehen in Atmosphäre, Ozean, Meereis und der Landoberfläche beschreiben. Diese Gesetze, etwa die Erhaltung von Masse und Energie, werden mathematisch in Gleichungen formuliert, und diese Gleichungen werden auf den größten uns zur Verfügung stehenden Computern gelöst.⁴ Einige physikalische Geschehnisse im Klimasystem wie etwa die Bildung von Wolken sind jedoch sehr kompliziert. Deshalb fließen in ein Klimamodell immer auch Annahmen ein, die zwar plausibel, aber nicht beweisbar sind. Da die Konstrukteure verschiedener Modelle, jeder für sich, gleichermaßen plausible, aber eben unterschiedliche Annahmen gemacht haben, kommt es zu unterschiedlichen Ergebnissen in den Modellen. Wir können nicht konstatieren, welche Modellvorhersage für das gesamte 21. Jahrhundert näher an der Wahrheit liegt; insofern stellen die Unterschiede zwischen einzelnen Modellen ein Mindestmaß für die sogenannte Modellunsicherheit dar. In Abbildung 1 wird diese Modellunsicherheit durch die Höhe der einzelnen farbigen Balken am rechten Rand sowie durch die Breite der Schattierung in den einzelnen Zeitreihen dargestellt.

Es gibt eine weitere fundamentale Ursache für die Unsicherheit in den Vorhersagen für das 21. Jahrhundert: Alle Modelle benutzen als Eingangsgröße die Zusammensetzung der Erdatmosphäre; diese aber lässt sich für die langfristige Zukunft bestenfalls plausibel hypothesisieren, nicht aber vorhersagen. Die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflusst jedoch das Klimageschehen auf fundamentale Weise. Zunächst bestimmt die atmosphärische Konzentration von Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan darüber, wie groß die Menge an infraroter, von der Oberfläche ausgesandter Strahlung ist, die in der Atmosphäre erst absorbiert und dann sowohl nach oben wie auch nach unten wieder ausgesandt wird. Der nach unten ausgesandte Teil erwärmt die Oberfläche – dies ist der Treibhauseffekt.⁵ Andererseits führen Schwebeteilchen (Aerosole) in der Atmosphäre dazu, dass einfallendes Sonnenlicht in den Weltraum zurückgestreut wird, was eine abkühlende Wirkung auf die Oberfläche hat. Aerosole entstammen sowohl natürlichen als auch menschengemachten Quellen. Die klimatisch wich-

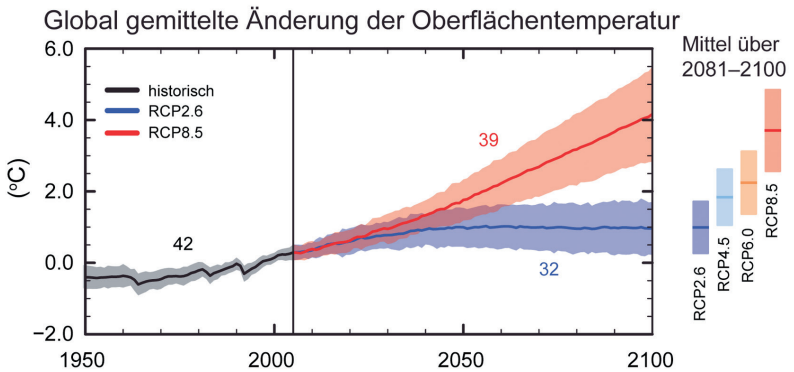


Abbildung 1: Simulierte global gemittelte Änderung der Oberflächentemperatur für die Vergangenheit (historisch) sowie für zwei Zukunftsszenarien, RCP2.6 und RCP8.5. Die Änderungen sind gegenüber dem zeitlichen Mittel über die Periode von 1986 bis 2005 angegeben, diese wiederum war um ungefähr 0,6 Grad Celsius wärmer als der Zustand vor Beginn der industriellen Revolution. Die Szenarien werden im Text erläutert, ebenso die Bedeutung der Schattierung. Die durchgezogenen Linien beziehen sich auf den Mittelwert über alle Modelle, deren Anzahl jeweils durch die Zahl gekennzeichnet wird.

tigste natürliche Quelle sind Vulkane, menschengemachte Quellen sind hauptsächlich Verbrennungsprozesse aller Art. Aus der Vergangenheit sind die Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen im Prinzip bekannt,⁶ Letztere allerdings teilweise mit erheblichen Unsicherheiten. Wie aber erhalten wir die Konzentrationen für die Zukunft?

Szenarien

Zur Abschätzung der künftigen Zusammensetzung der Erdatmosphäre wurden Szenarien entwickelt, in die verschiedene plausible Annahmen über mögliche künftige Entwicklungen des Ausstoßes von Treibhausgasen und Aerosolen einfließen. Veränderungen im natürlichen Ausstoß, etwa dem von Vulkanen, sind dabei nicht berücksichtigt. Die vom Menschen verursachten Ausstöße jedoch werden mit Hilfe von ökonomischen Modellen aus bestimmten Annahmen über die künftige demographische, politische und technologische Entwicklung berechnet und dann mit relativ einfachen Modellen in eine künftige zeitliche Entwicklung von Konzentrationen umgerechnet. Die Szenarien basieren im Wesentlichen auf drei unterschiedlichen Annahmen über künftige Maß-

nahmen zum Eindämmen der Treibhausgasemissionen: Im ersten Fall gibt es keine effektiven Maßnahmen und somit einen ungebremsen Anstieg der Emissionen und der Konzentrationen bis zum Jahr 2100 (Szenario RCP8.5). Im zweiten Fall gibt es gewisse Maßnahmen und somit einen Anstieg der Emissionen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (Szenario RCP4.5) beziehungsweise bis zu dessen Ende (Szenario RCP6.0), mit jeweils ungefähr gleichbleibenden Konzentrationen im Jahr 2100. Im dritten Fall gibt es sehr effektive Maßnahmen und somit sinkende Emissionen ab dem Jahr 2020 sowie sinkende Konzentrationen ab dem Jahr 2050 (Szenario RCP2.6).

Die Namen der Szenarien sind leider recht sperrig. Ich verwende sie hier dennoch, weil sie in der derzeitigen Klimamodellierung überall auftauchen und die Namen durch einen Wiedererkennungseffekt hoffentlich weniger störend wirken. Die Abkürzung RCP steht für »Representative Concentration Pathway« (Repräsentativer Konzentrationspfad) und die anschließende Zahl für die Stärke des menschengemachten Treibhauseffekts im Jahr 2100, die sich aus der jeweiligen Konzentration ergibt. In Szenario RCP2.6 ergibt sich also für das Jahr 2100 ein global gemittelter menschengemachter Treibhauseffekt von 2,6 Watt pro Quadratmeter, entsprechend höher für die anderen Szenarien. Dieser Treibhauseffekt erwächst hauptsächlich durch die erhöhte Konzentration an Kohlendioxid. Vor Beginn der industriellen Revolution lag diese Konzentration bei 278 Teilen pro Million (parts per million, ppm) und im Jahr 2010 bei 389 ppm. Die verschiedenen Szenarien ergeben für das Jahr 2100 Kohlendioxidkonzentrationen, die von 421 ppm in Szenario RCP2.6 bis zu 936 ppm in Szenario RCP8.5 reichen.⁷

Wenden wir uns mit unserem vertieften Verständnis des Hintergrunds jetzt wieder Abbildung 1 zu. Wir müssen bei der Bewertung der Unsicherheiten klar unterscheiden, ob wir uns auf die Unsicherheit im Klimageschehen beziehen, die sich in der Streuung der Modellergebnisse in einem bestimmten Szenario niederschlägt (Höhe der Balken bzw. Breite der Schattierung), oder auf die Unsicherheit bezüglich künftiger demographischer, politischer und technologischer Entwicklungen (welchem der Szenarien wird die Menschheit folgen – wenn überhaupt einem?). Nur die Modellunsicherheit ist der Klimaforschung zugänglich; die Szenarienunsicherheit rührt daher, dass wir nicht wissen, welche *Entscheidungen* die Menschheit in Zukunft fällen wird.

Derzeit ist es nicht möglich, den einzelnen Szenarien Wahrscheinlichkeiten ihres Eintretens zuzuordnen, abgesehen von subjektiven Einschätzungen. Insofern sind alle Aussagen über den langfristig zu erwartenden Klimawandel konditioniert auf ein bestimmtes Szenario, das immer benannt werden muss. Und wir erkennen, dass wir für jedes Szenario eine Modellunsicherheit für die global gemittelte Erwärmung haben, die ungefähr 2,5 Grad Celsius für das Szenario RCP8.5 beträgt und ungefähr 1,5 Grad Celsius für die drei anderen Szenarien. Gemittelt über alle Modelle, erwarten wir eine Erwärmung von ungefähr 1 Grad Celsius in Szenario RCP2.6 und 4 Grad Celsius in Szenario RCP8.5.

Räumliche Verteilung der Änderungen

Die global gemittelte Oberflächenerwärmung ist zwar der wichtigste Einzelindikator des Klimawandels, aber für eine umfassende Bewertung reicht er nicht aus. Niemand lebt im globalen Mittel. Wollen wir die Folgen des Klimawandels abschätzen, müssen wir uns die einzelnen Regionen der Erde anschauen. Abbildung 2 zeigt, über alle Modelle gemittelt, die globale Verteilung der zu erwartenden Änderungen in Temperatur und Niederschlag für die beiden extremen Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. Wir vergleichen dabei das Zwanzigjahresmittel am Ende des 21. Jahrhunderts mit dem zum Ende des 20. Jahrhunderts.⁸

Die Erwärmung zeigt in beiden Szenarien sehr ähnliche Muster, allerdings viel deutlicher ausgeprägt in Szenario RCP8.5. Die stärkste Erwärmung finden wir über den Kontinenten und in der Arktis. Die Ozeane erwärmen sich weniger stark, vor allem im nördlichen Nordatlantik und im Südlichen Ozean. Diese räumliche Verteilung der Erwärmung ist in ihren Grundzügen gut verstanden und rührt hauptsächlich daher, dass der Ozean aufgrund seiner hohen Wärmekapazität mit derselben Menge Wärmeenergie seine Temperatur deutlich weniger erhöht – ein Effekt, den wir sehr gut durch die viel schwächere Ausprägung der Jahreszeiten im maritim dominierten Klima kennen. Im nördlichen Nordatlantik und im Südlichen Ozean wird dieser Effekt noch einmal dadurch verstärkt, dass hier ein relativ großer Teil der Wassersäule und somit eine besonders große Wärmekapazität im direkten Kontakt mit der Atmosphäre steht.

Änderungen im Niederschlag zeigen ein komplexeres räumliches

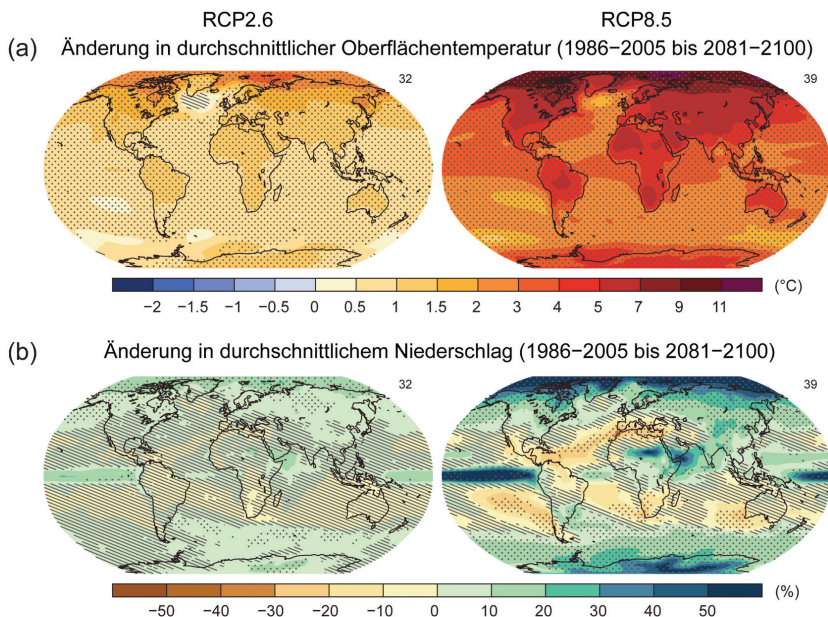


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der vorhergesagten Erwärmung (a) sowie der prozentualen Änderung im Niederschlag (b) für die beiden Szenarien RCP2.6 (links) und RCP8.5 (rechts). Dargestellt ist jeweils der Mittelwert über alle Modelle. Die Bedeutung der Punktierung und der Schraffur wird im Kasten »Robustheit der Vorhersagen« erläutert.

Muster als die der Temperatur; allerdings taucht dieses Muster wieder in beiden Szenarien auf und ist in Szenario RCP8.5 ausgeprägter. Grundsätzlich finden wir erhöhte Niederschläge in den Tropen und in den mittleren und hohen Breiten, dort besonders in den Polargebieten. Verminderte Niederschläge finden wir in den Subtropen, etwa im Mittelmeerraum. Auch diese grundsätzliche Verteilung ist gut verstanden, sie rührt daher, dass in einem wärmeren Klima der Wasserkreislauf stärker wird und somit generell die Intensität von Verdunstung und Niederschlag zunimmt. Zunehmen wird daher auch der Kontrast zwischen trockenen und feuchten Regionen – Trockenes wird trockener, Feuchtes wird feuchter.

Auf zwei weitere Aspekte der Simulationen für das 21. Jahrhundert können wir hier zwar nicht im Detail eingehen, sie sollen aber dennoch erwähnt werden. Zum einen zeigen fast alle Modelle für das Szenario

Robustheit der Vorhersagen

Wir befassen uns hier nicht nur mit den Möglichkeiten der Klimamodelle, sondern auch mit ihren Grenzen. Zu Letzterem gehört unabdingbar eine Diskussion der Unsicherheiten, die den Vorhersagen innewohnen. Wie aber erhalten wir eine quantitative Abschätzung dieser Unsicherheiten beziehungsweise umgekehrt der Vorhersagegüte, wenn unser Vorhersagehorizont praktisch unerreichbar weit in der Zukunft liegt? Wir müssen uns mit Hilfskonstruktionen begnügen, um überhaupt Aussagen treffen zu können.

Eine solche Konstruktion sehen wir in der Punktierung sowie der Schraffur in Abbildung 2. Punktiert dargestellt sind die *robusten* Änderungen – sie sind im Mittel über alle Modelle relativ groß, und die Modelle stimmen weitestgehend überein. Schraffiert dargestellt sind die *unklaren* Änderungen – sie sind in den Modellen relativ klein, *oder* die Modelle liefern sehr unterschiedliche Ergebnisse. «Relativ» groß oder klein bezieht sich dabei auf den Vergleich mit spontan auftretenden Klimaschwankungen – kein Jahr, kein Jahrzehnt ist wie das andere, ohne dass solche Schwankungen eine bestimmte Ursache hätten. Ein Klimaänderungssignal gilt erst dann als entdeckt, wenn es größer ist als die spontan auftretenden Klimaschwankungen; Gleiches gilt für vorhergesagte Änderungen.

Ist eine vorhergesagte Klimaänderung *robust*, heißt das natürlich noch nicht, dass die Vorhersage auch zuverlässig ist – es könnten ja alle Modelle denselben Fehler aufweisen. Umgekehrt jedoch können wir feststellen, dass eine *unklare* Vorhersage auf jeden Fall auch sehr unsicher ist.

RCP8.5, dass das arktische Meereis im Sommer bis zum Jahr 2100 fast vollständig verschwunden sein wird. Zwar bildet es sich jeden Winter neu, aber es würde im Gegensatz zu heute kein mehrjähriges Meereis mehr geben. Zum anderen erwarten wir eine ganze Reihe von Änderungen in klimatischen Extremereignissen. Besonders sicher sind wir uns bei der Zunahme von Hitzewellen, Dürren, Starkniederschlägen und extrem hohen Wasserständen in Küstenregionen; unklar ist das Bild hingegen bezüglich der Zunahme von Tropischen Wirbelstürmen.

Änderungen im Meeresspiegel

Die vom Menschen verursachte globale Erwärmung bewirkt einen Anstieg des Meeresspiegels; dabei spielen hauptsächlich zwei Effekte eine Rolle. Erstens geht über 90 Prozent der Wärmeenergie, die durch den erhöhten Treibhauseffekt im Klimasystem verbleibt, in den Ozean. Die damit verbundene Erwärmung führt zu einer Ausdehnung des Ozeanwassers und somit zu einem Meeresspiegelanstieg. Zweitens führt die allgemeine Erwärmung zu einem vermehrten Abschmelzen der Eismassen auf dem Land, also der Gebirgsgletscher sowie der großen Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis. Über die letzten vierzig Jahre sind diese beiden Effekte in etwa gleich groß gewesen; ganz grob erwarten wir diese Verteilung auch für das 21. Jahrhundert.⁹

Der vorhergesagte global gemittelte Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert hängt vom Szenario ab, wenn auch etwas weniger als im Fall der Erwärmung (Abbildung 3). Der Anstieg reicht im Mittel über alle Modelle von vierzig Zentimetern in Szenario RCP2.6 bis zu etwas über sechzig Zentimetern in Szenario RCP8.5, wobei die Modellunsicherheit hier im Bereich von dreißig bis vierzig Zentimetern liegt. Selbst bis zum Jahr 2100 überlappen sich die Vorhersagebereiche für die beiden extremen Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 – im deutlichen Gegensatz zur Erwärmung, für die es ab dem Jahr 2065 keine Überlappung dieser beiden Szenarien gibt (vergleiche mit Abbildung 1). Ein Meeresspiegelanstieg auf über einen Meter zum Jahr 2100 wird selbst in Szenario RCP8.5 für unwahrscheinlich gehalten.

Der Vergleich von Abbildung 1 für die Erwärmung mit Abbildung 3 für den Meeresspiegelanstieg zeigt vor allem für das Szenario RCP2.6 einen weiteren fundamentalen Unterschied. Die Oberflächenerwärmung ist in diesem Szenario bis zum Ende des Jahrhunderts zum Stillstand gekommen, der Meeresspiegel aber steigt immer weiter. Dies liegt daran, dass auch nach 2100 weiterhin Wärme von der Meeresoberfläche in den tieferen Ozean gelangt und dort zu weiterer Ausdehnung des Ozeanwassers führt. Ebenso schmelzen die Eisschilde weiter, beides erfolgt über Jahrhunderte und Jahrtausende. Selbst für den hypothetischen Fall, dass die Erwärmung so gering ist wie in Szenario RCP2.6 und auf dem Stand vom Ende des 21. Jahrhunderts verharret (1 Grad Celsius gegenüber dem Ende des 20. Jahrhunderts und somit 1,6 Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Periode),

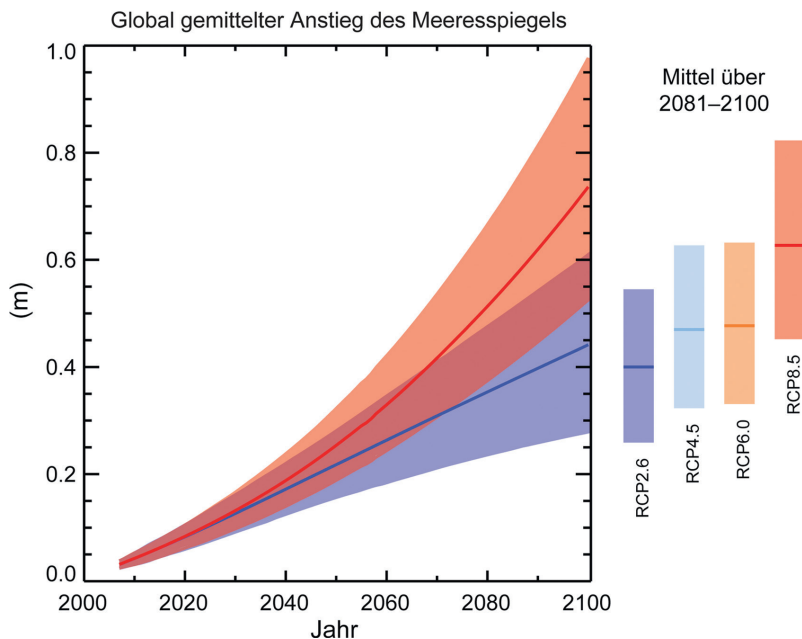


Abbildung 3: Vorhergesagter global gemittelter Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert, verglichen mit dem zeitlichen Mittel über die Periode von 1986 bis 2005. Dargestellt sind die Zeitreihen für die beiden Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 sowie in den Balken rechts das zeitliche Mittel über die Periode 2081 bis 2100 für alle vier Szenarien. Die Breite der Schraffur bzw. die Höhe der Balken zeigt die Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen *in demselben* Szenario.

erwarten wir bis zum Jahr 4000 einen Meeresspiegelanstieg von fast vier Metern! Der Meeresspiegel ist der Elefant des Klimasystems – er vergisst nicht.

Klimaziele und Emissionen

Ich habe bereits angedeutet, dass der künftige Verlauf der Erwärmung sehr wesentlich von den Entscheidungen der Menschheit abhängen wird. Wird sie sich für einen Wirtschafts- und Entwicklungspfad entscheiden, der zu verminderten Emissionen von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen führt, oder fallen die Entscheidungen so, dass in ihrer Folge die Emissionen weiter ansteigen? Über die politischen Prozesse, die zu dem einen oder dem anderen Ergebnis führen würden, wird in diesem Buch an anderer Stelle berichtet (siehe S. 93 ff.). An dieser Stelle möchte

ich hingegen ausführen, welche Klimaziele mit welchen Emissionen verknüpft sind, ohne schon auf die Umsetzbarkeit etwaiger angestrebter Emissionsminderungen Bezug zu nehmen. Mit einer klaren und einfachen Verknüpfung von Zielen und Emissionen hat die Forschung in den letzten Jahren Neuland betreten. Diese Forschung ist jetzt zum ersten Mal in einem IPCC-Bericht dargestellt worden.

Gesamtemissionen und Erwärmung

Die Beziehung zwischen Gesamtemissionen und Erwärmung ist so verblüffend einfach, weil sich zwei widerstreitende Effekte die Waage halten. Wir können uns das an einem Gedankenexperiment veranschaulichen, indem wir Wirkung und Schicksal einer Jahresemission von zehn Milliarden Tonnen Kohlenstoff im Kohlendioxid betrachten, und zwar für die heutige Zeit und für das Jahr 2100. Zehn Milliarden Tonnen entsprechen etwa dem heutigen Wert. Zunächst bewirkt diese Emission eine Erhöhung der atmosphärischen Konzentration von ungefähr 4 ppm. Hiervon gehen jeweils 1 ppm in den Ozean sowie die Landvegetation, es verbleiben also 2 ppm jährlicher Zuwachs in der Atmosphäre. Dadurch wird der Treibhauseffekt verstärkt; dieser Verstärkungseffekt nimmt jedoch mit wachsender bereits vorhandener Kohlendioxidkonzentration ab. Im Jahr 2100 bewirken 2 ppm Zuwachs also einen geringeren Treibhauseffekt als heute.

Andererseits aber nehmen Ozean und Landvegetation bei erhöhter Kohlendioxidkonzentration und erhöhter Temperatur im Jahr 2100 weniger Kohlendioxid auf als heute, in unserem Gedankenexperiment also weniger als jeweils 1 ppm. Dementsprechend verbleiben mehr als 2 ppm in der Atmosphäre, was ausgleicht, dass jedes ppm in seiner Auswirkung auf den Treibhauseffekt weniger effektiv ist als heute. Eine bestimmte Emissionsmenge bewirkt also immer nahezu denselben Treibhauseffekt und somit nahezu dieselbe Erwärmung, unabhängig davon, wann die Emission erfolgt.

Abbildung 4 zeigt für eine Reihe von Simulationen die Beziehung zwischen der global gemittelten Oberflächentemperatur und der Gesamtmenge an anthropogenen Kohlendioxidemissionen. Referenzzeitraum ist dabei jeweils das späte 19. Jahrhundert; es werden sowohl die historischen Simulationen als auch die Szenarienrechnungen einbezogen. Wir erkennen einen sehr einfachen Zusammenhang, der angesichts der Komplexität des Klimageschehens verblüfft: Für eine bestimmte Gesamt-

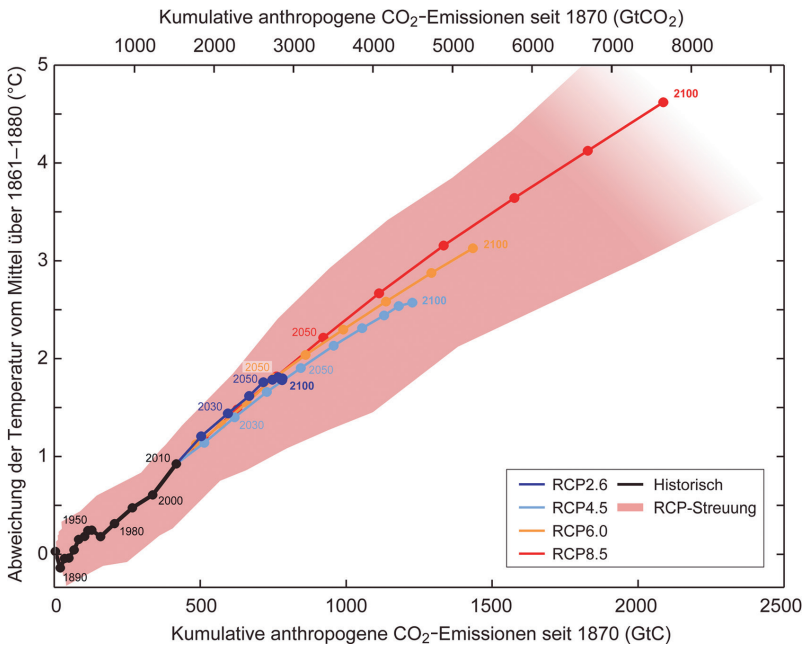


Abbildung 4: Simulierte global gemittelte Änderung der Oberflächentemperatur, aufgetragen gegen die kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen seit 1870. Die Emissionen sind sowohl in emittiertem Kohlendioxid angegeben (obere x-Achse) als auch in der Menge an Kohlenstoff darin (untere x-Achse).

menge an Emissionen erhalten wir eine bestimmte Erwärmung, unabhängig davon, wann die Emissionen stattgefunden haben. Für das Mittel über alle Modelle, welches durch die farbigen Linien dargestellt ist, finden wir eine Erwärmung von ungefähr einem Grad Celsius für jeweils 500 Milliarden Tonnen (500 Gigatonnen, 500 Gt) Emissionen von Kohlenstoff im Kohlendioxid. Hierbei spielt es keine Rolle, wann die Emissionen stattgefunden haben, entscheidend ist lediglich die gesamte, kumulative Menge. Grundsätzlich ist diese Beziehung gut verstanden, wie im Kasten «Gesamtemissionen und Erwärmung» erläutert.

Ein wesentliches Detail dieser Beziehung muss unbedingt erwähnt werden, um Missverständnisse zu vermeiden. Die Zahl von einem Grad Celsius Erwärmung pro 500 Milliarden Tonnen Emissionen bezieht sich nicht auf die Menge des Kohlendioxids selbst, sondern auf die Menge des Kohlenstoffs darin. Kohlendioxid, CO₂, enthält ja auch Sauerstoff, und ein Molekül Kohlendioxid ist daher ungefähr 3,7-mal so schwer

wie ein Atom Kohlenstoff. Leider werden beide Maßeinheiten verwendet: Wird der gesamte Kohlenstoffkreislauf betrachtet, einschließlich der Umwandlung von festem Kohlenstoff in Kohlendioxid durch Verbrennung, der Aufnahme von Kohlenstoff in Pflanzen durch Photosynthese sowie der Aufnahme und Auflösung von Kohlendioxid im Ozean, kommt es auf die Menge des Kohlenstoffs an. In politischen und wirtschaftlichen Diskussionen hat es sich aber eingebürgert, die Gesamtmenge an Kohlendioxid zu betrachten. Beides ist im jeweiligen Kontext angemessen; in Abbildung 4 sind daher auf der x-Achse beide Einheiten angegeben. In einer breiteren Diskussion kann die Parallelität der Maßeinheiten durchaus zu Verwechslungen führen; die Einheit muss daher immer benannt werden.

Für jeweils 500 Milliarden Tonnen Emissionen Kohlenstoff im Kohlendioxid erhalten wir also eine Erwärmung von einem Grad Celsius. Umgekehrt können wir ein bestimmtes Klimaziel in ein Budget für künftige Emissionen umrechnen. Am prominentesten ist hier natürlich das Ziel der Bundesregierung und der EU, die Erwärmung auf unter zwei Grad Celsius, verglichen mit dem vorindustriellen Zustand, zu beschränken. Laut Abbildung 4 haben wir 2010 ganz grob bereits 500 Milliarden Tonnen Kohlenstoff im Kohlendioxid emittiert und damit eine Erwärmung von einem Grad Celsius bewirkt. Um unter zwei Grad Celsius zu bleiben, hätten wir demnach also noch ein Budget von weiteren 500 Milliarden Tonnen, bei gleichbleibenden Emissionen also noch etwa fünfzig Jahre heutigen Wirtschaftens. Danach hätten wir – nichts mehr!

Die hier aufgeführten Zahlen müssen mit einer gewissen Vorsicht genossen werden. Jedes einzelne Klimamodell zeigt zwar für sich einen einfachen Zusammenhang zwischen Gesamtemissionen und Erwärmung, aber wie dieser Zusammenhang quantitativ aussieht, hängt vom Modell ab. Im einen Extremfall könnte die Erwärmung pro 500 Milliarden Tonnen ein halbes Grad Celsius betragen, im anderen eineinhalb Grad Celsius. Außerdem sind in Abbildung 4 nicht die Beiträge anderer Treibhausgase wie Methan eingeflossen. Und schließlich müsste ein Entscheidungsträger berücksichtigen, welches Restrisiko eines «Überschießens» über das Zwei-Grad-Ziel oder ein anderes Ziel er bereit wäre hinzunehmen: fünfzig Prozent? dreißig Prozent? Oder doch nur zehn Prozent? All diese Betrachtungen müssen in eine quantitative Abschätzung einfließen, die dann einer Entscheidung zugrunde liegt. Aber welche Entscheidung auch getroffen wird – sie lässt sich in ein Gesamt-

budget an künftigen Kohlendioxidemissionen umrechnen, und für jedes somit festgelegte Gesamtbudget gilt: Sollten die Emissionen zunächst weiter steigen, erfordert dies umso deutlichere Minderungen später.

Nachklang: Vertrauen in die Klimamodelle

Kehren wir jetzt wieder zu unserem Ausgangspunkt zurück: Die langfristigen Vorhersagen zum Klimawandel müssen sich auf Klimamodelle stützen, und es ist unabdingbar, die Verlässlichkeit dieser Vorhersagen zu bewerten. Wir haben bereits die Modellunsicherheit als ein Mindestmaß für die Unsicherheit der Vorhersagen betrachtet, aber wir wüssten gerne mehr. Hier aber liegt ein fundamentales Problem: Der Vorhersagehorizont liegt so weit in der Zukunft, dass wir ein Standardverfahren der wissenschaftlichen Methode nicht anwenden können, nämlich theoretische Vorhersagen anhand von Beobachtungen zu überprüfen. Warum das nicht geht, illustrieren wir am besten mit einem Vergleich.

Die Klimavorhersage befindet sich in einer völlig anderen Lage als die Wettervorhersage. Letztere verfügt über einen Erfahrungsschatz von 15 000 oder mehr täglichen Vorhersagen; über vierzig Jahre lang hat sie die Möglichkeit gehabt, ihre Vorhersage für den nächsten Tag am tatsächlich eingetretenen Wettergeschehen zu überprüfen. Die Klimavorhersage hat im Vergleich dazu einen dramatisch eingeschränkten Erfahrungsschatz. Zwar konnten im IPCC-Bericht von 2013 die früheren Vorhersagen anhand des Klimageschehens seit 1990 überprüft und im Wesentlichen bestätigt werden,¹⁰ aber Erfahrung mit der Überprüfung von Vorhersagen über ein ganzes Jahrhundert gibt es nicht. Die Klimaforschung ist also auf indirekte Verfahren angewiesen, um die Verlässlichkeit ihrer Modelle zu überprüfen. Ob die Ergebnisse dieser Verfahren auf langfristige Vorhersagen übertragen werden können, wird auf absehbare Zeit mit einem Fragezeichen versehen sein. Andererseits gibt es durchaus eine Reihe von Argumentationslinien, die für eine Verlässlichkeit der Modelle sprechen.

Zum Ersten basieren die Modelle in ihrem Kern auf bekannten physikalischen Grundgesetzen wie denen der Erhaltung von Masse und Energie, deren Gültigkeit außer Zweifel steht. Die atmosphärischen Komponenten der Modelle ähneln sehr den Wettervorhersagemodellen der 1980er Jahre,¹¹ mit denen bereits vor dreißig Jahren sehr gute Wettervorhersagen erstellt wurden. Das Klimaproblem ist gewiss anders gelagert als das Wetterproblem; denn fürs Wetter sind Änderungen

in der Zusammensetzung der Erdatmosphäre weitgehend irrelevant. Dennoch impliziert die Ähnlichkeit der Modelle, dass viele Prozesse in der Atmosphäre realistisch dargestellt werden.

Zum Zweiten werden die Klimamodelle einer Vielzahl von Tests unterworfen, ob sie Aspekte des Klimageschehens der Vergangenheit richtig wiedergeben. Dies betrifft die «historische» Periode, also grob das 20. Jahrhundert, für das instrumentelle Beobachtungsdaten vorliegen, aber auch Zeiten der Erdvergangenheit wie das letzte Jahrtausend oder die letzte Eiszeit. In allen bisherigen Berichten des IPCC gab es ein Kapitel zur Modellevaluation, in denen Modellsimulationen mit Beobachtungen verglichen wurden. Viele beobachtete Aspekte vor allem der großräumigen Temperaturentwicklung finden sich in den Modellen wieder¹² – die Modelle wurden also in einer großen Zahl von Tests bestätigt, obwohl sie in diesen Tests auch hätten scheitern können.

Zum Dritten verfügen wir bezüglich der fundamentalen Effekte, die durch die veränderte Zusammensetzung der Erdatmosphäre verursacht werden, über ein tiefes und grundlegendes Verständnis. Die menschengemachte Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration führt zu einem erhöhten Treibhauseffekt, und diese Beziehung ist selbst in ihren Einzelheiten sehr gut verstanden.¹³ Der erhöhte Treibhauseffekt bewirkt dann, dass Energie im Klimasystem zurückgehalten wird und somit der Energie- bzw. Wärmeinhalt zunimmt. Über neunzig Prozent dieser zusätzlichen Energie verbleiben im Ozean; wir finden sie durch die Messung erhöhter Temperaturen.¹⁴ Unser Verständnis des menschengemachten Klimawandels beruht also auf ganz elementarer Physik – Energie bleibt erhalten! Und da sich an der Energieerhaltung auch in Zukunft nichts ändern wird, wird eine anhaltende Emission von Kohlendioxid zu anhaltender Erwärmung führen, mit all ihren Folgen.