

Klimawissenschaft

Eine schwankende Angelegenheit

Die Klimaerwärmung infolge der Treibhausgasemissionen könnte geringer ausfallen als gedacht. Aber das Problem bleibt trotzdem erhalten



In den letzten 15 Jahren blieben die Lufttemperaturen an der Erdoberfläche nahezu unverändert, während die Treibhausgasemissionen weiter zugenommen haben. Die Welt fügte der Atmosphäre zwischen 2000 und 2010 annähernd 100 Milliarden Tonnen Kohlenstoff hinzu. Das ist ungefähr ein Viertel des gesamten CO₂, das die Menschheit seit 1750 ausgestoßen hat. Und dennoch beobachtet James Hansen, Leiter des Goddard Instituts für Weltraum-Studien bei der NASA, dass „sich das Fünfjahresmittel der globalen Temperatur über ein Jahrzehnt hinweg kaum verändert hat.“

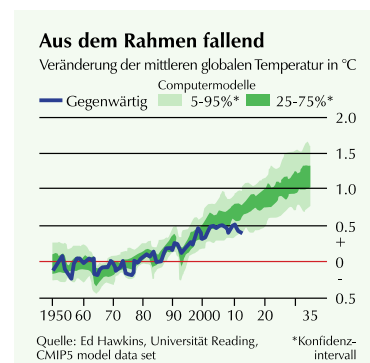
Innerhalb kurzer Perioden schwanken die Temperaturen, doch das Ausbleiben einer neuen Erwärmung ist eine Überraschung. Ed

Hawkins von der Universität Reading in Großbritannien weist darauf hin, dass sich die Oberflächentemperaturen seit 2005 bereits im unteren Bereich einer Reihe von Vorhersagen befinden, die anhand von 20 Klimamodellen erstellt worden waren (siehe Abb. 1). Wenn sie weiterhin etwa konstant bleiben, werden sie in einigen Jahren aus dem Vorhersagebereich der Modelle herausfallen.

Diese Diskrepanz zwischen zunehmenden Treibhausgasemissionen und nicht steigenden Temperaturen ist derzeit eines der größten Rätsel in der Klimawissenschaft. Das heißt nicht, dass die globale Erwärmung eine Täuschung ist. Obwohl die Temperaturen sich kaum ändern, bleiben sie im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts doch beinahe 1°C oberhalb des Temperaturniveaus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Aber das Rätsel will erklärt werden.

Die Diskrepanz könnte bedeuten, dass es – aus irgendeinem unerklärlichen Grund – 2000 bis 2010 eine vorübergehende

Abbildung 1



zeitliche Verzögerung zwischen mehr Kohlendioxid und höheren Temperaturen gegeben hat. Oder es könnte sein, dass die 1990er Jahre, als die Temperaturen schnell anstiegen, selbst die abweichende Periode waren. Oder, wie eine zunehmende Zahl von Forschungsergebnissen nahelegt, es könnte sein, dass das Klima auf höhere Kohlendioxidkonzentrationen in einer Weise reagiert, die zuvor nicht richtig interpretiert wurde. Diese Möglichkeit, wenn sie denn zutreffend ist, könnte sich sowohl für die Klimawissenschaft als auch für die Umwelt und die Sozialpolitik als sehr bedeutsam erweisen.

Der unsensible Planet

In der wissenschaftlichen Fachsprache wird die Art, wie das Klima auf Veränderungen der Kohlendioxidmengen reagiert, als „Klimasensitivität“ bezeichnet. Diese wird üblicherweise definiert durch die Angabe, um wie viel heißer die Erde sein wird bei jeweils einer Verdopplung der CO₂-Konzentration. Die sogenannte Gleichgewichtssensitivität, die am meisten gebrauchte Maßeinheit, bezieht sich auf den Temperaturanstieg, nachdem alle Rückkopplungsmechanismen agieren durften (aber ohne Berücksichtigung von Änderungen in der Vegetation und bei den Eisdecken).

Kohlendioxid selbst absorbiert ständig infrarote Strahlung. Bei jeder Verdopplung des CO₂-Gehalts wird eine Erwärmung von annähernd 1°C erzeugt. Ein Anstieg in den Konzentrationen von einem vorindustriellen Niveau von 280 ppm (parts per million, „Teile pro Million“) auf 560 ppm würde demnach die Erde um 1°C erwärmen. Wäre dies alles, worum man sich Gedanken machen müsste, dann gäbe es praktisch keinen Anlass zur Sorge. Einen Temperaturanstieg von 1°C könnte gelassen hingenommen werden. Aber so einfach liegen die Dinge aus zwei Gründen nicht. Zum einen haben die steigenden CO₂-Konzentrationen direkten Einfluss auf Faktoren wie die Menge an Wasserdampf (ebenfalls ein Treibhausgas) und auf Wolken, die den Temperaturanstieg verstärken oder vermindern. Dies beeinflusst die Gleichgewichtssensitivität direkt, weshalb eine Verdopplung der Kohlendioxidkonzentration mehr bewirken würde als einen Temperaturanstieg um 1°C. Der zweite Grund ist, dass andere Faktoren wie der Ausstoß von Ruß und anderer Aerosole in die Atmosphäre zum Effekt von CO₂ beitragen oder ihn schmälern. Alle seriösen Klimawissenschaftler stimmen diesen zwei Denkrichtungen zu. Aber über die Größenordnung der vorhergesagten Änderung sind sie sich nicht einig.

Der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klimaveränderung), der die Hauptrichtung der Klimawissenschaft vertritt, schätzt den Wert auf ungefähr 3°C, plus oder minus etwa 1 Grad. In seiner jüngsten Schätzung (2007) gab er an, „die Gleichgewichts-Klimasensitivität ... liege wahrscheinlich im Bereich von 2°C bis 4,5°C, mit dem wahrscheinlichsten Wert von ungefähr 3°C und wird kaum geringer als 1,5°C ausfallen. Werte von mehr als 4,5°C können nicht ausgeschlossen werden.“ Die nächste Schätzung des IPCC soll im September vorgenommen werden. Ein Entwurf ist vor kurzem durchgesickert. Er enthielt dieselben Bereichsangaben für die voraussichtlichen Werte und fügte eine Sensitivitäts-Obergrenze von 6°C bis 7°C hinzu.

Eine Erhöhung von 3°C könnte extrem schädigend wirken. Der früheren Bewertung des Weltklimarates zufolge könnte ein solcher Anstieg bedeuten, dass mehr Gebiete von Dürre betroffen würden, dass bis zu 30% der Arten ein höheres Aussterberisiko hätten, dass es verstärkt zu gewaltigen tropischen Stürmen käme und der Meeresspiegel ansteigen würde.

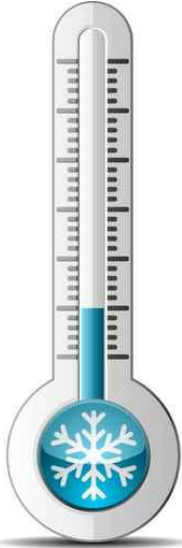
Eine Vielzahl neuer Modelle

Andere Studien der letzten Zeit zeichnen allerdings ein anderes Bild. Ein unveröffentlichter Bericht des norwegischen Forschungsrates, eines Teams unter der Leitung von Terje Berntsen von der Osloer Universität und durch die Regierung finanziert, verwendet eine andere Methode als der IPCC. Er schlussfolgert, dass mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit die Verdopplung der CO₂-Emissionen die Temperaturen nur um 1,2 bis 2,9°C ansteigen lassen, wobei die höchste Wahrscheinlichkeit bei der Zahl 1,9°C liegt. Die Obergrenze des Bereichs dieser Untersuchung liegt deutlich unterhalb der oberen Schätzwerte des Weltklimarates für die voraussichtliche Sensitivität.

Diese Studie wurde noch nicht von Fachleuten geprüft, sie kann unzuverlässig sein. Aber ihre Prognosen stehen nicht allein da. Die Arbeit von Julia Hargreaves vom Forschungsinstitut für globale Veränderungen (Research Institute for Global Change) in Yokohama, die 2012 veröffentlicht wurde, sieht eine Chance von 90 %, dass die tatsächliche Veränderung sich im Bereich von 0,5 bis 4,0°C bewegt, mit einem Mittelwert bei 2,3°C. Sie zieht Kenntnisse heran, wie sich das Klima vor 20.000 Jahren, zur Hochzeit der letzten Eiszeit verhalten hat; einer Periode, in der die Kohlendioxid-Konzentrationen Sprünge machten. Nic Lewis, ein unabhängiger Klimawissenschaftler, errechnete einen noch geringeren Bereich: 1,0 bis 3,0°C mit einem Mittelwert von 1,6°C. Seine Berechnungen analysierten vom IPCC herangezogene Arbeiten erneut und bezogen jüngere Temperaturdaten mit ein. In all diesen Untersuchungen werden die Chancen für eine Klimasensitivität oberhalb von 4,5°C verschwindend gering.

Liegen solche Einschätzungen richtig, hätte dies Folgen für die Wissenschaft der Klimaveränderung und möglicherweise auch für die Politik. Wenn, wie es allgemeine Meinung ist, die globale Temperatur als Reaktion auf die Verdopplung der Emissionen um 3°C oder mehr ansteigen kann, dann wäre die korrekte Antwort darauf: die Erwärmung und die sie verursachenden Treibhausgase müssen eingeschränkt werden. Dies wird in der Fachsprache „Mitigation“ [Abschwächung] genannt. Wenn dann noch von außen unter Umständen etwas Katastrophales passierte, das zum Beispiel zu einem Anstieg um 6°C führt, dann könnte dies drastische Maßnahmen rechtfertigen.

Sollten allerdings die Temperaturen als Reaktion auf eine Verdopplung der Kohlenstoffemissionen „nur“ um 2°C ansteigen (und wenn die Wahrscheinlichkeit eines Anstiegs um 6°C gering ist), kann die Berechnung anders ausfallen. Vielleicht sollte die Welt dann versuchen, die Verschwendung mit Treibhausgasen zu regulieren (besser als sie zu stoppen). Nach dem Motto: Es gibt keinen Grund, eine Versicherung gegen Erdbeben abzuschließen, wenn man nicht in einer Erdbebenzone lebt. In diesem Fall wäre statt verstärkter Abschwächung eher verstärkte Anpassung die richtige Taktik für den Grenzfall. Aber dies wäre nur dann ein guter Rat, wenn diese neuen Schätzwerte wirklich zuverlässiger wären als die alten. Und verschiedene Modelle liefern unterschiedliche Ergebnisse.



Eine Art von Modellen, die GCMs (general circulation models, allgemeine Zirkulationsmodelle), nutzen eine umgekehrte Herangehensweise. Sie ordnen die Erde und ihre Atmosphäre in ein Raster ein, das eine riesige Anzahl von Berechnungen durchführt, um das Klimasystem und die vielfältigen Einflüsse darauf nachzubilden. Der Vorteil solcher komplexer Modelle besteht darin, dass sie extrem detailliert sind. Ihr Nachteil ist, dass sie nicht auf neue Temperaturwerte reagieren. Sie simulieren die langfristige Entwicklung des Klimas, ohne aktuelle Beobachtungen einzubeziehen. Ihre Empfindlichkeit basiert darauf, wie genau sie die Prozesse und Rückkopplungen im Klimasystem beschreiben.

Energiebilanzmodelle sind einfacher. Sie gehen von oben nach unten vor, behandeln die Erde als eine gesamte Einheit oder als zwei Hemisphären und stellen das gesamte Klima mit einigen wenigen Gleichungen dar, die Faktoren wie Änderungen in den Treibhausgasen, vulkanische Aerosole und globale Temperaturen wiedergeben. Solche Modelle versuchen gar nicht, die Komplexitäten des Klimas zu beschreiben. Das ist ein Nachteil. Aber sie haben auch einen Vorteil: Anders als die GCMs verwenden sie explizit Temperaturdaten, um die Sensitivität des Klimasystems zu bewerten, somit reagieren sie auf aktuelle Klimabeobachtungen.

Die Einschätzungen des Weltklimarates zur Klimasensitivität fußen zum Teil auf GCMs. Weil diese das Verständnis der Wissenschaftler von der Funktionsweise des Klimas wiedergeben und sich dieses Verständnis nicht sehr geändert hat, haben sich auch die Modelle nicht verändert und geben die kürzlich beobachtete Pause im Temperaturanstieg nicht wieder. Im Gegensatz dazu basierte die norwegische Untersuchung auf einem Energiebilanzmodell. Das gleiche gilt für frühere einflussreiche Studien von Reto Knutti vom Institut für Atmosphäre und Klima in Zürich, von Piers Forster von der Universität Leeds, von Jonathan Gregory von der Universität Reading, von Natalia Andronova und Michael Schlesinger, beide von der Universität Illinois und von Magne Aldrin vom Norwegischen Rechenzentrum (die gleichzeitig auch Co-Autorin der neuen norwegischen Studie ist). Alle diese haben niedrigere Klimasensitivitätswerte gefunden. Forster und Gregory errechneten einen mittleren Schätzwert von 1,6°C für die Gleichgewichtssensitivität, mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit für einen Bereich von 1,0 bis 4,1°C. Dr. Aldrin und andere fanden eine 90-prozentige Wahrscheinlichkeit für einen Bereich von 1,2 bis 3,5°C.

Energiebilanzmodelle könnten augenscheinlich für besser gehalten werden: Passen sie nicht zu dem, was aktuell vor sich geht? Ja, aber das ist noch nicht die ganze Wahrheit. Myles Allen von der Oxford Universität betont, dass sich Energiebilanzmodelle besser dafür eignen, einfache und direkte Klimarückkopplungsmechanismen darzustellen, als indirekte und dynamische. Die meisten Treibhausgase gehen unkompliziert vor: Sie wärmen das Klima. Die direkten Auswirkungen von Vulkanen sind ebenso unkompliziert: Sie kühlen indem sie das Sonnenlicht reflektieren. Aber Vulkane verändern auch die Zirkulationsmuster in der Atmosphäre, welche in der Folge das Klima indirekt anwärmen und dabei die direkte Kühlung

teilweise aufheben können. Einfache Energiebilanzmodelle können diese indirekten Rückkopplungen nicht erfassen. Deshalb können sie vulkanische Kühlung überschätzen.

Dies bedeutet: Wenn es aus irgendeinem Grund Faktoren gibt, die zeitweise die Auswirkungen von Treibhausgasemissionen auf globale Temperaturen verdecken, dann kann es passieren, dass die einfachen Energiebilanzmodelle sie nicht aufgreifen. Sie werden zu stark auf vorübergehende Abschwächungen reagieren. Kurz gesagt, die verschiedenen Arten von Klimamodellen messen relativ unterschiedliche Dinge.

Wolken der Ungewissheit

Dies liefert auch einen Grund für die Aussage, es könne nicht allein an den Modellen liegen, dass das Klima weniger empfindsam gegenüber CO₂-Emissionen sei als früher angenommen. Es muss andere Erklärungen geben und es gibt sie tatsächlich: individuelle klimatische Einflüsse und Rückkopplungsschleifen, die den Klimawechsel verstärken (und manchmal abmildern).

Beginnen wir mit Aerosolen, wie denen von Sulfaten. Diese verhindern die Erwärmung der Atmosphäre durch Reflexion des Sonnenlichts. Einige heizen sie auch auf. Aber in der Bilanz kompensieren Aerosole den wärmenden Einfluss von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen. Die meisten Klimamodelle gehen davon aus, dass Aerosole die Atmosphäre um etwa 0,3 bis 0,5°C abkühlen. Wenn so die Auswirkungen der Aerosole unterbewertet wurden, könnte dies vielleicht das Fehlen der Erwärmung in der letzten Zeit erklären.

Allerdings tut es das nicht. Tatsächlich könnte es sogar eine Überbewertung sein. In den vergangenen Jahren sind die Messungen von Aerosolen gravierend besser geworden. Detaillierte Daten von Satelliten und Ballons legen nahe, dass ihr kühlender Effekt geringer ist (und ihr wärmender größer, wo das vorkommt). Die durchgesickerte Einschätzung des IPCC (die immer noch geprüft und überarbeitet wird) legte nahe, dass die geschätzte „Strahlungskraft“ der Aerosole – ihr wärmender oder kühlender Effekt – sich geändert hatte von minus 1,2 Watt pro Quadratmeter Erdoberfläche in der Einschätzung von 2007 hin zu 0,7 W/m² jetzt: das heißt, weniger abkühlend.

Eines der am weitesten verbreiteten und bedeutendsten Aerosole ist Ruß. Der erwärmt die Atmosphäre, weil Ruß Sonnenlicht absorbiert, wie schwarze Dinge es eben tun. Die detaillierteste Untersuchung zum Thema Ruß wurde im Januar veröffentlicht und wies ebenfalls mehr Netto-Erwärmung aus, als man zuvor angenommen hatte. Den Angaben zufolge hatte Ruß einen direkten Wärmeeffekt von etwa 1,1 W/m². Obwohl indirekte Effekte einiges hiervon aufheben, ist der Effekt immer noch größer als eine frühere Schätzung von 0,3 bis 0,6 W/m², die das Umweltprogramm der Vereinten Nationen angab.

All dies macht die jüngere Periode von annähernd gleichbleibenden Temperaturen umso rätselhafter. Wenn Aerosole die Erde nicht so sehr kühlen wie man gedacht hatte, dann sollte die globale Erwärmung mit Tempo voranschreiten. Aber das tut sie nicht. Irgendetwas muss sie zurückhalten. Ein Kandidat dafür ist eine geringere Klimasensitivität.

Eine damit verbundene Möglichkeit ist, dass die GCM-Klimamodelle möglicherweise die Auswirkungen von Wolken überbewerten (die ihrerseits von Aerosolen beeinflusst werden). In allen Modellen dieser Art verstärken Wolken die globale Erwärmung, manchmal sogar in sehr hohem Maße. Aber wie die durchgesickerte Einschätzung des IPCC schon verdeutlicht, „die Rückkopplung von den Wolken bleibt die unsicherste Strahlungsrückkopplung in den Klimamodellen“. Es ist sogar denkbar, dass einige Wolken die globale Erwärmung dämpfen, nicht verstärken – was auch helfen kann, die Pause in der Temperaturerhöhung zu erklären.

Wenn Wolken in dieser Beziehung weniger stark wirken, wäre die Klimasensitivität geringer. So könnte die Erklärung in der Luft liegen – aber andererseits auch wieder nicht. Vielleicht liegt sie in den Ozeanen. Aber auch hier sprechen die Fakten dagegen. Im letzten Jahrzehnt scheint die Temperaturen des Oberflächenwassers in den Ozeanen nicht mehr sukzessive anzusteigen sondern zu stagnieren (siehe Abb. 2), was darauf hindeutet, dass die Ozeane nicht mehr so viel Hitze aus der Atmosphäre aufnehmen.

Wie bei den Aerosolen, basiert diese Schlussfolgerung auf besseren Daten von neuen Messgeräten. Aber sie gilt nur für die oberen 700 Meter der Meere. Was unterhalb davon passiert, besonders in Tiefen von 2 km und darunter, ist unklar. Eine Studie von Kevin Trenberth vom Amerikanischen Nationalen Zentrum für Erforschung der Atmosphäre (National Centre for Atmospheric Research) und anderen, veröffentlicht in *Geophysical Research Letters*, besagt, dass 30 % der Meereseerwärmung im vergangenen Jahrzehnt im tiefen Ozean (unterhalb von 700 m) erfolgt sind. Der Untersuchung zufolge geht ein wesentlicher Teil der globalen Erwärmung in die Ozeane und die tiefen Ozeane heizen sich in noch nie dagewesener Weise auf. Wenn das so ist, dann würde dies auch zur Erklärung der Temperatur-Pause beitragen.

Doppel-A minus

Schließlich gibt es einige Anzeichen dafür, dass die natürliche (das heißt, nicht vom Menschen verursachte) Variabilität von Temperaturen um einiges größer sein könnte als der Weltklimarat angenommen hat. Eine kürzlich veröffentlichte Publikation von Ka-Kit Tung und Jiansong Zhou in der Zeitschrift *Proceedings of the National Academy of Sciences* verknüpft die Temperaturveränderungen seit 1750 mit den natürlichen Veränderungen (wie zum Beispiel Meerestemperaturen im Atlantik) und behauptet, dass „die anthropogenen (vom Menschen verursachten) Trends der globalen Erwärmung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts vielleicht um den Faktor 2 überschätzt worden sind“. Es ist somit möglich, dass sowohl der Temperaturanstieg in den 1990ern als auch das Gleichbleiben in den 2000ern zum Teil von der natürlichen Variabilität verursacht worden sind.

Abbildung 2



Also, worauf läuft all dies hinaus? Die Wissenschaftler sind vorsichtig bei der Interpretation ihrer Untersuchungsergebnisse. Dr. Knutti drückt sich wie folgt aus: „Die Grundübereinstimmung besteht darin, dass es mehrere belegte Datenreihen gibt, wo die beobachteten Trends nach unten drängen, während die Modelle nach oben weisen, deshalb hat meiner persönlichen Meinung nach die allumfassende Bewertung nicht viel verändert“.

Da die Pause in der Erwärmung und all die neuen Belege aber nun mal da sind, scheint eine kleine Reduzierung in den Einschätzungen der Klimasensitivität wohl gerechtfertigt: vielleicht ein Schupps nach unten auf verschiedene bestmögliche Schätzungen von 3°C auf 2,5°C, und eine niedrigere Obergrenze (um 4,5°C). Wären die Klimaforscher Agenturen zur Einschätzung der Kreditfähigkeit, stünde die Klimasensitivität unter kritischer Beobachtung. Aber sie würde wohl noch nicht herabgestuft.

Die Gleichgewichts-Klimasensitivität (equilibrium climate sensitivity) ist ein Maßstab in der Klimaforschung. Aber sie ist eine sehr spezielle Größe. Sie versucht zu beschreiben, was dem Klima passieren würde, nachdem alle Rückkopplungsmechanismen gegriffen hätten; insofern bedarf es einiger Jahrhunderte zur Einstellung eines Gleichgewichts – zu lange für die meisten Politiker. Gerard Roe von der Universität Washington behauptet: selbst wenn die Klimasensitivität so hoch wäre wie der IPCC annimmt, wären ihre Auswirkungen bei jedem plausiblen Diskontsatz minimal, weil sie sich über einen so langen Zeitraum hinziehen. Eine Sache ist es also, zu fragen, wie sich die Klimasensitivität ändert, eine ganz andere Frage wären die politischen Konsequenzen.



Ein dafür geeigneteres Maß ist daher die sogenannte ‚vorübergehende Antwort der Temperaturen auf den Antrieb durch CO₂‘ (transient climate response, TCR). Dies ist die Temperatur, die erreicht wird, nachdem sich CO₂ stufenweise über 70 Jahre hinweg verdoppelt hat. Anders als die Gleichgewichtsantwort kann die vorübergehende direkt beobachtet werden, und es gibt daher weniger Streitigkeiten um ihre Anwendung. Die meisten Schätzungen setzen die TCR bei ungefähr 1,5°C an, mit einem Schwankungsbereich von 1 bis 2°C.

Isaac Held von der amerikanischen Nationalen Behörde für Ozeane und Atmosphäre (National Oceanic and Atmospheric Administration) hat kürzlich seine „persönliche bestmögliche Schätzung“ für die TRC als 1,4°C angegeben, welche sich in den neuen Schätzungen für Aerosole und natürlicher Variabilität widerspiegelt.

Dies klingt beruhigend: der Wert der vorübergehenden Klimaantwort liegt unterhalb der Werte für die Gleichgewichts-Klimasensitivität. Aber die TCR erfasst nur einen Teil der Erwärmung, welche diese 70 Jahre mit allen ihren Emissionen hervorrufen würden, weil das Kohlendioxid weitaus länger in der Atmosphäre bleibt.



A K T U E L L

Über den Daumen gepeilt steigen die globalen Temperaturen um etwa 1,5°C an, entsprechend jeder Milliarde an Tonnen Kohlenstoff, der in die Atmosphäre ausgestoßen wird. Die Welt hat seit 1750 eine halbe Milliarde Tonnen Kohlenstoff hinausgeblasen und die Temperaturen sind um 0,8°C angestiegen. Nach jetziger Datenlage wird die nächste halbe Milliarde Tonnen bis 2045 ausgestoßen sein, die danach bis 2080.

Da sich das CO₂ in der Atmosphäre anreichert, könnte dies die Temperaturen vergleichbar mit dem vorindustriellen Niveau um rund 2°C ansteigen lassen, sogar mit einer niedrigeren Sensitivität und möglicherweise näher an 4°C (am oberen Ende der Schätzungen). Dennoch: Trotz all der Arbeit über Sensitivität weiß niemand wirklich, wie das Klima reagieren würde, wenn die Temperaturen um 4°C zunehmen würden. Kaum beruhigend.