

Klimawandel und CO₂: haben die “Skeptiker” recht?

Stefan Rahmstorf, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Urs Neu, ProClim, Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften

Zusammenfassung

Der Artikel diskutiert die Argumente von Skeptikern, die den menschlichen Einfluss auf das Klima für gering und harmlos halten. Anders als von den Skeptikern häufig behauptet, untermauern gerade die in den letzten Jahren stark gewachsenen Kenntnisse über natürliche Klimaveränderungen in der Erdgeschichte die Erkenntnis, dass der menschliche Einfluss auf das Klima inzwischen sehr wahrscheinlich dominant ist. Er übersteigt mittlerweile die Wirkung natürlicher Faktoren wie Schwankungen der Sonnenaktivität deutlich. Ohne Klimaschutzmaßnahmen würde der weitere Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre im 21. Jahrhundert zu einem weiteren Temperaturanstieg von (je nach angenommenen Szenarien) 1.4-5.8 °C führen, mit wahrscheinlich gravierenden Folgen für natürliche Ökosysteme und menschliche Gesellschaft.

1. Einleitung

Im Jahr 1896 rechnete der schwedische Nobelpreisträger Svante Arrhenius erstmals vor, dass eine Verdoppelung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung um 4-6 °C führen würde [1,2]. Ein Zusammenhang der beobachteten Klimaerwärmung mit dem Anstieg des CO₂ durch die Industrialisierung wurde in den 30er Jahren in der Fachliteratur diskutiert [3], war seinerzeit mangels Daten jedoch nicht eindeutig zu belegen. Erst seit den 50er Jahren wird die Gefahr einer anthropogenen (also vom Menschen verursachten) Erwärmung weithin ernstgenommen [4]. Im Rahmen des internationalen geophysikalischen Jahres (IGY) 1957/58 gelang der Nachweis, dass die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre tatsächlich ansteigt [5]. Die ersten Simulationsrechnungen mit einem Atmosphärenmodell in den 60er Jahren ergaben einen Temperaturanstieg von 2 °C für eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration [6]. In den 70er Jahren warnte mit der National Academy of Sciences der USA erstmals eine Wissenschaftsorganisation vor der globalen Erwärmung; die Wirkung einer CO₂-Verdoppelung wurde auf 1.5-4.5 °C abgeschätzt [7]. Diese Unsicherheitsspanne gilt unverändert bis heute; sie konnte erhärtet, aber leider bislang nicht wesentlich verkleinert werden. Im Jahr 1990 erschien der erste Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), der zweite und dritte Bericht folgten 1995 und 2001. In diesem Zeitraum haben sich die wissenschaftlichen Erkenntnisse derart erhärtet, dass inzwischen fast alle Klimatologen eine spürbare anthropogene Klimaerwärmung für erwiesen oder zumindest hoch wahrscheinlich halten. Eine knappe und gut lesbare Geschichte des Treibhausproblems bietet das Buch des Wissenschaftshistorikers Spencer Weart [8].

Von Anfang an wurde die öffentliche Diskussion auch von Skeptikern begleitet, die unterschiedliche Aspekte der vorherrschenden wissenschaftlichen Einschätzung anzweifeln [9]. Skepsis ist wichtig und ein essenzieller Teil der Wissenschaft, und auch wenn heute die Skeptiker sich vor allem in den Medien und kaum mehr auf wissenschaftlichen Fachkongressen oder in der Fachliteratur zu Wort melden, verdienen ihre Argumente dennoch eine

sachliche Auseinandersetzung. Im Folgenden kommentieren wir die beiden vorstehenden Beiträge von Berner und Hollerbach [10] und von Michaels et al. [11] zur VDI-Tagung.

2. Wurden Erkenntnisse aus der Klimageschichte hinreichend berücksichtigt?

Im ersten Teil ihres Artikels argumentieren Berner und Hollerbach, dass von „Beratungsgremien“ die wissenschaftlichen Kenntnisse über die natürlichen Klimaschwankungen der Vergangenheit (die Paläoklimatologie) nicht ausreichend berücksichtigt wurden. Es werde der Eindruck vermittelt, „dass sich das Klima in der Vergangenheit nicht oder nur wenig geändert hat“. Dem entgegen steht die Tatsache, dass die von Berner und Hollerbach erwähnten Klimaschwankungen in der Vergangenheit alle auch im Bericht des IPCC [12], dem weitaus wichtigsten Beratungsgremium, beschrieben und diskutiert sind (Kapitel 1.2 in Band 1 "The Scientific Basis").

Noch wichtiger ist die Tatsache, dass die international führenden Paläoklimatologen als Autoren am IPCC-Bericht mitgewirkt haben – man kann dort und in der internationalen Fachliteratur zur Paläoklimatologie aus erster Hand nachlesen, welche Folgerungen z.B. jene Forscher ziehen, die Eisbohrkerne in Grönland und der Antarktis gebohrt und untersucht haben [13]. So wurde aus den qualitativ hervorragenden Daten von der Station Vostok in der Antarktis über die Temperaturentwicklung und den CO₂-Gehalt der Atmosphäre (Abb. 1) die Wirkung des CO₂ auf das Klima abgeschätzt [14]. Dabei wurde berücksichtigt, dass CO₂ weder der einzige Einflussfaktor noch die primäre Ursache der Eiszeiten ist (als Auslösefaktor für die Eiszeitzyklen gelten die Schwankungen der Erdbahn um die Sonne). Aus diesen Daten der Klimageschichte ergibt sich eine globale Erwärmung von 3-4 °C im Falle einer Verdoppelung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre. Dieser Wert liegt innerhalb der vom IPCC angegebenen Unsicherheitspanne von 1.5-4.5 °C für eine CO₂-Verdoppelung.

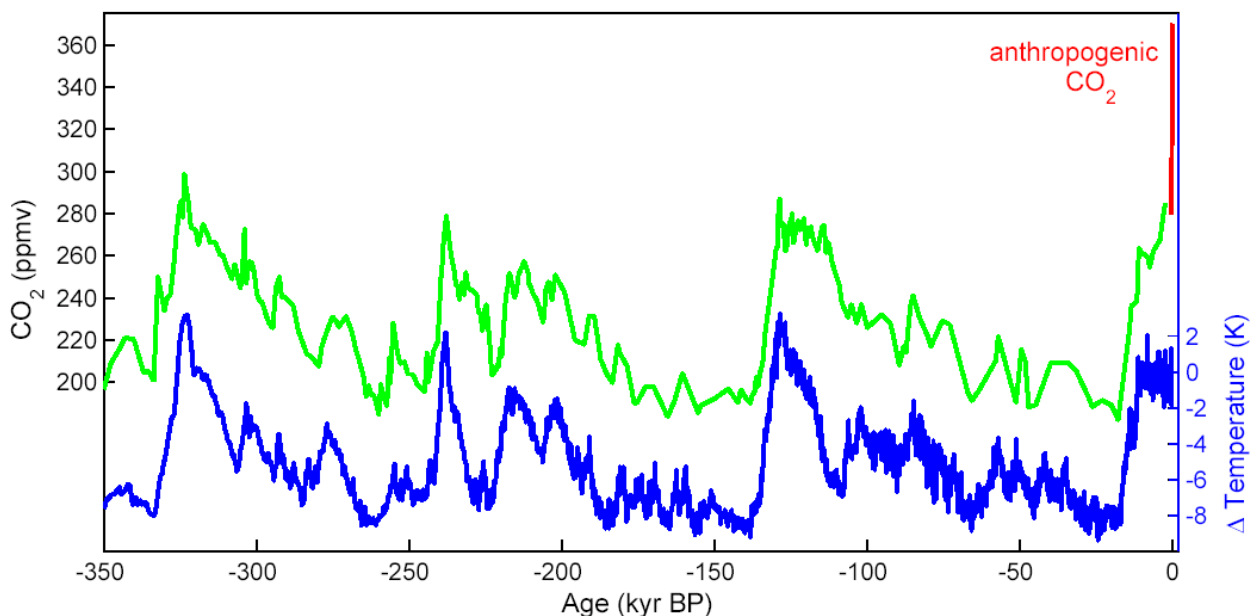


Abbildung 1. Entwicklung von Temperatur (blau) und CO₂-Gehalt der Atmosphäre (grün) während der letzten 350,000 Jahre aus dem Eiskern der Station Vostok in der Antarktis [15] (reproduziert aus [16]). In rot ist der anthropogene Anstieg des CO₂ gezeigt.

Berner und Hollerbach erwecken den Eindruck, Geowissenschaftler würden die Einschätzung des IPCC nicht teilen, oder der „sich wandelnde Kenntnisstand“ in der Klimaforschung würde diese in Frage stellen. Erst im Dezember 2003 hat jedoch die weltweit größte Berufsorganisation der Geowissenschaftler, die American Geophysical Union (AGU), in ihrer aktualisierten, offiziellen Stellungnahme zum Klimaproblem festgestellt: „Menschliche Aktivitäten verändern in zunehmendem Maße das Klima der Erde. Diese Effekte kommen zu den natürlichen Einflüssen, die sich im Verlauf der Erdgeschichte manifestiert haben, hinzu. Wissenschaftliche Indizien weisen nachdrücklich darauf hin, dass die natürlichen Einflüsse den schnellen Anstieg der globalen Erdoberflächentemperatur in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nicht erklären können [17].“

Auch aus der eigenen Erfahrung gemeinsamer Arbeit und vieler Gespräche mit internationalen Paläoklimatologen [18] können wir nur bestätigen, dass praktisch alle davon ausgehen, dass die derzeit ablaufende globale Erwärmung überwiegend vom Menschen verursacht wurde. Einer der Leiter der GISP-2 Eisbohrung, Richard Alley, hat die Arbeiten auf dem grönländischen Eisschild und deren Resultate in einem spannenden Buch geschildert [19]. Alley schreibt dort: „Eisbohrkerne und andere paläoklimatische Archive [...] deuten darauf hin, dass die steigende Kohlendioxidkonzentration eine erhebliche Erwärmung verursachen wird. [...] Wir wissen, dass eine große, abrupte Klimaänderung passieren könnte, und dass menschliche Aktivitäten große, abrupte Veränderungen wahrscheinlicher machen können“ [20].

3. Ist der derzeitige Klimawandel ungewöhnlich?

Bei einem Vergleich der derzeitigen globalen Erwärmung mit früheren natürlichen Klimaänderungen müssen zwei wichtige Unterscheidungen gemacht werden. Erstens müssen globale von regionalen oder lokalen Klimaänderungen unterschieden werden: lokale Schwankungen sind in der Regel viel größer und können etwa durch Änderungen in der atmosphärischen oder ozeanischen Zirkulation verursacht werden, also durch eine reine geographische Umverteilung von Wärme, die auf die globale Mitteltemperatur kaum Einfluss hat. Zweitens müssen jeweils die Zeitskalen berücksichtigt werden: Klimaänderungen über Jahrtausende oder über viele Jahrtausende können erheblich größer sein und auch andere Ursachen haben (z.B. die Drift der Kontinente oder die bereits erwähnten Erdbahnzyklen) als diejenigen über Jahrzehnte und Jahrhunderte. Für die Auswirkungen auf Ökosysteme und Gesellschaft kommt es zudem nicht nur auf den Betrag, sondern auch sehr auf die Geschwindigkeit der Veränderung an, da eine langsamere Klimaänderung eine Anpassung wesentlich erleichtert.

Daten über die Klimageschichte sind in der Regel lokal: sie geben die Temperatur an einem Punkt wieder, etwa in Grönland (wie in Abb. 2 von Berner und Hollerbach). An einzelnen Orten sind die natürlichen Klimaschwankungen derzeit oft noch größer als der durch den Treibhauseffekt zu erwartende globale Erwärmungstrend. So gibt es auch Regionen, die sich derzeit entgegen dem allgemeinen Trend abkühlen, etwa um die Labradorsee herum. Wissenschaftlich aussagekräftig ist deshalb nicht der Blick auf einzelne Stationen, sondern nur eine großräumige Gesamtschau über alle Daten, z.B. die Mitteltemperatur über der Nordhalbkugel [21].

Es gibt eine Reihe von Rekonstruktionen der Klimaentwicklung der Nordhalbkugel über die letzten tausend Jahre. Diese unterscheiden sich in wichtigen Details, über die es eine leb-

hafte und fruchtbare wissenschaftliche Diskussion gibt. In wesentlichen Punkten ergeben alle diese Rekonstruktionen jedoch ein konsistentes Bild (Abb. 2) [22]. Wie von Berner und Hollerbach berichtet, herrschten im Mittelalter relativ warme Temperaturen. Ein allmählicher Abkühlungstrend führte zu einer Kältephase bis ins 17. und 18. Jahrhundert, während seit Mitte des 19. Jahrhunderts ein starker Anstieg der Temperaturen zu verzeichnen ist. Dieser Trendentwicklung überlagert sind kürzere Schwankungen um einige Zehntel Grad, die in manchen Rekonstruktionen (z.B. [23]) gut mit Schwankungen der Sonnenaktivität korrelieren, und die auch in Modellrechnungen mit solaren Schwankungen erklärt werden können [24]. Allen Rekonstruktionen gemeinsam ist die Tatsache, dass die Temperaturen großräumig spätestens in der Mitte des 20. Jahrhunderts jene des Mittelalters übersteigen. Es herrschen derzeit also die wärmsten Temperaturen zumindest der abgelaufenen tausend Jahre.

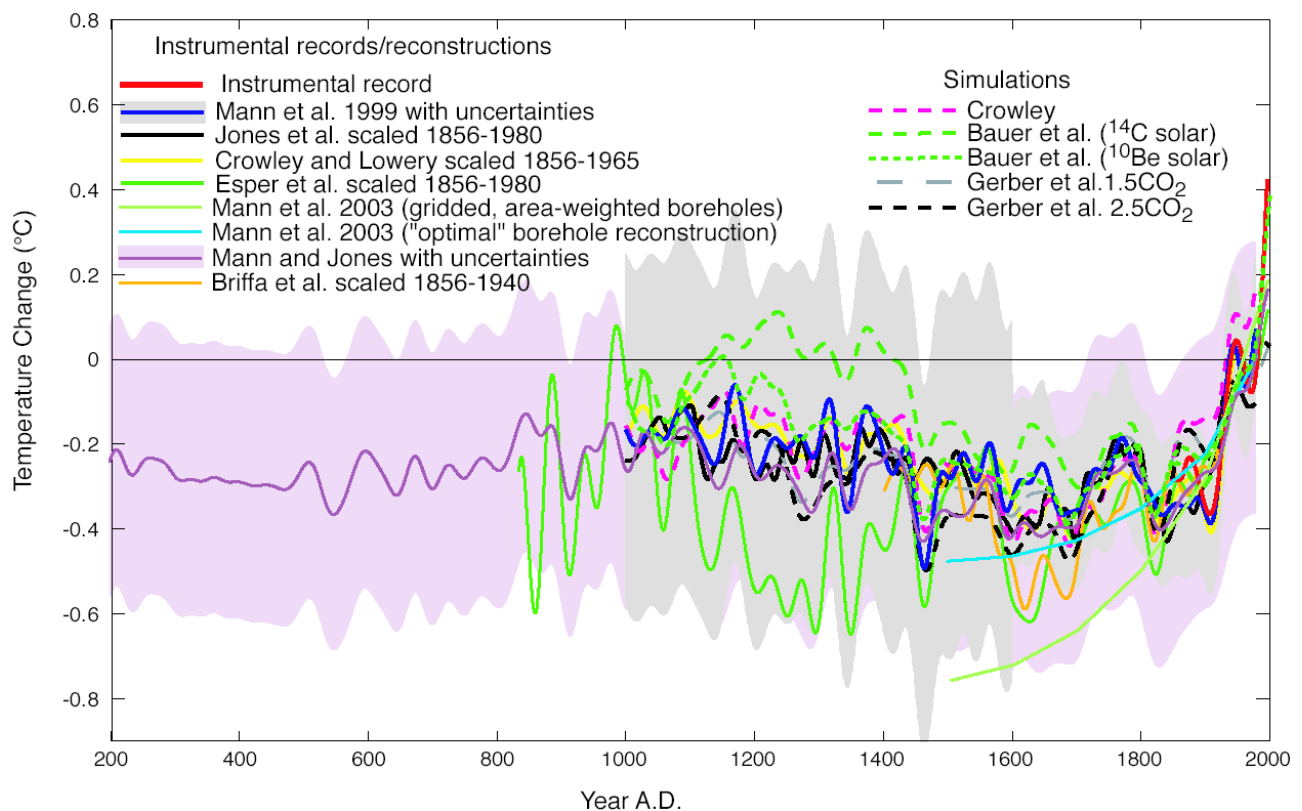


Abbildung 2. Verschiedene Rekonstruktionen des Temperaturverlaufs der Nordhalbkugel über die abgelaufenen 1800 Jahre. Abbildung leicht aktualisiert aus [22]; dort finden sich genauere Erläuterungen und Quellen der einzelnen Kurven.

Betrachten wir längere Zeiträume, so sind die größten globalen Klimaänderungen der letzten Jahrhunderttausende zweifellos die Eiszeiten, auf deren Höhepunkt die globale Mitteltemperatur ca. 4-6 °C unter dem heutigen Niveau lag. Im Vergleich dazu ist die bisherige globale Erwärmung um 0.6 ± 0.2 °C im 20. Jahrhundert natürlich noch gering [12]. Die Erwärmung gegen Ende dieser Eiszeiten hat allerdings jeweils insgesamt mehrere Jahrtausende gedauert. Nehmen wir einen typischen Wert von 5 °C Erwärmung über 5000 Jahre, so ergibt sich eine Erwärmungsrate von 0.1 °C pro Jahrhundert. Lokal waren dem zwar erheblich raschere Klimaschwankungen überlagert, z.B. in Grönland (siehe Abb. 1b

von Berner und Hollerbach [25]), wo Änderungen der Meeresströme eine wichtige Rolle spielen [26]. Einige dieser Schwankungen wurden zu ähnlichen Zeiten in verschiedenen Regionen der Erde beobachtet, allerdings teilweise mit geringerer Amplitude oder umgekehrten Vorzeichen. Globale Erwärmungsraten in der letzten Eiszeit, die in die Nähe der heutigen Werte kommen, sind daher nicht belegt und eher unwahrscheinlich, aber aufgrund der heute bekannten Daten auch nicht völlig ausgeschlossen. Für die derzeitige Warmzeit (das Holozän) ist die Geschwindigkeit des gegenwärtigen globalen Temperaturanstiegs hingegen sehr außergewöhnlich. Die Bezeichnung der anthropogenen Erwärmung als „sehr moderat und nicht ungewöhnlich“ lässt sich daher aus der Klimageschichte nicht begründen.

4. Die Ursachen des Klimawandels

Das Klima wird von verschiedenen äußeren Faktoren beeinflusst (Erdbahnzyklen, Sonnenaktivität, Vulkanausbrüche, Aerosole, Treibhausgase) und unterliegt zudem internen Schwankungen. Die globale Oberflächentemperatur wird durch die Überlagerung aller dieser Einflüsse bestimmt und nicht durch einen einzelnen Faktor. Die äußeren Faktoren beeinflussen jedoch das Klima auf unterschiedlichen Zeitskalen, je nach ihrer Änderungsgeschwindigkeit. So sind z.B. die Erdbahnparameter in Zeiträumen von Zehntausenden bis Hunderttausenden von Jahren entscheidend (Auslösung der Eiszeiten), während Vulkanausbrüche nur über wenige Jahre eine Wirkung haben. Je nach Zeitskala, die betrachtet wird, kann die Korrelation der Temperatur mit einem bestimmten Faktor sehr unterschiedlich ausfallen. So wird man auf der Zeitskala von zehntausend Jahren vergeblich nach dem Temperatursignal eines Vulkanausbruchs suchen, während sich dieser bei der Untersuchung von Jahresreihen deutlich bemerkbar macht. Verändert sich etwa in einem Zeitraum die Sonnenaktivität und es fehlen Vulkanausbrüche, so wird die Korrelation der Temperatur mit der Sonnenaktivität hoch sein. In einem Jahrzehnt mit einem großen Vulkanausbruch wird die Korrelation mit der Sonnenaktivität hingegen viel kleiner sein, obwohl sich die Stärke des Sonneneinflusses überhaupt nicht geändert hat. Nur wird dieser von einem zusätzlichen, stärkeren Einfluss überlagert.

Die Fragestellung von Berner und Hollerbach ("Es gilt daher zu untersuchen, ob Klimawandel in der Vergangenheit auch Konzentrationsänderungen des Kohlendioxids zuzuschreiben sind") und ihre Folgerung ("Rekonstruktionen des Klimas vergangener Zeiten belegen allerdings, dass die Temperaturentwicklung und die Änderung der atmosphärische Kohlendioxidgehalte nicht immer gleichsinnig verlaufen sind") macht deshalb wissenschaftlich keinen Sinn. In einem System mit sich gegenseitig überlagernden Einflüssen ist eine durchgehende hohe Korrelation über alle Zeitskalen mit Sicherheit nicht zu erwarten.

Es ist unumstritten, dass die Schwankungen der Temperatur in den letzten tausend Jahren (etwa in Grönland um einige Zehntel Grad, Abb. 2 in Berner und Hollerbach) nicht allein durch Veränderungen der CO₂-Konzentration, sondern auch durch andere Faktoren verursacht worden sind. In dem Bild ist zu sehen, dass sich die CO₂-Konzentration bis vor rund 150 Jahren praktisch nicht verändert hat. Sie kann deshalb die Temperatur gar nicht beeinflusst haben. Dieser Zeitraum kann also unmöglich für die Untersuchung des Einflusses von CO₂ dienen. Im Zeitraum nach 1850, wo das CO₂ zu steigen beginnt, weist auch die Temperatur einen steigenden Trend auf.

Wie oben erwähnt eignen sich für die Untersuchung des CO₂-Effekts z.B. die Eiszeitzyklen, bei denen Schwankungen in der CO₂-Konzentration eine wichtige verstärkende Rolle gespielt haben. Solche Untersuchungen [14, 27] stützen die Folgerungen des IPCC.

5. Die CO₂-Emissionen sind ein neuer, zusätzlicher Einflussfaktor

Die CO₂-Konzentration hat sich in der Vergangenheit primär aufgrund von Rückkopplungsprozessen bei Schwankungen anderer Parameter verändert und so beispielsweise Temperaturschwankungen verstärkt. Steigt die Temperatur, so wird aufgrund physikalischer und biologischer Prozesse mehr CO₂ freigesetzt, wodurch wiederum die Temperatur erhöht wird. So nimmt man heute an, dass die Temperaturschwankungen zwischen Eis- und Warmzeiten, ausgelöst durch Schwankungen der Erdbahnparameter, durch diese Rückkopplung verstärkt worden sind. Veränderungen der CO₂-Konzentration kamen in der Vergangenheit vor allem aufgrund von Wechselwirkungen mit dem Klima zustande. Eine rasche "Einspeisung" großer Mengen von CO₂ in die Atmosphäre hat jedoch vor der Industrialisierung nie stattgefunden. Die mögliche Wirkung eines solchen Vorgangs kann also in der Vergangenheit gar nicht beobachtet werden. Es ist völlig klar, dass alle Schwankungen in der Vergangenheit mit natürlichen Einflussfaktoren erklärt werden können, weil es damals einen entsprechenden anthropogenen Einfluss gar nicht gab. Es stellt sich also die Frage, ob die derzeitige Erwärmung mit natürlichen Einflüssen erklärt werden kann. Alle bekannten natürlichen Faktoren, die auf der untersuchten Zeitskala (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) eine Rolle spielen, zeigen in den letzten 50 Jahren keinen signifikanten Trend (Sonnenaktivität, kosmische Strahlung, Vulkanismus). Die Erwärmung kann spätestens seit den 70er Jahren weder mit statistischen noch mit physikalischen Modellen ohne Berücksichtigung der erhöhten CO₂-Konzentration erklärt werden [12, 28].

Auch das Bundesforschungsministerium hat jüngst in einer Arbeitsgruppe ein Papier erarbeitet, das insbesondere Bereiche von Konsens, Dissens und offene Fragen hervorheben sollte [29]. Zum Konsens, den auch Berner mit unterschrieben hat, gehört, dass "die Erwärmung in den letzten drei Dekaden wesentlich durch die Zunahme der anthropogenen Treibhausgase [...] verursacht worden ist".

Die von Berner und Hollerbach angeführten gegenteiligen Aussagen entsprechen nicht dem aktuellen Wissensstand. Sie behaupten, die Sonnenaktivität habe ab Mitte des 19. Jahrhunderts deutlich zugenommen und sei am Ende des 20. Jahrhunderts am stärksten gewesen. Tatsächlich hat die Sonnenaktivität bis ca. 1940 zugenommen und ist seit 1940 wahrscheinlich so hoch wie nie in den letzten 1000 Jahren [30]. Sie ist jedoch seit 1940 etwa konstant geblieben und war nicht am Ende des 20. Jahrhunderts am stärksten.

Das von Berner und Hollerbach präsentierte Modell ECHO-G (ihre Abb. 4 und 5) repräsentiert nicht nur den Einfluss der natürlichen Faktoren sondern rechnet die Wirkung der Erhöhung der CO₂-Konzentration mit ein [31]; nur so kann der beobachtete Temperaturverlauf annähernd richtig wiedergegeben werden. Das Zitat "...der solare Antrieb trägt zu einem erheblichen Maße zu den nordhemisphärischen [Temperatur-] Variationen dieses Zeitraums [1948 – 1990] bei" ist insofern irreführend, als die Autoren der Studie diese Aussage nur auf die kurzfristigen Schwankungen innerhalb weniger Jahre beziehen, nicht jedoch auf den längerfristigen Trend. Berner und Hollerbach erwähnen nicht, dass der solare Antrieb in diesem Modell höchstens ein Drittel des Erwärmungstrends im 20. Jahrhundert erklären kann [31], in Übereinstimmung mit anderen Studien [24, 32]. Die realitätsnahe Wiedergabe der kurzfristigen solaren Klimaschwankungen spricht dafür, dass auch

der längerfristige Trend im ECHO-G Modell nicht ganz falsch eingeschätzt wird. Für die Zukunft ergibt das zitierte Modell eine Erwärmung von über 3 °C bis 2090 (bei Annahme des IPCC-Szenarios a2) [33].

Eine ähnliche Verwechslung zwischen kurzfristigen Schwankungen und Trend unterläuft Berner und Hollerbach in ihrer Bildunterschrift 6 mit der Aussage „Die bisher gemessenen Temperaturen liegen weitestgehend unterhalb der Szenariotemperaturen“. Diese Aussage ist suggestiv für Laien, wissenschaftlich aber sinnlos, denn der Nullpunkt der beiden Kurven ist willkürlich gewählt – wäre statt 1990 etwa 1991 oder 1992 als Basisjahr gewählt worden, lägen die gemessenen Temperaturen weitgehend oberhalb der Szenarien. Sinnvoll ist lediglich die Frage, ob der Trend in der beobachteten Temperatur ebenso steil nach oben weist wie in den Szenarien. Ein aussagekräftiger Trend lässt sich aber mit einem so kurzen Teilstück gar nicht bestimmen, dazu muss ein längerer Zeitraum herangezogen werden. Über die vergangenen 25 Jahre betrug der Trend 0.17 °C pro Jahrzehnt, in guter Übereinstimmung mit den gezeigten Szenarien.

6. Klimaschwankungen können einschneidende Folgen haben

Von keiner Seite wird behauptet, das Klima habe sich in der Vergangenheit nicht geändert, wie dies von Berner und Hollerbach dargestellt wird (siehe oben). Wenn im IPCC von einer außergewöhnlichen Erwärmung in den letzten Jahrzehnten gesprochen wird, so bezieht sich dies auf einen Vergleich mit den letzten 1000 Jahren, allenfalls mit der letzten Warmzeit. Es macht wenig Sinn, die derzeitige Erwärmung aufgrund des menschlichen Einflusses den möglichen natürlichen Schwankungen oder dem Klima in ferner Vergangenheit gegenüberzustellen. Der „natürliche“ Schwankungsbereich einer planetaren Atmosphäre reicht theoretisch bis zu den absolut lebensfeindlichen Bedingungen beispielsweise auf der Venus. Die aufgrund der von Menschen verursachten Emissionen mögliche Erwärmung von 1.4 bis 5.8 °C bis 2100 könnte eine ähnliche Größenordnung erreichen wie der Unterschied zwischen Eiszeit und Warmzeit. Eine solche Veränderung in relativ kurzer Zeit kann viele gesellschaftliche und ökologische Systeme auf der Erde vor unlösbare Anpassungsprobleme stellen. Dies stellen auch Berner und Hollerbach fest ("Die Klimaschwünge im Holozän waren nicht so dramatisch wie in der vorausgehenden Kaltzeit, der Weichsel-Kaltzeit, dennoch waren sie markant genug, um in historischen Zeiten die soziale und ökonomische Entwicklung der menschlichen Kulturen zu beeinflussen").

Klimaänderungen zwingen Mensch und Natur, sich immer wieder anzupassen. Während der Eiszeit mussten bei starken Abkühlungen ganze Völkerstämme in noch bewohnbare Gebiete auswandern, einige gingen zu Grunde. Die Wälder Nordeuropas wurden ausgelöscht, in Deutschland herrschte polare Steppe. Auch den Zusammenbruch verschiedener Hochkulturen im Holozän, wie in Mesopotamien oder Mittelamerika (Maya), bringen die Historiker mit Klimaänderungen in Verbindung. Auf der dicht besiedelten Erde sind große Wanderungsbewegungen, wie sie früher nötig waren, heute praktisch nicht mehr möglich. Größere Klimaänderungen würden heute zu unabsehbaren ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Problemen führen. Längerfristige Verschiebungen der Niederschlagszonen, wie sie in den letzten zehntausend Jahren mehrfach vorgekommen sind, hätten gravierende Auswirkungen. Verschärft sich die Trockenheit in Regionen mit Wasserknappheit, so könnte die Bevölkerung ganzer Länder dezimiert werden. Wahrscheinlich würden die Lebensbedingungen in einigen Gebieten auch verbessert. Bei der hohen Geschwindigkeit des erwarteten Klimawandels stellt sich aber die Frage, ob für Mensch und Natur genug Zeit bleibt, sich an die neuen Bedingungen anzupassen.

Die Tatsache, dass es Klimaveränderungen auch natürlicherweise geben kann ist kein Grund, eine solche leichtfertig in Kauf zu nehmen bzw. durch uns Menschen auszulösen. Auch andere Schadensereignisse wie z.B. künstlich ausgelöste Lawinen, Felsstürze etc. sind nicht deshalb harmlos, nur weil sie auch natürlicherweise vorkommen.

7. Klimaerwärmung in der Zukunft

Im IPCC-Bericht wird aufgrund der Resultate von verschiedenen Modellen und verschiedenen Szenarien für die Entwicklung der Emissionen eine Bandbreite der Zunahme der globalen Bodenoberflächentemperatur von 1.4-5.8 °C angegeben [12]. Dabei werden sowohl unterschiedliche Entwicklungen der globalen Emissionen (je nach Wirtschaftswachstum, technischen Innovationen, politischen Veränderungen, usw.) als auch unterschiedliche Modellansätze verwendet.

In der Analyse von Michaels et al. werden theoretische Überlegungen und Modellrechnungen gemacht, deren Ergebnis eine Erwärmung im untersten Bereich der IPCC-Bandbreite ist. Dabei wählen die Autoren bei ihrer Argumentation meist diejenige Möglichkeit, die zu einer niedrigen Erwärmungsrate führt. Auch bei der Präsentation neuerer Forschungsergebnisse treffen sie eine ähnlich selektive Wahl. Überlegungen, die eine gegenteilige Folge hätten, werden weggelassen.

Michaels et al. gehen beispielsweise davon aus, dass sich die Temperatur linear zur hauptsächlich auf den anthropogenen Treibhauseffekt zurückzuführenden Erwärmung seit 1976 weiterentwickelt. Gegen diese Überlegung spricht, dass die Wirkung des anthropogenen Treibhauseffekts zur Zeit durch die in der Summe abkühlende Wirkung der Aerosol-emissionen (Sulfate) gedämpft wird. Michaels et al. postulieren zwar, dass diese Dämpfung schwächer ist als angenommen, dies beruht jedoch auf einer bisher noch nicht bestätigten Einzelarbeit [34]; andere Wissenschaftler gehen vom Gegenteil aus [35]. Während sich die CO₂-Emissionen (und auch Methan) in der Atmosphäre über längere Zeit ansammeln, beträgt die Lebensdauer der Aerosole lediglich einige Tage oder Wochen. Die CO₂-Konzentration wird also auch bei stagnierenden Emissionen weiter zunehmen, während die Aerosolkonzentration gleich bleibt. Die Differenz zwischen erwärmender Wirkung der Treibhausgase und der abkühlenden Wirkung der Aerosole wird sich noch deutlich vergrößern und damit voraussichtlich zu einer stärkeren Erwärmung führen.

Michaels et al. zitieren die Resultate der Klimastudien nicht korrekt. Sie behaupten z.B., die CMIP2-Studien würden eine viel zu hohe CO₂-Wachstumsrate (1% pro Jahr) annehmen und vergleichen diese mit der tatsächlichen Wachstumsrate der CO₂-Konzentration von 0.4%. Sie haben jedoch nicht beachtet, dass diese 1% das Wachstum *aller anthropogenen Treibhausgase* (CO₂-Äquivalent) betrifft, nicht nur von CO₂ (vgl. [12], Band 1, Kapitel 9.3.1.1). Das CO₂-Wachstum in CMIP2 entspricht also nur etwa 0.6% pro Jahr, was im Bereich der IPCC-Emissionsszenarien liegt. Weiter behaupten sie, der Temperaturanstieg in CMIP2 läge unter dem vom IPCC angegebenen Bereich. Sie beachten jedoch nicht, dass der Temperaturanstieg in CMIP2 nur über 80 Jahre berechnet wurde und nicht über 110 wie in den IPCC-Szenarien (1990 bis 2100). Wird dies berücksichtigt, so liegt in beiden Fällen die mittlere Erwärmung bei ca. 3 °C über 110 Jahre.

Es besteht also weder ein Widerspruch zwischen CMIP2 und IPCC, noch ist die angenommene Wachstumsrate des CO₂ weit vom aktuell beobachteten Wachstum entfernt.

Aufgrund der höchstwahrscheinlich weiter zunehmenden CO₂-Emissionen kann nicht von einem linearen Wachstum der CO₂-Konzentration ausgegangen werden, wie es Michaels et al. tun, sondern es ist ein möglicher stärkerer Anstieg in den Szenarien zu berücksichtigen. Die Zunahme der CO₂-Konzentration ist allerdings aufgrund des noch ungeklärten Verhaltens der natürlichen CO₂-Senken und Quellen noch unsicher. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die Aufnahme des anthropogenen CO₂ in Biosphäre und Ozean in Zukunft deutlich abnehmen könnte [36]. Dies zeigt, dass die CO₂-Konzentration sogar bei konstanten Emissionen künftig schneller steigen könnte.

Bei Michaels' „logischem Paradigma“ handelt es sich lediglich um eine einseitige Risikoabschätzung, die nur die optimistischen Annahmen berücksichtigt. Ernsthaftige Argumente, um an den Abschätzungen des IPCC etwas zu ändern, liefert dieses Vorgehen nicht. Auch die von Michaels favorisierte „gemäßigte“ Erwärmung von 1.5-2 °C in diesem Jahrhundert würde das Klima weit über die natürlichen Schwankungen des abgelaufenen Jahrtausends hinaus aufheizen, wie ein Vergleich mit Abb. 2 zeigt.

8. Lässt sich die Erwärmung noch aufhalten?

Berner und Hollerbach schreiben, der Mensch könne an der Erwärmung gar nichts ändern, „dies zeigen Modellrechnungen sehr deutlich“. Als Beleg zeigen sie in ihrer Abb. 6 jedoch lediglich solche Szenarien, in denen nur die erste Stufe des Kyoto-Protokolls umgesetzt bzw. lediglich die Industrienationen (Annex B Staaten) eine Klimaschutzpolitik betreiben. Dass dies zu einer Stabilisierung der CO₂-Konzentration nicht ausreicht, ist allgemein bekannt. Das Kyoto-Protokoll ist deshalb von vornherein mehrstufig angelegt [37]. Die internationalen Diskussionen über die Maßnahmen der zweiten Stufe und über das Einbeziehen der Schwellen- und Entwicklungsländer laufen bereits.

Aus naturwissenschaftlicher Sicht steht einer Stabilisierung der CO₂-Konzentration nichts entgegen – würden die Emissionen morgen um ca. 60% reduziert, so würde die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nicht weiter ansteigen. Wenn der Anstieg der Treibhausgaskonzentration gestoppt ist, wird dadurch auch der globale Temperaturanstieg weitgehend gestoppt, bis auf einen Nachlauf um einige Zehntel Grad aufgrund der thermischen Trägheit der Ozeane. Die Frage der Machbarkeit von Klimaschutz ist also keine naturwissenschaftliche Frage, und sie kann nicht anhand von Klimamodellrechnungen wie in Berner und Hollerbachs Abb. 6 diskutiert werden. Es handelt sich vielmehr um eine politische und ökonomische Frage.

Als Klimatologen wollen wir diese Frage hier nicht eingehend diskutieren. Wir weisen jedoch darauf hin, dass die seriöse internationale Diskussion zur Klimapolitik sich um die Frage dreht, auf welchem Niveau die Konzentration von CO₂ (und anderen Gasen) stabilisiert werden sollte [38], mit welchem Energiemix und zu welchen Kosten dies zu erreichen ist, und wie sich die Emissionsrechte auf Länder und Wirtschaftssektoren verteilen sollen. Ein Beispiel sind die Szenarien, die kürzlich vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) vorgestellt worden sind [39,40]. Die Studie analysiert Szenarien, in denen die CO₂-Konzentration der Atmosphäre bei 400 bzw. 450 ppm stabilisiert wird. Die erhöhten Energiesystemkosten, um dieses Ziel zu erreichen, betragen im Mittel über das 21. Jahrhundert ca. 0.7% des weltweiten Brutto-Inlandsprodukts. Dem gegenüber stehen die vermiedenen Kosten durch Klimaschäden. Der Beirat folgert: „Die Kosten der CO₂-Stabilisierung scheinen langfristig unter den Anpassungs- und Schadenskosten zu liegen.“ Auch wenn solche Kostenabschätzungen sehr unsicher sind,

stellt wahrscheinlich selbst bei rein ökonomischer Betrachtung ein konsequenter Klimaschutz die günstigste Option dar.

9. Folgerungen

Die Artikel von Berner und Hollerbach sowie Michaels et al. bieten keine neuen oder ernsthaften Argumente, um die Einschätzung des aktuellen Klimawandels zu überdenken. Ihre Argumente können allenfalls bei Laien, die nicht mit der klimatologischen Fachliteratur vertraut sind, Verwirrung stiften [41]. Beide Artikel stützen sich in ihrer Argumentation auf die Arbeiten anderer Wissenschaftler, ohne jedoch ihre Interpretationen mit diesen diskutiert zu haben. So stützen sie sich auf das Team, das den GISP-2 Eiskern in Grönland gebohrt und analysiert hat, auf die Teilnehmer des CMIP-Projekts, auf die Solarrekonstruktion von Lean, oder auf die Modellrechnungen von Crowley oder von Zorita und Kollegen. Wie geschildert kommt es dabei leider zu einer selektiven, irreführenden oder falschen Darstellung der Ergebnisse dieser Kollegen, die sich gegen einen solchen Gebrauch ihrer Resultate gewiss verwahren würden [42].

Wir empfehlen daher Entscheidungsträgern aus Wirtschaft und Politik, sich bei ihren Entscheidungen auf die breit abgestützten Übersichtsberichte zu verlassen, die in regelmäßigen Abständen den aktuellen Stand des Wissens zusammenfassen. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge ist es für Nicht-Fachleute kaum möglich, einzelne Aussagen oder Argumente bezüglich ihrer Stichhaltigkeit einzuordnen. Eine fundierte Bewertung ist nur nach Sichtung unzähliger Forschungsarbeiten möglich. Neue Erkenntnisse und Theorien müssen in der Wissenschaft zuerst durch weitere Untersuchungen bestätigt werden, bevor sie in eine Gesamtschau einfließen können. In vielen Fällen halten sie jedoch einer Überprüfung nicht stand und werden ad acta gelegt. In der Wissenschaft breit abgestützte Beratungsgremien (IPCC, WBGU, AGU usw.) nehmen die Aufgabe wahr, die Diskussionen mitzuverfolgen und neue Erkenntnisse, die bestätigt und anerkannt worden sind, der Öffentlichkeit zu vermitteln. Sie tun dies als unabhängige Fachleute nach bestem Wissen und Gewissen. Ihre Aussagen sind zuverlässiger und ausgewogener als die einzelner Wissenschaftler, weil sich schlecht fundierte oder extreme Einzelmeinungen hier nicht durchsetzen können.

10. Danksagung

Wir danken Eduardo Zorita für die Erläuterung der falschen Darstellung seiner Ergebnisse durch Berner und Hollerbach. Weiter danken wir Richard Alley, Keith Alverson, Gerard Bond, Tom Crowley, Pieter Grootes, Gerald Haug, Phil Jones, Sigfus Johnsen, Jean Jouzel, Lloyd Keigwin, Judith Lean, Mike Mann, Debby Meese, Michael Sarnthein, Bernhard Stauffer, Thomas Stocker sowie vielen anderen Paläoklimatologen für zahlreiche anregende Gespräche über die Klimageschichte.

11. Anmerkungen und Quellen

1. Arrhenius, S., 1896: *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, **5**, p. 237-276.
2. http://chimie.scola.ac-paris.fr/sitedechimie/hist_chi/text_origin/arrhenius/Arrhenius2.html

3. Callendar, G.S., 1938: *The artificial production of carbon dioxide and its influence on climate*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, **64**, p. 223-240.
4. Revelle, R. and H. Suess, 1957: *Carbon dioxide exchange between the atmosphere and the ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades*. Tellus, **9**, p. 18-27.
5. Keeling, C.D., 1960: *The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere*. Tellus, **12**, p. 200-203.
6. Manabe, S. and R.T. Wetherald, 1967: *Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity*. Journal of the Atmospheric Sciences, **24**, p. 241-259.
7. National Academy of Sciences, Climate Research Board, 1979: *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*. Washington, DC, National Academy of Sciences.
8. Weart, S.R., 2003: *The discovery of global warming*. Harvard, Harvard University Press, 240 pp.
9. So wurde etwa das nach wie vor von manchen Skeptikern vertretene Argument, die Absorptionsbanden des CO₂ seien gesättigt, bereits Anfang des 20. Jahrhunderts gegen Arrhenius vorgebracht. Es wurde erst in den 50er Jahren widerlegt [8].
10. Berner, U. and A. Hollerbach, 2004: *Klimawandel und CO₂ aus geowissenschaftlicher Sicht*.
11. Michaels, P.J., P.C. Knappenberger, and R.E. Davis, 2004: *Das logische Paradigma einer gemäßigten globalen Erwärmung*.
12. IPCC, 2001: *Climate Change 2001*. Cambridge, Cambridge University Press, 3 Bände.
13. Laut der Publikationsdatenbank des Institute for Scientific Information (ISI), Abfrage vom 16.2.2004, haben weder Berner noch Hollerbach bislang eine eigene Forschungsarbeit zur Klimaentwicklung in der Fachliteratur publiziert. Sie stellen ihre im vorliegenden Artikel verbreiteten Thesen auch nicht auf klimatologischen Fachkongressen vor und entziehen sich so dem normalen wissenschaftlichen Diskurs.
14. Lorius, C., J. Jouzel, D. Raynaud, J. Hansen, and H. Le Treut, 1990: *The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming*. Nature, **347**, p. 139-145.
15. Petit, J.R. et al., 1999: *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*. Nature, **399**, p. 429 - 436.
16. Rahmstorf, S., D. Archer, D.S. Ebel, O. Eugster, J. Jouzel, D. Maraun, U. Neu, G.A. Schmidt, J.P. Severinghaus, A.J. Weaver, and J. Zachos, 2004: *Cosmic rays, carbon dioxide and climate*. Eos, **85**(4), p. 38-41.
17. "Human activities are increasingly altering the Earth's climate. These effects add to natural influences that have been present over Earth's history. Scientific evidence strongly indicates that natural influences cannot explain the rapid increase in global near-surface temperatures observed during the second half of the 20th century." Quelle: http://www.agu.org/sci_soc/prrl/prrl0335.html.
18. Einer der Autoren (S.R.) ist ein international renommierter Paläoklimatologe. Er hat zahlreiche Arbeiten zu den Mechanismen vergangener Klimaänderungen in der internationalen Fachliteratur publiziert, sowohl Auswertungen von Eiskerndaten als auch theoretische Arbeiten und Modellrechnungen - auch gemeinsam mit den Kollegen, die Eis- und Sedimentkerne bohren. Publikationsliste unter <http://www.pik-potsdam.de/~stefan>.
19. Richard Alley, 2002: *The Two-Mile Time Machine. Ice Cores, Abrupt Climate Change and Our Future*. Princeton, Princeton University Press, 229 pp.
20. „Ice cores and other paleoclimatic records ... indicate that rising carbon dioxide levels will cause significant warming. ... We do know that a large, abrupt climate change could happen, and that human activities may make large, abrupt changes more likely.“
21. Für die Südhalbkugel reicht derzeit die Dichte der Datenabdeckung für längerfristige Betrachtungen nicht aus.
22. Mann, M.E. et al., 2003: *On Past Temperatures and Anomalous Late-20th Century Warmth*. Eos, **84**(27), p. 256-258.

23. Mann, M.E., R.S. Bradley, and M.K. Hughes, 1999: *Northern hemisphere temperatures during the past millennium*. Geophysical Research Letters, **26**, p. 759-762.
24. Bauer, E., M. Claussen, V. Brovkin, and A. Hünerbein, 2002: *Assessing climate forcings of the Earth system for the past millennium*. Geophysical Research Letters, **30**, p. 1276.
25. Die von Berner und Hollerbach in Bild 1b gezeigte Temperaturskala gilt unter den internationalen Eiskernexperten seit 1998 als überholt. Eine neue Kalibrierung der Temperaturbestimmung aus Sauerstoffisotopen ergab um ca. einen Faktor zwei größere Temperaturschwankungen [43].
26. Rahmstorf, S., 2002: *Ocean circulation and climate during the past 120,000 years*. Nature, **419**, p. 207-214.
27. Ganopolski, A., S. Rahmstorf, V. Petoukhov, and M. Claussen, 1998: *Simulation of modern and glacial climates with a coupled global model of intermediate complexity*. Nature, **391**, p. 351-356.
28. Solanki, S.K. and N.A. Krivova, 2003: *Can solar variability explain global warming since 1970?* Journal of Geophysical Research, **108**, p. 1200.
29. „Herausforderung Klimawandel“, <http://www.bmbf.de/pub/klimawandel.pdf>.
30. Usoskin, I.G., S.K. Solanki, M. Schüssler, K. Mursula, and K. Alanko, 2003: *Millennium-Scale Sunspot Number Reconstruction: Evidence for an Unusually Active Sun since the 1940s*. Physical Review Letters, **91**(19 Nov).
31. Zorita, E., H. Von Storch, F.J. Gonzalez-Rouco, U. Cubasch, J. Luterbacher, S. Legutke, I. Fischer-Bruns, and U. Schlese, 2004: *Transient simulation of the climate of the last five centuries with an atmosphere-ocean coupled model: the Late Maunder Minimum and the Little Ice Age*. Meteorologische Zeitschrift, im Druck.
32. Tett, S.F.B., P.A. Stott, M.R. Allen, W.J. Ingram, and J.F.B. Mitchell, 1999: *Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface*. Nature, **399**, p. 569-572.
33. E. Zorita, persönliche Mitteilung.
34. Jacobson, M.Z., 2001: *Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols*. Nature, **409**, p. 695-697.
35. Anderson, T.L., R.J. Charlson, S.E. Schwartz, R. Knutti, O. Boucher, H. Rodhe, and J. Heintzenberg, 2003: *Climate forcing by aerosols - a hazy picture*. Science, **300**, p. 1103-1104.
36. Cramer, W. et al., 1999: *Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results*. Global Change Biology, **5**, p. 1-15.
37. Im Kyoto-Protokoll ist bereits das Jahr 2005 für den Beginn der Verhandlungen über die zweite Verpflichtungsperiode festgelegt.
38. Nach Artikel 2 der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zum Klimawandel (UNFCCC, 1992) haben sich die Nationen verpflichtet, die Konzentration auf einem Niveau zu stabilisieren, das einen gefährlichen Klimawandel vermeidet.
39. Graßl, H., J. Kokott, M. Kulesa, J. Luther, F. Nuscheler, R. Sauerborn, H.-J. Schellnhuber, R. Schubert, and E.-D. Schulze, 2003: *Über Kioto hinaus denken - Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert*. Berlin, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), 87 pp.
40. Frei erhältlich unter <http://www.wbgu.de/>.
41. Siehe *Flotte Kurven, dünne Daten*, Die Zeit, 5.9.2002, <http://www.pik-potsdam.de/~stefan/flottekurven.html>
42. Die meisten der betroffenen Wissenschaftler sind uns persönlich gut bekannt; aus deren Äußerungen über die Aktivitäten der „Klimaskeptiker“ können wir uns dieses Urteil erlauben.
43. Dahl-Jensen, D., K. Mosegaard, N. Gundestrup, G.D. Clow, S.J. Johnsen, A.W. Hansen, and N. Balling, 1998: *Past temperatures directly from the Greenland Ice Sheet*. Science, **282**, p. 268-279.

Weitere Artikel zur Erforschung der Klimageschichte, zur aktuellen Klimaentwicklung und zu den Argumenten der „Klimaskeptiker“ finden sich unter <http://www.pik-potsdam.de/~stefan>.