

Der Klimawandel in Vergangenheit und Zukunft

Wissensstand und offene Fragen



Christian-Dietrich
Schönwiese



Das Klima der Erde ist variabel in Zeit und Raum, aus sehr unterschiedlichen Gründen. In den letzten ca. 10.000 Jahren ist es jedoch relativ stabil gewesen, bis im Industriezeitalter eine markante Erwärmung eingesetzt hat. Damit sind Änderungen der Meeresspiegelhöhe und weiterer Klimatelemente wie des Niederschlags verbunden, einschließlich der Extremereignisse. Trotz der regional unterschiedlichen Strukturen des Klimawandels, die in den Klimamodellrechnungen noch nicht voll verstanden sind, ist doch zumindest die im globalen Mittel festgestellte Erwärmung mit hoher Wahrscheinlichkeit anthropogen, d.h. menschengemacht. Die sich auf Szenarien stützenden Zukunftsprojektionen ergeben ein so großes Risiko künftigen Klimawandels und seiner Folgen, dass geeignete Maßnahmen auf der politischen und wirtschaftlichen Ebene notwendig sind.

Klima im Blickpunkt

Wir alle sind von der Gunst des Klimas abhängig und betroffen, wenn es sich zu unserem Nachteil ändert. Nicht ohne Grund haben sich die Hochkulturen unseres Planeten in einer Zeit entwickelt, in der das Klima relativ stabil war, nämlich in den Jahrtausenden nach der letzten Eiszeit. Wir finden die Nationen mit der größten Wirtschaftskraft in der gemäßigten Klimazone, wo es weder bei der Temperatur noch beim Niederschlag ein zu hohes bzw. zu niedriges Niveau gibt. Auch unserer Landwirtschaft, von der wiederum unsere Ernährung abhängt, sind strikte klimatische Grenzen gesetzt. Es kann uns daher nicht gleichgültig sein, was mit unserem Klima geschieht.

In historischer Zeit, ganz besonders aber im Industriezeitalter (letzte ca. 100–200 Jahre), hat neben den vielfältigen natürlichen Prozessen, die das Klima stets variabel gestalten, der Mensch als zusätzlicher Klimafaktor die Bühne des Geschehens betreten, und das mit zunehmender Wucht und

globaler Tragweite. Aus der konkreten Gefahr, dass der Mensch dadurch das Klima, von dem er so abhängig ist, überwiegend zu seinem Nachteil verändert, erwächst uns eine besondere Verantwortung. Dies umso mehr, als sich dieser anthropogene Klimawandel über so lange Zeit vollzieht, dass die uns folgenden Generationen noch weit mehr betroffen sein werden als wir.

Diese brisante Konstellation, nämlich die Rückkopplung von Ursache und Wirkung zwischen Anthroposphäre (Menschheit) und Klimasystem, findet mit Recht nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in der Öffent-

lichkeit große Beachtung. Verschiedene Umstände haben dazu beigetragen, dass diese Aufmerksamkeit seit Jahresbeginn 2007 noch enorm angewachsen ist: Der vierte Sachstandsbericht des Weltklimarates (UN Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC 2007), die Hinweise auf die ökonomischen Kosten des Klimawandels, die internationalen politischen Verhandlungen und nationalen Aktionspläne zur Ausfüllung der UN-Klimarahmenkonvention und nicht zuletzt die sich häufenden Extremereignisse wie Hitzewellen, Dürren, Überschwemmungen und Stürme.

Der Klimawandel der Vergangenheit: Rekonstruktionen

Das Klima der Erde ist variabel in allen Größenordnungen der Zeit und des Raums, seit die Erde existiert, und dies aus den unterschiedlichsten Gründen (IPCC 2007; Endlicher und Gerstengarbe 2007; Rahmstorf und Schellhuber 2007; Schönwiese 2003). Mit Hilfe der indirekten Rekonstruktions-

methoden der Paläoklimatologie ist es möglich, das Klima der Erde bis maximal 3,8 Milliarden Jahre zurück zu rekonstruieren (Erdalter: 4,6 Milliarden Jahre), wenn auch die Dichte, Genauigkeit und Verlässlichkeit dieser Informationen mit zunehmendem Alter deutlich abnehmen. Immerhin wissen

wir aber, dass die letzten Jahrmilliarden durch die Vorherrschaft eines sehr warmen Klimas gekennzeichnet waren, das keinerlei Eisvorkommen auf der Erde zuließ (akryogen). So lag beispielsweise vor 100 Jahrmillionen (Kreidezeit) die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur um ca. 10 °C höher als heute. Doch sind episodisch, jeweils mit einigen Jahrmillionen Dauer, Eiszeitalter eingetreten, mit einem Temperaturniveau, das zu Vereisungen der Polargebiete und einiger Gebirgsregionen führte. Wir leben in einem solchen, dem Quartären Eiszeitalter, das fließend vor ca. 2 bis 3 Millionen Jahren begonnen hat. Primäre Ursache für das Eintreten von Eiszeitaltern ist die Kontinentaldrift, da polständige bzw. polnahe Positionen der Landgebiete die Bildung von Schnee- und weitergehend auch von Eisauflagen erst ermöglichen, die dann durch verstärkte Reflektion der Sonneneinstrahlung eine sich selbst verstärkende Abkühlung in Gang setzen (positive Rückkopplung).

Innerhalb der Eiszeitalter gibt es ein ausgeprägtes Wechselspiel zwischen relativ kälteren und wärmeren Epochen, den Kaltzeiten (Eiszeiten, Glazi-

Vor 10.800 Jahren hat die derzeitige Warmzeit begonnen

alen) und Warmzeiten (Zwischeneiszeiten, Interglazialen), primär gesteuert von den Schwankungen und regionalen Umverteilungen der Sonneneinstrahlung aufgrund der Variationen der Erdumlaufbahn um die Sonne (sog. Orbitalparameter mit Zykluslängen von rund 20.000, 40.000 und 100.000 Jahren). Im Übergangsbereich von der letzten Kaltzeit (Würm-Eiszeit) in die derzeitige Warmzeit (Neo-Warmzeit, Holozän, Postglazial), trat eine heftige abrupte Klimaschwankung (Dryas) auf, so dass die derzeitige Warmzeit ziemlich genau vor 10.800 Jahren begonnen hat. Ähnlich abrupte Schwankungen gab es auch in der letzten Kaltzeit, und zwar in Form von rasch

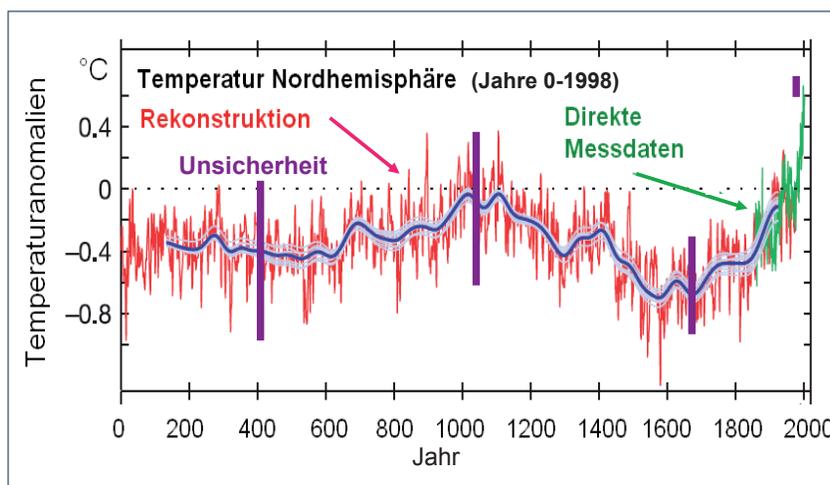


Abbildung 1: Rote Kurve: paläoklimatologische Rekonstruktion der relativen jährlichen Variationen (Anomalien, d. h. Abweichungen vom Referenzmittelwert 1961–1990) der nordhemisphärisch gemittelten bodennahen Lufttemperatur. Blaue Kurve: Hervorhebung der Langfristkomponente durch 80-jährige Glättung. Grüne Kurve: Vergleich mit Abschätzungen, die auf direkten Messdaten beruhen. Insgesamt ist die Zeit 0–1998 abgedeckt (nach Moberg et al. 2005, ergänzt). Die vertikalen Balken vermitteln einen Eindruck der Unsicherheit der jeweiligen Abschätzungen (in Anlehnung an IPCC 2007).

einsetzenden kräftigen Erwärmungen und nachfolgenden etwas langsameren Abkühlungen (Dansgaard-Oeschger-Ereignisse), die mit Hilfe von Klimamodellen (Rahmstorf und Schellnhuber 2007) auf entsprechende Schwankungen der nordatlantischen Ozeanzirkulation zurückgeführt werden. Ihre Auslösung, die einem ominösen ca. 1.500-jährigen Zyklus zu unterliegen scheint, gehört jedoch noch zu den offenen Fragen der Klimatologie.

Der Temperaturunterschied zwischen der letzten Kalt- und unserer heutigen Warmzeit von global gemittelt 4 bis 5 °C mag unter den Maßstäben des Wetters gering erscheinen, ist aber für das Klima (definiert als Langzeitstatistik der Wetterereignisse) immens viel. So waren zum Tiefpunkt der letzten Kaltzeit (vor ca. 18.000 Jahren) u. a. das ganze heutige Kanada sowie fast die ganzen Britischen Inseln und Skandinavien kilometerdick mit Eis bedeckt. Infolgedessen lag der Meeresspiegel um ungefähr 125 Meter tiefer als heute. Diese wenigen Hinweise mögen beleuchten, welche enormen Auswirkungen eine Veränderung der

globalen Durchschnittstemperatur von nur wenigen Grad Celsius hat.

Wie bereits erwähnt, war das Klima in der Neo-Warmzeit relativ stabil, zumindest bis jetzt, wobei die Betonung auf relativ liegt, weil die noch immer auftretenden natürlichen Variationen im Bereich von (wiederum global und relativ langzeitlich gemittelt) ungefähr 1 °C in ihrer Wirkung nicht unterschätzt werden dürfen. Der Temperaturverlauf der letzten beiden Jahrtausende ist – nordhemisphärisch gemittelt – aus Abb. 1 zu ersehen. Zu der dort wiedergegebenen Rekonstruktion gibt es jedoch eine Reihe von Alternativen (IPCC 2007), die ziemlich stark streuen, was in Abb. 1 durch die vertikalen Balken (als Maß für die Unsicherheit) gekennzeichnet ist. Folgen

Vor ca. 1000 Jahren war es bereits einmal ähnlich warm wie heute

wir der Rekonstruktion in Abb.1, so war es vor rund 1.000 Jahren (Mittelalterliches Warmklima/Optimum) ähnlich warm wie heute (Referenzperiode

1961–1990), gefolgt von der sog. „Kleinen Eiszeit“ die um 1600 bis 1700 mit Werten um 0,6 °C unter dem heutigen Niveau ihren Tiefpunkt erreichte.

Ganz sicher war die Temperaturverteilung, wie ja auch heute, weder im relativ warmen Mittelalter noch in der „Kleinen Eiszeit“ regional und jahreszeitlich einheitlich. So könnte es beispielsweise im Mittelalter in England (Indizien für verbreiteten Weinanbau in der Südhälfte) bzw. Grönland (Besiedlung und Namensgebung „Grönland“, wegen des „grünen“ und daher

landwirtschaftlich nutzbaren Küstensaums, gemäß der „Landnam-Saga im Jahr 982) besonders warm gewesen sein. Solche regionalen Besonderheiten gehören für die Zeit vor der direkten instrumentellen Klimadatenerfassung, im Rahmen der generellen quantitativen Unsicherheiten, zu den offenen Fragen. Und auch die Verursachung der Klimaschwankungen jener Zeit ist noch ungenügend geklärt, obwohl der Sonnenaktivität und dem Vulkanismus dabei hervorgehobene Bedeutung zukommt (IPCC 2007).

werden die sich beschleunigenden Abschmelzvorgänge im Randbereich des dortigen Inlandeises durch verstärkte Akkumulation im Inneren (wiederum Niederschlagseffekt) fast kompensiert. Da das dortige Temperaturniveau aber wesentlich höher liegt als in der Antarktis, könnten sich die Abschmelzvorgänge ab einer gewissen Schwelle des Temperaturanstiegs so intensivieren, dass ein irreversibles Totalabschmelzen stattfindet. Die Folge wäre, vermutlich im Lauf einiger Jahrhunderte, ein Meeresspiegelanstieg um 7 Meter.

Der Klimawandel der Vergangenheit: direkt gewonnene Messdaten

Seit 1659 gibt es kontinuierlich direkt erhobene Temperaturdaten aus England, ab ungefähr 1850 darüber hinaus so viele Messstationen, dass globale Mittelwerte abschätzbar sind. Das ist genau die Zeit, für die bereits aus Abb. 1 ein ungewöhnlich rascher Temperaturanstieg erkennbar ist. Dank der direkten, räumlich und zeitlich dichten Messwerterfassung (heute ca. 10.000, um 1850 ca. 300 Messstationen) ist diese Zeit klimatologisch besonders genau und umfassend durch Daten belegt. Damit lässt sich anhand der Abb. 2 aussagen, dass die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur 1901 bis 2000 um 0,7 °C angestiegen ist ($\pm 0,2$ °C). Außer diesem Trend gibt es aber auch überlagerte kurzzeitige (Jahr zu Jahr) und dekadische (Abb. 2, blaue Kurve) Variationen, die zu einem besonders starken Temperaturanstieg in jüngster Zeit (seit ca. 1970 um ca. 0,5 °C) geführt haben. Die säkulare Erwärmung hat den – ebenfalls global gemittelten – Meeresspiegel um 17 cm (± 5 cm) ansteigen lassen, und zwar primär durch die thermische Expansion des oberen Ozeans, sekundär durch das Rückschmelzen außerpolarer Gebirgsgletscher. So haben die Alpengletscher seit 1850 ungefähr die Hälfte ihres Volumens verloren (Häberli und Maisch, in: Endlicher und Gerstengarbe 2007, 98–107).

Die Polargebiete reagieren unterschiedlich. Auffällig ist der sich rasch verstärkende Rückgang des arktischen Meereises, seit 1980 mit einer Rate von 2,7%, im Sommer jedoch mit 7,4% pro Jahrzehnt (Rahmstorf und Schellnhuber 2007). Somit könnte die sommerliche arktische Meereisbedeckung im Laufe der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts total verschwinden. Dagegen ist die antarktische Landeisbedeckung ziemlich stabil und könnte sich sogar vergrößern, wenn der Effekt zunehmenden Niederschlags den der Erwärmung überwiegt. Eine Zeitbombe aber tickt in Grönland. Noch

Eine kurze und vereinfachende Darstellung kann nicht auf die eigentlich sehr wichtigen regionalen Unterschiede des Klimawandels eingehen. Es sei aber erwähnt, dass der genannte global gemittelte Temperaturanstieg von 0,7 °C (Abb. 2) regional eine Spanne von leichter Abkühlung (bis ca. -0,5 °C) bis starker Erwärmung (bis über 2,5 °C) umfasst, wobei die Maxima im Bereich der nordhemisphärischen Kontinente und der Arktis auftreten. Hinzu kommen die jahreszeitlichen Unterschiede. Noch komplizierter ist das Bild des Klimawandels beim Niederschlag, dessen Erfassung einerseits durch Messfehler und geringe räumliche Repräsentanz gegenüber der Temperatur erheblich erschwert, andererseits aber in seinen

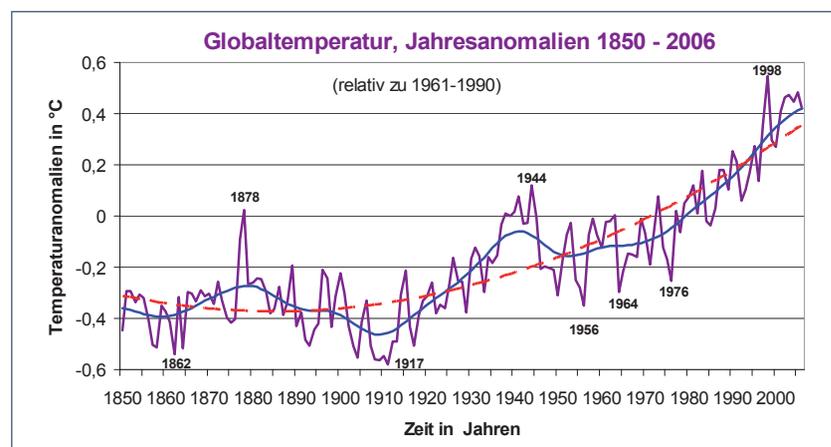


Abbildung 2: Violette Kurve: jährliche Anomalien (Referenzintervall wiederum 1961–1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1850–2006, basierend auf direkten Messungen (Land- und Ozeangebiete). Blaue Kurve: 30-jährige Glättung. Rot gestrichelte Kurve: Trend (Datenquelle: Jones et al. 1999, 2007; bearbeitet).



Beim globalen Temperaturanstieg gibt es beachtliche regionale Unterschiede

Auswirkungen häufig erheblich wichtiger ist als die Temperatur.

Noch ist es eine offene Frage, ob die globale (genauer: im globalen Mittel festgestellte) Erwärmung zu einer Beschleunigung des hydrologischen Zyklus führt, was sowohl die globale Niederschlags- als auch Verdunstungsrate erhöhen sollte. Die Messdaten über den Ozeanen sind nämlich besonders unsicher. Über Land sind vor allem Umverteilungen im Gang, die beispielsweise in Skandinavien zu mehr und im Mittelmeergebiet zu weniger Niederschlag führen. In der Sahelzone hat sich der Niederschlagsrückgang etwas entschärft, ist dort aber von einer Überlagerung von Klima- und Landnutzungseffekten (Überweidung, exzessive Wassernutzung) geprägt. Einen Überblick der Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland vermittelt Tab. 1, wobei sich die winterlichen Niederschlagszunahmen auf den Westen und Süden (mit Trendwerten bis über 50%) konzentrieren, die sich offenbar verstärkenden sommerlichen Niederschlagsabnahmen auf den Osten.

Ein Klimawandel zeigt sich nun nicht nur in Form relativ langfristiger Trends, sondern auch in Änderungen der Häufigkeit bzw. Intensität von Extremereignissen. Dabei haben z. B. der extreme europäische Hitze- und Trockensommer 2003 und die Überschwemmungen in der Elbe-Region im Sommer 2002 gezeigt, dass

auch Deutschland von solchen Extremereignissen nicht verschont bleibt (Schönwiese, in: Endlicher und Gersengarbe 2007, 60–66). Obwohl dieser Aspekt viel Aufmerksamkeit verdient, sei er hier nur kurz gestreift, und zwar mit Hinweis auf die Statistiken der Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (MüRück 2005, 2007), die darauf hinweist, dass weltweit die

volkswirtschaftlichen Schäden durch sog. große Naturkatastrophen von der Dekade 1960/69 bis zur Dekade 1995/2004 von 81 auf 567 Milliarden US Dollar angestiegen sind (Faktor 7). Auch wenn ein (relativ kleiner) Teil davon nicht klimabedingt ist und Schäden u. a. auch von Wertekonzentrationen abhängen, ist diese Entwicklung doch besorgniserregend.

Ursachen: Natürliche Prozesse und menschliche Einflüsse

Bei der Diskussion der vielfältigen und komplizierten Ursachen – wobei wir uns hier auf die Zeitskala des Industriealters beschränken können – ist zweierlei besonders wichtig: das Konzept des Klimasystems und das der Strahlungsantriebe (IPCC 2007, Schönwiese 2003). Das Klimasystem besteht aus den Komponenten Atmosphäre, Hydrosphäre (Salzwasser des Ozeans und Süßwasser der Kontinente), Kryosphäre (Land- und Meereis), Pede-/Lithosphäre (Boden und Gesteine, somit feste Erdoberfläche) und Biosphäre (insbesondere Vegetation). Innerhalb und zwischen diesen Komponenten gibt es eine Vielzahl von Wechselwirkungen (einschließlich Rückkopplungen), beispielsweise zwischen Atmosphäre und Ozean, was u. a. das El Niño-Phänomen hervorruft. Es tritt in episodischen (3–7-Jahre-Zyklus) Erwärmungen der tropischen Ozeane, insbesondere des tropischen Ostpazifiks vor der Küste von Peru und Ecuador, in Erscheinung und ist u. a. für den hohen Anomaliewert der Globaltemperatur im Jahr 1998 (vgl. Abb. 2) verantwortlich.

Davon sind die sog. externen Einflüsse zu unterscheiden, bei denen die Wirkung nicht auf die Ursache zurückwirkt. Beispiele dafür sind die Variationen der Sonneneinstrahlung durch Sonnenaktivität, der explosive Vulkanismus (der nach größeren Vulkanausbrüchen die untere Atmosphäre im globalen Mittel kühlt) und der Mensch. Auch die anthropogenen Einflüsse sind vielfältig und zeigen sich beispielsweise im sog. Stadtklima, das sich wegen der dortigen Bebauung, Bodenversiegelung und Wärmeabgabe deutlich vom Klima des Umlands unterscheidet.

Doch sind im Industriezeitalter zwei anthropogene Vorgänge von hervorgehobener und zugleich globaler Bedeutung:

- der Ausstoß klimawirksamer Spurengase (CO_2 , CH_4 , N_2O usw.) als Folge der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas, einschließlich Verkehr), aber auch von Waldrodungen sowie industrieller und landwirtschaftlicher Produktion;
- die Bildung von sulfatischen Schwebepartikeln (Sulfataerosol) aufgrund der SO_2 -Emission.

Der erstgenannte Vorgang führt im globalen Mittel zu einer Erwärmung der unteren Atmosphäre und gleichzeitig zu einer Abkühlung der Stratosphäre: (zusätzlicher) anthropogener „Treibhauseffekt“; der zweitgenannte, ebenfalls im globalen Mittel, zu einer Abkühlung der unteren Atmosphäre: Sulfateffekt (IPCC 2007; Schönwiese 2003).

Klimaelement		Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur	1901–2000	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C	+ 1,1 °C	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C
	1951–2000	+ 1,4 °C	+ 0,9 °C	+ 0,2 °C	+ 1,6 °C	+ 1,0 °C
Niederschlag	1901–2000	+ 13 %	– 3 %	+ 9 %	+ 19 %	+ 9 %
	1951–2000	+ 14 %	– 16 %	+ 18 %	+ 19 %	+ 6 %

Tabelle 1: Übersicht der beobachteten Temperatur- (bodennah) und Niederschlagstrends in Deutschland (Quelle: Schönwiese 2003, ergängt).

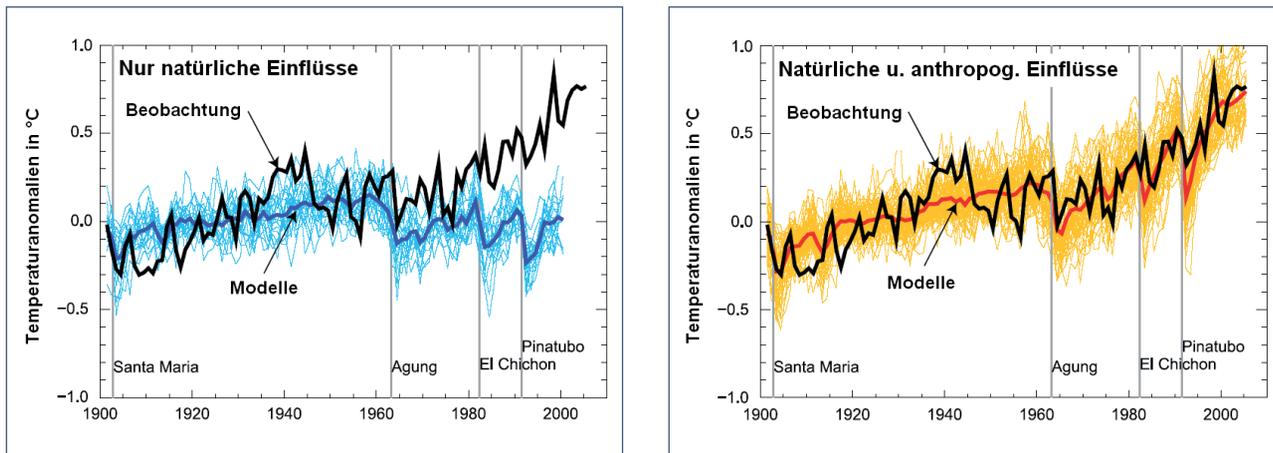


Abbildung 3: Schwarze Kurven: Beobachtete relative bodennahe Temperaturvariationen (vgl. Abb. 2, 1900–2005); links: Reproduktion durch eine Vielzahl von Modellen, die nur natürliche Einflüsse berücksichtigen; rechts: auch anthropogene Einflüsse sind berücksichtigt. Die mittleren Modellsimulationen sind dick blau bzw. rot eingezeichnet. Außerdem ist auf einige explosive Vulkanausbrüche (Santa Maria usw.) hingewiesen (IPCC 2007).

Allein beim CO_2 ist energiebedingt die globale anthropogene Emission in der Zeit zwischen 1900 und 2006 von rund 2 auf rund 29 Milliarden Tonnen angestiegen. Schätzt man die Klimawirksamkeit der Spurengase in Form von CO_2 -Äquivalenten ab, so ergeben sich folgende Anteile: CO_2 76,7% (56,6% energiebedingt, 17,3% durch Waldrodungen, Rest aus der Zementproduktion), CH_4 14,3% (energiebedingt, Reisanbau, Viehhal-

tung usw.), N_2O 7,9% (Landwirtschaft usw.), Rest Fluorverbindungen. Als Folge dieser Emissionen sind die atmosphärischen Konzentrationen drastisch angestiegen, bei CO_2 von vorindustriell (seit ca. 1750/1800, gilt ungefähr für die letzten 10.000 Jahre) ca. 280 ppm auf heute (2006) rund 382 ppm (IPCC 2007; ergänzt)¹.

Die Strahlungsantriebe kennzeichnen, sozusagen als Vorstufe zu den Kli-

mamodellrechnungen, die Wirksamkeit der anthropogenen und natürlichen Einflüsse in Form von energetischen Störungen der unteren Atmosphäre (Troposphäre), zunächst im globalen Mittel und ohne Wechselwirkungen. Nach IPCC (2007) ergibt sich für die klimawirksamen Spurengase seit 1750 ein Wert² von 3 (2,7–3,6) Wm^{-2} (wobei auf CO_2 1,7, auf CH_4 0,5 und auf das troposphärische Ozon 0,4 Wm^{-2} entfallen), für das Sulfataerosol direkt $-0,5 \text{ Wm}^{-2}$ (da negativ: Abkühlungseffekt), wozu indirekt (wolkenphysikalische Effekte) noch $-0,7 \text{ Wm}^{-2}$ hinzukommen, und durch Landnutzungseffekte (Albedo) $-0,2 \text{ Wm}^{-2}$. Da die anthropogene Restwirkung demgegenüber sehr klein ist, liegt der anthropogene Gesamteffekt bei $1,6 \text{ Wm}^{-2}$. Die Sonnenaktivität als natürlicher Konkurrenzmechanismus bringt es dagegen nur auf 0,1 (0,06–0,3) Wm^{-2} und kann zudem die beobachtete Abkühlung der Stratosphäre (erfasst ab ca. 1960) nicht erklären. Ähnliche Größenordnungen wie die klimawirksamen Spurengase

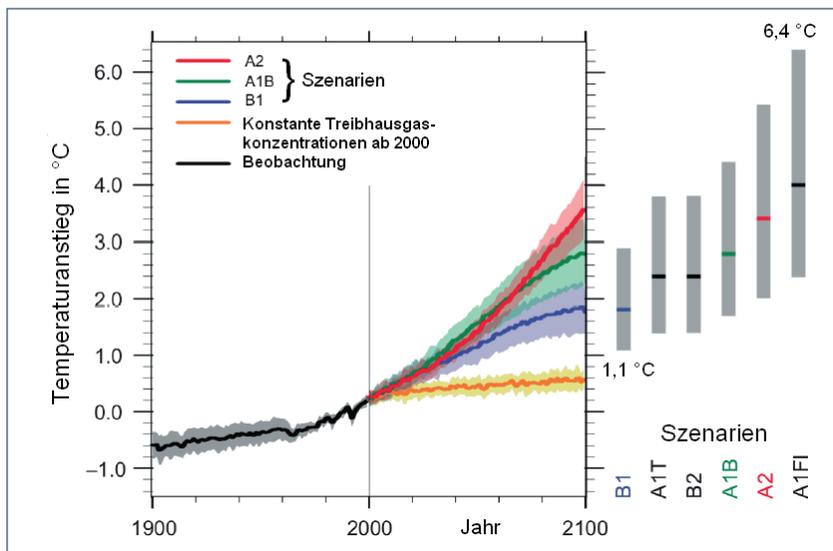


Abbildung 4: Global gemittelter bodennaher Temperaturanstieg 1900–2000 (Referenzwert 1961–1990), der hinsichtlich des Langfristtrends als weitgehend anthropogen interpretiert wird sowie die erwartete weitere Entwicklung bis 2100 aufgrund von 23 Klimamodellrechnungen, die von einigen ausgewählten Szenarien (genannt B1 usw.) der anthropogenen Emission klimawirksamer Spurengase ausgehen (IPCC 2007).

¹ ppm (parts per million) ist eine Maßeinheit, die angibt, wie viele Teile einer Substanz sich in einer Million Gesamtteile finden.

² Wm^{-2} (oder W/m^2) ist die Maßeinheit für die Intensität der Strahlung in Watt pro Quadratmeter Fläche.

erreicht nur noch der explosive Vulkanismus, allerdings immer nur für 1–3 Jahre nach der jeweiligen Eruption.

Aufgabe aufwändiger Klimamodellrechnungen ist es nun, zunächst für die Vergangenheit das Zusammenspiel der verschiedenen natürlichen und anthropogenen Einflüsse auf das Klimasystem zu simulieren, wobei auch die internen Wechselwirkungen zu berücksichtigen sind, die die externen Einflüsse modifizieren. Zudem sind auch die regionalen Strukturen der Änderungen der Temperatur und anderer Klimaelemente gefragt. Abb. 3 zeigt, dass dabei zumindest der global gemittelte Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte nur verständlich ist, wenn man die anthropogenen Einflüsse mit berücksichtigt, insbesondere den anthropogenen „Treibhauseffekt“.

Das IPCC (2007) hält es daher für sehr wahrscheinlich (> 90%), dass die im Industriezeitalter beobachtete Erwärmung (vgl. Abb. 2, rot gestrichelte Kurve) anthropogen ist. Für die letzten 50 Jahre wird es sogar als „extrem unwahrscheinlich“ angesehen, dass diese Erwärmung allein natürlichen Ursprungs sein könnte. Die ungefähr zwischen 1945 und 1975 aufgetretene überlagerte Abkühlung (vgl. Abb. 2) ist ähnlich wahrscheinlich ein Sulfataerosoleffekt. Auch viele regionale Strukturen der Klimaänderungen lassen sich durch Klimamodellrechnungen ursächlich interpretieren, wenn auch mit gewissen Einschränkungen gegenüber der global gemittelten Betrachtung. Schließlich deuten auch empirisch-statistische Analysen in diese Richtung (Schönwiese 2003).

nicht nur ersichtlich, dass die verschiedenen Szenarien zu unterschiedlichen Erwartungen des Anstiegs der Globaltemperatur in der Zukunft führen, sondern auch, dass die verschiedenen Modelle wegen ihrer intern unterschiedlichen Prozessbehandlung (insbesondere hinsichtlich der Wolken und Aerosole) sogar bei identischen Szenarien in ihren Ergebnissen streuen. Insgesamt ergibt sich bei der hier gezeigten Auswahl von Szenarien, dass mit einer Erhöhung der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur zwischen 1,1 °C und 6,4 °C bis 2100 zu rechnen ist (IPCC 2007). Zu diesen quantitativen Unsicherheiten kommen noch die der regionalen Strukturen des anthropogenen Klimawandels, obwohl sich darin einige Ähnlichkeiten mit den bereits eingetretenen Trends erkennen lassen (IPCC 2007; Schönwiese 2003).

Ob sich dieser Klimawandel auch auf die Extremereignisse auswirken wird, ist zwar ebenfalls unsicher, aber im Prinzip durchaus wahrscheinlich. Relativ klar ist, dass vielerorts extreme Kälte seltener und extreme Hitze häufiger wird. So lassen regionale Modellrechnungen und empirische Analysen ein häufigeres Eintreten von Hitze-Dürre-Sommern erwarten. Die bisherigen Temperaturrekorde könnten dabei sogar noch übertroffen werden. Beim Niederschlag könnten sowohl extrem viel (Überschwemmungen) als auch extrem wenig (Dürren) häufiger werden (IPCC 2007), was für die Ver-

Zukunftsperspektiven: Szenarien und Modellprojektionen

Das weitgehende klimatologische Verständnis der Vergangenheit ermöglicht auch die Formulierung von Zukunftsperspektiven. Allerdings wächst damit die Unsicherheit erheblich. Streng genommen sind nämlich Klimavorhersagen, die den Wettervorhersagen vergleichbar wären, nicht möglich. Das hängt u. a. damit zusammen, dass viele natürliche Einflüsse wie z. B. der Vulkanismus prinzipiell nicht vorhersagbar sind. Und auch die anthropogenen Trends sind künftig alles an-

dere als sicher. Man behilft sich daher so, dass derartige natürliche Mechanismen ausgespart bleiben und alternative Annahmen über die anthropogenen Einflüsse, insbesondere die Emission klimawirksamer Spurengase, gemacht werden, die sog. Szenarien. Um dies von der Technik der Wettervorhersage strikt zu unterscheiden, spricht man von bedingten Szenarien-gestützten Klimamodellprojektionen.

Die Abb. 4 zeigt die Ergebnisse solcher Modellrechnungen. Daraus ist

LITERATUR

- Endlicher, W./Gerstengarbe, F.-W. (Hg.) (2007): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Humboldt-Universität zu Berlin, Eigenverlag, Potsdam.
- IPCC – Solomon, S. et al. (eds.) (2007): Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Cambridge Univ. Press, Cambridge; Internet: <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>
- Jones, P. D. et al. (1999): Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Rev. Geophys.*, 37, 173–199; update Internet 2007: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature>
- Moberg, A. et al. (2005): Highly variable northern hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433, 613–617.
- MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft) (2005 ... 2007): Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre), Eigenverlag, München.
- Rahmstorf, S./Schellnhuber, H. J. (2007): Der Klimawandel. Diagnose, Prognose, Therapie. C. H. Beck, München.
- Schönwiese, C.-D. (2003): *Klimatologie*. 2. Aufl., Ulmer (UTB), Stuttgart (3. Aufl., 2008, in Vorbereitung).



Temperatur, bodennah	Erwärmung im globalen Mittel um 1,1–6,4°C, wahrscheinlichster Bereich 2–4°C; Maxima im Winter der Nordhemisphäre polwärts der Tropen
Temperatur, Stratosphäre	Abkühlung, dabei Trend quantitativ deutlich stärker als in der unteren Atmosphäre (begünstigt den stratosphärischen Ozonabbau)
Meeresspiegelhöhe	Anstieg im globalen Mittel um rund 20–60 cm (unterschätzt?)
Niederschlag	Niederschlagsumverteilungen, z. B. Mittelmeer-Region trockener, Skandinavien u. Polarregionen feuchter; in Mitteleuropa niederschlagsreichere Winter und trockenere Sommer
Extremereignisse	Regional häufiger bzw. intensiver bzw. beides, z. B. Hitzewellen, Dürren, Starkniederschläge, Hagel; aber im einzelnen teilweise sehr unsicher; intensivere tropische Wirbelstürme

Tab. 2: Summarische Auflistung einiger Klimamodellprojektionen für das 21. Jahrhundert (ungefähr 2100 gegenüber 2000) aufgrund des anthropogenen Treibhauseffekts (vgl. Abb. 3; nach IPCC 2007).

gangenheit bereits regional nachgewiesen ist (u. a. Schönwiese, in: Endlicher und Gerstengarbe 2007). Bei den tropischen Wirbelstürmen gibt es bisher kaum Indizien für eine generelle Häufigkeitszunahme, wohl aber für eine Gewichtverschiebung zugunsten der stärkeren auf Kosten der schwächeren (IPCC 2007), was in Kombination mit dem Meeresspiegelanstieg für küstennahe Zonen in Zukunft noch wesentlich problematischer werden könnte, als das jetzt schon der Fall ist. In der Tab. 2 sind die derzeitigen Modellerwartungen für das 21. Jahrhundert grob zusammengefasst.

Die Folgen dieses Klimawandels können zum Teil positiv sein, beispielsweise weil in mittleren und hohen geographischen Breiten im Winter weniger geheizt werden muss, nördliche Regionen (z. B. die Nord-/Ostsee) auf verstärkten Tourismus hoffen können sowie vielerorts die Vegetationsperiode und somit die Zeit landwirtschaftlicher Nutzung potenziell länger wird. Aber gerade dieser letztgenannte Vorteil kann durch die mit Hitzesommern verbundene Dürre überkompensiert werden. So sehen die Fachleute insgesamt auch mehr Nach- als Vorteile, insbesondere in den Bereichen Wasser (teils zu wenig, mit negativen Folgen für die Trinkwasserversorgung

und Landwirtschaft, somit auch für die Nahrungsmittelproduktion; teils zu viel mit der Folge von Überschwemmungen), Ökologie (u. a. durch negative Auswirkungen auf die Artenvielfalt) und Gesundheit. Die Betroffenheit wird regional sehr unterschiedlich sein, relativ hoch z. B. in den Mittelmeerländern und den Küstenbereichen, wo sich die Effekte des Meeresspiegelanstiegs und intensiverer Stürme überlagern. Zunehmende Dürre führt im übrigen auch dazu, dass Waldbrände immer häufiger außer Kontrolle geraten.

Fazit

Das Phänomen des Klimawandels ist naturwissenschaftlich sowohl von den Erscheinungsformen her als auch ursächlich weitgehend verstanden, auch wenn es im Detail noch einige offene Fragen gibt. Insbesondere lässt sich zumindest bei den Variationen der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur im Industriezeitalter der anthropogene Anteil (Klimasignal) von den natürlichen Variationen (Klimarauschen) mit hoher Wahrscheinlichkeit trennen. Somit muss der anthropogene Klimawandel praktisch als Faktum begriffen und dafür Verantwortung übernommen werden. Wegen der regional un-

terschiedlichen Auswirkungen – wobei keineswegs generell, aber doch relativ häufig die armen Länder Leidtragende des Tuns sind, das vor allem auf die reichen Länder zurückgeht – und der erheblichen Zeitverzögerungen im Klimasystem zwischen Ursache und Wirkung (beim Klima der Landgebiete in der Größenordnung von Jahrzehnten, beim Meeresspiegel möglicherweise in der Größenordnung von Jahrhunderten) hat die Klimaproblematik auch eine gewichtige ethische Perspektive.

Die Notwendigkeit des Handelns, und zwar sowohl was Maßnahmen mit dem Ziel der Begrenzung dieses Klimawandels als auch was die Anpassung an den nicht mehr vermeidbaren anthropogenen Klimawandel betrifft, ist politisch weitgehend akzeptiert. Dabei ist entscheidend, die Kosten dieses Handelns gegenüber den Kosten des Nicht-Handelns in Relation zu setzen und folglich geeignete ökonomische und politische Instrumente des Handelns zu entwickeln und anzuwenden. Die UN-Klimarahmenkonvention (Framework Convention on Climate Change, FCCC), die vorsieht, die Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau zu stabilisieren, das einen gefährlichen anthropogenen Klimawandel vermeidet, muss rasch und effektiv mit Leben gefüllt werden. Das Experiment, das die Menschheit derzeit mit unserem Klima und damit auch mit unserer Erde durchführt, ist nicht verantwortbar.

KURZBIOGRAPHIE

Christian-Dietrich Schönwiese (geb. 1940), Dr. rer. nat., Meteorologe; 1981 bis 2006 Professor am Institut für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt a. M., dort Leiter der Arbeitsgruppe Klimaforschung; hat sich vorwiegend mit der statistischen Analyse der jüngeren Klimageschichte (global und regional) sowie der Abgrenzung anthropogener von natürlichen Ursachen des Klimawandels beschäftigt.