

N. Podbregar, K. Schwanke, H. Frater

Wetter Klima Klimawandel

Wissen für eine Welt im Umbruch



Präsentiert vom ZDF-Wetter-
experten Karsten Schwanke

 Springer

Nadja Podbregar
Karsten Schwanke
Harald Frater

Wetter, Klima, Klimawandel

Nadja Podbregar
Karsten Schwanke
Harald Frater

Wetter, Klima, Klimawandel

Wissen für eine Welt im Umbruch

 Springer



Nadja Podbregar ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin und arbeitet als Redakteurin für das Wissensmagazin scinexx.de.



Harald Frater studierte Geowissenschaften und beschäftigt sich als Inhaber der MMCD NEW MEDIA GmbH seit vielen Jahren mit der Vermittlung naturwissenschaftlicher Inhalte.

ISBN 978-3-540-79291-8

e-ISBN 978-3-540-79292-5

DOI

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2009 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Grafik, Satz & Layout: MMCD NEW MEDIA GmbH, Düsseldorf

Umschlagbild: Harald Frater
Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1
springer.de

VORWORT

Noch ein Klimabuch – gibt es davon nicht schon genügend? Vielleicht. Doch immerhin geht es hier um ein Thema, das uns alle angeht. Angefangen vom morgendlichen Blick in den Himmel oder dem Radiowetterbericht bis hin zum allerneuesten Leitartikel zur Lage des Weltklimas: Wetter und Klima sind Themen, die uns unmittelbar betreffen.

Nur wer die Zusammenhänge im System Erde begreift, kann sich eine Meinung bilden, kann mitreden und ist auch bereit, etwas zu ändern. Deshalb geht es uns in diesem Buch darum, die manchmal reichlich komplizierten Hintergründe des Wetter- und Klimageschehens begreifbar und anschaulich zu machen. Und auch die Faszination, das Spannende an den Phänomenen unserer so wandelbaren Atmosphäre und der „Wettermaschine Erde“ wollen wir vermitteln.

Auch das Klima geht uns alle an: Die Folgen der globalen Erwärmung wirken sich zwar regional unterschiedlich aus, werden aber letztlich das Leben aller Menschen auf dieser Erde beeinflussen und verändern. Umso wichtiger ist es daher zu wissen, was auf uns zukommt. Was genau uns erwartet, wie unser Alltag Ende dieses Jahrhunderts aussehen wird und auch wie wir die Entwicklung noch beeinflussen können, diese Fragen tauchen in der öffentlichen Diskussion immer wieder auf. Und auf einige von ihnen haben die Forscher inzwischen erstaunlich konkrete Antworten. Welche das sind und wie sie diese

gefunden haben, erzählen wir ebenfalls auf den folgenden Seiten.

In meiner jetzigen Tätigkeit als Wissenschaftsjournalist beim ZDF hilft mir dieses Wissen, die brennenden Fragen zum globalen Wandel besser beantworten zu können, die Welt als komplexes Gebilde zu sehen, in der alles mit allem zusammenhängt – und genau das unseren Zuschauern näherzubringen. Auf meinen vielen Reisen für „Abenteuer Wissen“ habe ich den Klimawandel mit eigenen Augen gesehen: Auf Spitzbergen und Grönland schmelzen die Gletscher so schnell wie noch nie seit Beginn der Messungen. In den Alpen lässt der auftauende Permafrost die Felsen bröckeln und im Süden Spaniens erreichen viele Flüsse nicht mehr das Meer.

Daher müssen wir am Ball bleiben, dürfen die Entwicklung nicht aus den Augen verlieren, wenn die Veränderung unseres Planeten nicht völlig aus dem Ruder laufen soll.

Ich hoffe, dass Ihnen dieses Buch dabei hilft, am Ball zu bleiben.

Karsten Schwanke



*Karsten Schwanke,
Meteorologe und
Moderator des
ZDF-Magazins
„Abenteuer Wissen“*

Der Klimawandel – eine angekündigte Katastrophe

Symptome – die Erde hat Fieber	4
Ursachen – wer ist schuld am Klimawandel?	16
Prognosen – was bringt die Zukunft?	34

Die Klimafolgen – Auswirkungen des Klimawandels

Klimazonen – die große Verschiebung	42
Deutschland im Jahr 2100	50
Extremwetter – werden Katastrophen zur Regel?	59
Kippelemente – irreversible Schalter im System	82
Das große Sterben – wie reagiert die Natur?	87
Verlierer Mensch?	100

Die Maßnahmen – ist das Klima noch zu retten?

Klimapolitik – der lange Weg vom Reden zum Handeln	112
Technologie – Effizienz als Schlüsselfaktor?	122

Das Klimasystem – Wetterküche und Klimamaschine

Kosmische Parameter – wenn die Erde um die Sonne kreist	134
Die Atmosphäre – Schutzhülle und wichtigster Klimafaktor	144
Die Zirkulation – in der Atmosphäre wird gerührt	150
Das gekoppelte System – auch das Meer spielt mit	162

Die Wetterelemente - Akteure in der Atmosphäre

Die Temperatur – von heiß bis kalt	170
Die Luftfeuchte – von klamm bis trocken	174
Die Wolken – Bewohner der Atmosphäre	176
Der Niederschlag – flüssig und fest	187

Die Forschung – Meteorologie und Klimakunde

Prolog – ein Morgen mit „Wettermacher“ Karsten Schwanke	194
Meteorologie – hinter den Kulissen der Wettermacher	196
Klimaforschung – Blick zurück in die Zukunft	208

<i>Glossar</i>	218
-----------------------------	-----

<i>Index</i>	258
---------------------------	-----

<i>Bildnachweis</i>	260
----------------------------------	-----



Die globale Erwärmung bringt das Meereis zum Schmelzen. © National Science Foundation/Zee Evans



Der Klimawandel

Eine angekündigte Katastrophe

Hurrikans und Überschwemmungen, ungewöhnlich heiße Sommer, Winter ohne Schnee. Nur Ausnahmen? Oder müssen wir uns darauf einstellen, dass diese Kapriolen des Wetters in Zukunft zur Regel werden? Sind solche Katastrophen Vorboten einer sich anbahnenden globalen Klimaänderung – oder ist sie längst da und wir stecken bereits mittendrin? Schmelzende Gletscher, steigende Meeresspiegel und immer wärmere Temperaturen sprechen hier eine klare Sprache: Die Anzeichen für einen Klimawandel sind inzwischen kaum mehr zu übersehen. Was lange Zeit ein Drohgespenst für die Zukunft war, ist inzwischen Gegenwart, da sind sich auch die Klimaforscher einig.



Symptome – die Erde hat Fieber

Es wird wärmer: Seit dem Jahr 2000 hat fast jedes Jahr die langjährigen Temperatur-Durchschnitte übertroffen. © SXC

„Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig“, so die nachdrückliche Formulierung der Experten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in ihrem 2007 veröffentlichten vierten Sachstandsbericht. Die Klimaforscher belegen dies mit einer Fülle von Daten und Messungen, die kaum noch Raum für Zweifel lassen.

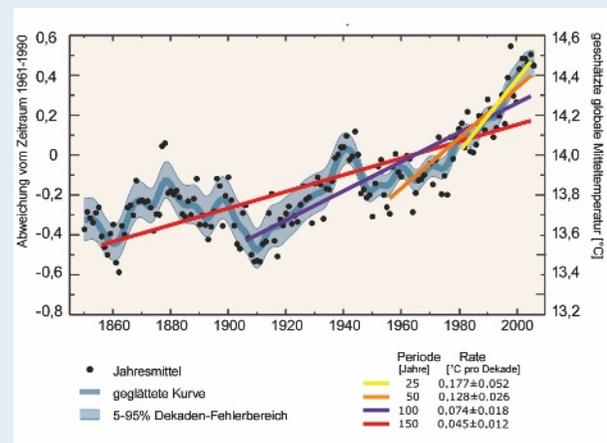
Messungen zeigen, dass sich die Oberfläche der Erde in den letzten 100 Jahren im globalen Durchschnitt um 0,74°C erwärmt hat. Diese Erwärmung wirkt sich jedoch nicht überall gleich stark aus. Während sich ein Gebiet im Süden Grönlands sowie Teile Boliviens und des Kongo kaum verändert haben, sind die hohen Breiten und besonders der arktische Norden besonders von der Erwärmung betroffen. Hier stiegen die Temperaturen in den letzten 50 Jahren um mehr als das Doppelte des globalen Durchschnitts an.

Und auch zwischen den Jahreszeiten gibt es Unterschiede. So kletterten im Westen Nordamerikas, in Nordeuropa und in China seit 1979 die Wintertemperaturen am stärksten, in Nordafrika und Europa wurde es vor allem im Sommer wärmer. In Nordgrönland, Ostasien und im Norden Nordamerikas wirkt sich die Erwärmung dagegen im Herbst besonders stark aus. Die Fieberkurve der Erde steigt jedoch nicht nur an, sie tut dies auch immer schneller: Wie das IPCC berichtet, ist der Erwär-

mungstrend über die letzten 50 Jahre fast doppelt so groß wie über die letzten 100 Jahre. Auch die Häufung der Temperaturrekorde in letzter Zeit werden die Experten als Indiz, obwohl normalerweise in der Klimaforschung die Devise gilt: „Ein Jahrhundertsommer macht noch keinen Klimawandel“ – soll heißen, dass kurzfristige Ausreißer noch nicht unbedingt Indiz für einen Klimatrend sein müssen. Doch in puncto Erwärmung folgten solche Ausreißer in letzter Zeit so schnell aufeinander, dass auch die skeptischsten Klimaforscher aufmerksam wurden: So gehörten von den letzten zwölf Jahren elf zu den wärmsten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1850.

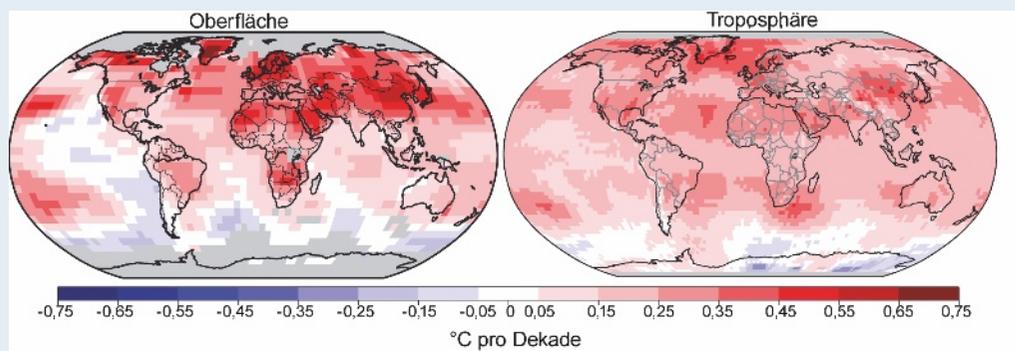
Spitzenreiter weltweit sind dabei die Jahre 1998 und 2005. Während jedoch 1998 die extreme Wärme noch durch die aufheizende Wirkung eines starken El-Niño-Effekts über dem Pazifik erklärt werden kann, kommen die darauf folgenden warmen Jahre allesamt ohne solche regionalen „Heizfaktoren“ aus. Auch das Jahr 2007, das im letzten IPCC-Bericht nicht mehr berücksichtigt werden konnte, setzte den Trend zur Erwärmung ungebrochen fort. Für Deutschland meldete der Deutsche Wetterdienst (DWD) eine Durchschnittstemperatur von 1,6°C über dem langjährigen Mittel und stufte es als zweitwärmstes Jahr seit 1901, dem Beginn der flächendeckenden Wetterbeobachtung in Deutschland, ein.

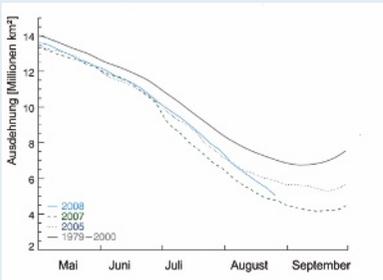
Die klimatischen Veränderungen schlagen sich nicht nur in den Durchschnittstemperaturen nieder, auch die Extreme deuten auf eine Erwärmung hin: So registrieren die Klimaforscher in den letzten Jahrzehnten, dass die Wintertage mit Temperaturen unter Null in den mittleren Breiten immer weniger geworden sind. Extrem kalte Tage sind ebenfalls auf dem Rückzug, während besonders heiße Tage und warme Nächte häufiger werden. Der Klimawandel beeinflusst inzwischen auch die jahreszeitlichen Veränderungen: In den hohen und mittleren Breiten beider Halbkugeln hat sich die frostfreie Saison deutlich verlängert, erkennbar ist dies beispielsweise bei uns an einem immer früheren Frühlingsbeginn.



Die Erwärmung hat an Tempo zugelegt: Die jüngsten Erwärmungsraten liegen deutlich über denen für längere Zeiträume.
© IPCC 2007, AR4 WG-1

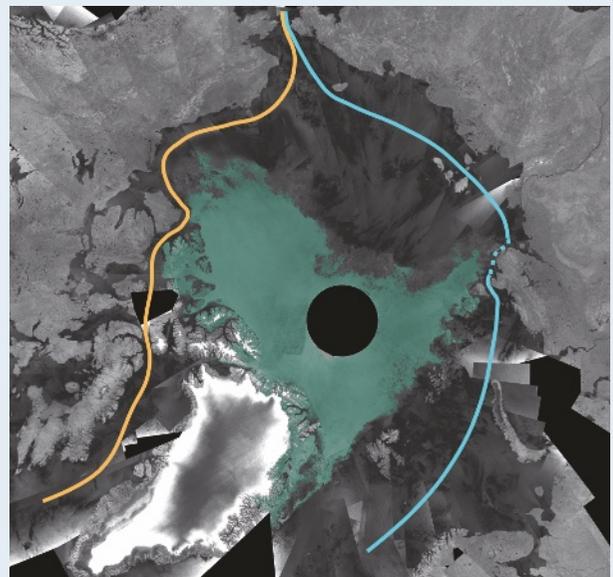
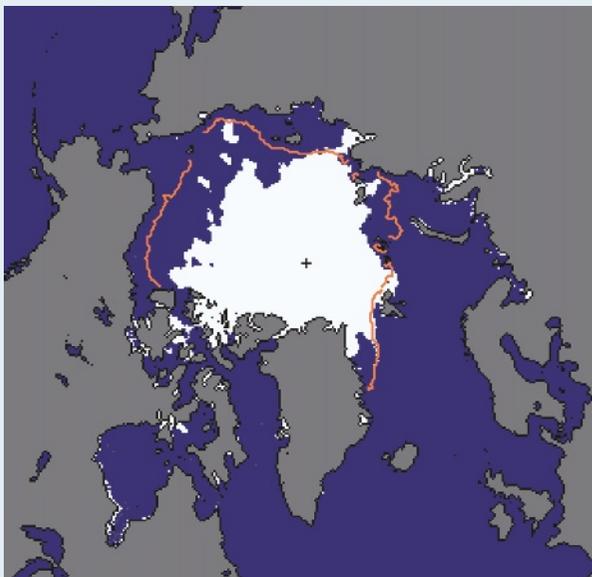
Globale Veränderungen der Oberflächentemperaturen (links) und der Troposphäre (rechts) im Zeitraum 1979 bis 2005. Grau markiert sind Bereiche ungenügender Datenabdeckung.
© IPCC 2007, AR4 WG-1





Die sommerliche Entwicklung des arktischen Meereises der Jahre 2005, 2007, 2008 und im langjährigen Durchschnitt im Vergleich. © National Snow and Ice Data Center

Links: Ausdehnung des arktischen Meereises Anfang September 2008. Orange dargestellt die durchschnittliche Eisbedeckung um diese Zeit. Rechts: 2007 war die Nordwestpassage eisfrei (orange), die Nordostpassage (blau) nur noch teilweise blockiert. © National Snow and Ice Data Center; ESA



Das Eis schmilzt

Arktis und Antarktis nehmen im irdischen Klimasystem eine Schlüsselrolle ein: Schmilzt das Eis an den Polkappen, steigt der Meeresspiegel und große Küstengebiete werden unbewohnbar. Tauen die Dauerfrostgebiete, werden riesige Mengen des in ihnen gespeicherten Klimagases Methan freigesetzt. Wie es um die Polargebiete bestellt ist, hat folglich unmittelbaren Einfluss auf das Leben der Menschheit. Und genau in diesen Regionen zeigt sich der Klimawandel schon heute besonders deutlich: Nirgendwo auf der Welt steigen die Temperaturen deutlicher und schmilzt das Eis schneller.

Das Meereis bedeckt wie eine dünne, weiße Kruste die Polarmeere unseres Planeten. Am Nordpol bildet es einen riesigen schwimmenden „Pseudokontinent“, am Südpol einen eisigen Ring um das antarktische Festland. Doch dieser faszinierende und vielfältige Lebensraum schrumpft. Im Sommer 2007 erreichte die Eisbedeckung der Arktis einen neuen Rekordtiefstand: Das Sommereis im Nordpolargebiet war so weit zurückgegangen wie noch niemals seit Beginn der Satellitenmessungen, das ergaben Daten der Sonde Envisat der ESA. „Die eisbedeckte Fläche ist auf nur noch drei Millionen Quadratkilometer geschrumpft“, erklärte Leif Toudal Pedersen vom dänischen Weltraumzentrum. „Das ist eine Million Quadratkilometer weniger als die vorherigen Minima in den Jahren 2005 und 2006.“ Ein Schrumpfen des arktischen Eises im Nordsommer gehört zwar zum natürlichen Jahreszeitenrhythmus, doch die Satellitendaten belegen, dass sich die Rate des Eisverlusts in den letzten Jahren dramatisch beschleunigt hat.

Dass der Sommer 2007 kein Einzelfall war, zeigte sich Ende August 2008: Das Meereis war erneut so weit geschrumpft, dass seine Fläche nur knapp über dem



*Frisches Meereis nahe Anvers Island in der Antarktis. Dieses saisonale Eis ist besonders stark von der Erwärmung betroffen.
© National Science Foundation/
Zee Evans*

Negativrekord von 2007 lag. Allein im August 2008 nahm die Eisfläche um mehr als zwei Millionen Quadratkilometer ab und erreichte insgesamt die zweitniedrigste Ausdehnung seit Beginn der Messungen. Für die Klimaforscher ist dies ein deutliches Zeichen, dass der Trend zur Erwärmung und Eisschmelze in der Arktis ungebrochen ist. Doch nicht allein die Eisfläche verringert sich, auch die Dicke des arktischen Meereises nimmt mehr und mehr ab. Daten aus Sonarmessungen ergaben zwischen 1987 und 1997 eine Reduktion der Eisdicke um einen Meter, auf ähnliche Werte kommen auch Modellrechnungen der Klimaforscher.

Besonders deutlich wird der Eisverlust an der Nordwestpassage, einer Seeroute, die von der Ostküste Nordkanadas über das Eismeer bis zur Westküste des amerikanischen Kontinents führt. Die normalerweise durch das Meereis versperrte nördlichere Route durch die McClure Strait war im Sommer 2007 nahezu eisfrei. Und auch die Nordostpassage, die von Nordnorwegen durch das russische Eismeer bis nach Asien reicht, war nur noch durch eine kurze Eisbarriere blockiert. Rein wirtschaftlich wäre eine Eisfreiheit der arktischen See sogar ein Vorteil: Viele dort lagernde Rohstoffvorkommen wären leichter zu erreichen und auch die Schiffstransporte, die bisher weite Umwege über südliche Routen nehmen müssen, könnten die kürzeren Nordost- und Nordwestpassagen nutzen.

Doch aus klimatischer Sicht ist offenes Meer auf diesen Routen ein fatales Signal. Denn das Schmelzen des arktischen Meereises verändert nicht nur die lokalen Bedingungen, es wirkt sich auch auf das globale Klima aus. Die Reflexion der Eisdecken wirft normalerweise einen Teil des Sonnenlichts zurück und verhin-



Der kleine Ort Naajaat im Nordwesten Grönlands im Sommer. Reste der Eiskappe sind noch oben links zu sehen.
© Kim Hansen/GFDL

dert so dessen Absorption. Ist jedoch die dunkle Meeresoberfläche freigelegt, absorbiert diese das Sonnenlicht und erwärmt sich. Das wiederum verhindert das Entstehen neuen Eises – ein klimatischer Teufelskreis beginnt.

Grönland: zurück zur grünen Insel?

Auch auf Grönland ist die globale Erwärmung längst harte Realität. Mehr als 80 Prozent Grönlands – gut 1,8 Millionen Quadratkilometer – sind heute noch von einem gewaltigen, bis zu 3.000 Meter mächtigen Eisschild bedeckt. Deutschland könnte man fast fünf Mal in dieser riesigen Eisfläche unterbringen und die Zugspitze würde in ihrer gesamten Höhe darin verschwinden, so immens sind diese Dimensionen. Doch die eisige Landschaft scheint dem Untergang geweiht. Denn Forscher diskutieren heute längst nicht mehr darüber, ob Grönlands Gletscher schmelzen, sondern nur noch, wie schnell.

In den vergangenen Jahren berichteten Glaziologen immer wieder von einer besorgniserregenden Beschleunigung der grönländischen Gletscher: Viele Eisströme bewegen sich immer schneller Richtung Meer und verlieren damit auch immer schneller an Masse, da im Inland nicht genügend Schnee fällt, um für Eisnachschub zu sorgen. So ermittelten Forscher der NASA und der Universität von Kansas sogar eine Verdoppelung des Eisverlusts für das gesamte grönländische Eisschild von 96 Kubikkilometern im Jahr 1996 auf 220 Kubikkilometer im Jahre 2005. Eine weitere Studie beziffert den Verlust zwischen April 2002 und 2006 sogar auf rund 248 Kubikkilometer Eis pro Jahr.

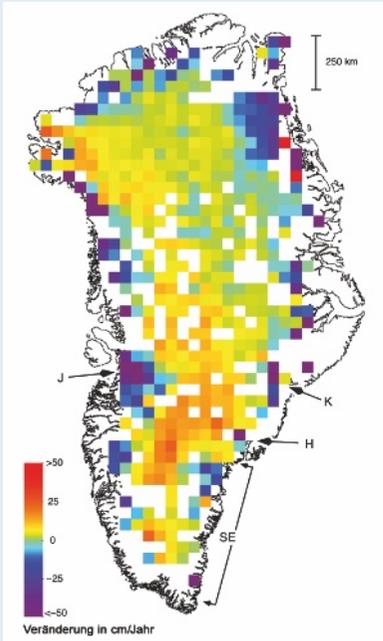
Gleichzeitig scheinen die Gebiete zu wachsen, in denen eine Beschleunigung der Gletscher stattfindet: Während zwischen 1996 und 2000 primär der Südosten Grönlands betroffen war, dehnte sich das Gebiet in der Periode zwischen 2000 und 2005 auch bis in den mittleren Osten und den Westen Grönlands aus. Auch der im



Februar 2007 veröffentlichte IPCC-Bericht bestätigt den grundsätzlichen Trend: „Die Eisschilde auf Grönland und der Antarktis verlieren gegenwärtig Masse durch Schmelzen und Gletscherabbrüche.“ Als konkrete Ursache des Eisverlusts nennen die IPCC-Experten einerseits die Ausdünnung der Schilde und den Verlust von schwimmenden Gletscherzungen. Andererseits gehe das Abschmelzen schneller vonstatten als der Eiszuwachs durch Schneefall.

Dass allerdings das Verhalten der grönländischen Gletscher alles andere als einfach zu erfassen und zu bewerten ist, zeigen inzwischen andere Studien, darunter eine im Februar 2007 in der Fachzeitschrift „Science“ veröffentlichte Studie amerikanischer Glaziologen. Sie stellten fest, dass zwei der größten Eisströme Grönlands zwar zwischen 2004 und 2005 extrem schnell abtauten, inzwischen aber ihre Schmelzgeschwindigkeit wieder normalisiert haben. Möglicherweise, so die Hypothese der Wissenschaftler, seien solche „Pulse“ beschleunigten Schmelzens, aber auch plötzliche Kollapse, typisch für die Klimafolgen in den Polarregionen. „Obwohl sich die Schrumpfungsraten dieser beiden Gletscher wieder stabilisiert haben, wissen wir nicht, ob sie jetzt stabil bleiben werden, wieder anwachsen oder aber in der nahen Zukunft kollabieren“, erklärt Ian Howat, Glaziologe am National Snow and Ice Data Center der Universität von Colorado. „Unsere Hauptidee ist, dass das Verhalten dieser Gletscher sich von Jahr zu Jahr ändert, so dass wir nicht davon ausgehen können, das zukünftige Verhalten aufgrund von gegenwärtigen Veränderungen vorhersagen zu können.“

Nach Ansicht des Forschers könnte die zukünftige Erwärmung eher zu schnellen Pulsen von Vorrücken und verstärktem Schmelzen führen als zu einem langsamen gleichmäßigen Rückzug. Verantwortlich für die jetzt an den beiden Grönland-Gletschern beobachteten Wechsel könnte die sich während des schnellen Abtauens verändernde Form der Eisriesen sein: Sie wurden länger und



Veränderungen der Eisdicke in Grönland (oben, 1996 bis 2005) und in der Antarktis (unten, 1992 bis 2003). Rote bzw. purpurfarbene Dreiecke markieren Eisgebiete, die sich um mehr als 30 Zentimeter pro Jahr verdickt bzw. ausgedünnt haben.
© IPCC 2007, AR4 WG-1

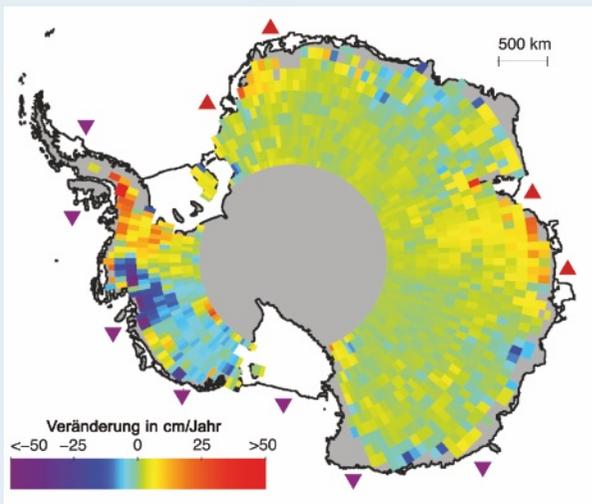
dünnere und die Eisfront, die anfänglich auf dem Wasser schwamm, senkte sich mit zunehmendem Eisverlust wieder ab und bremste so den Eisstrom. Aber inwieweit dieser Prozess auch bei anderen Gletschern zum Tragen kommen könnte, ist noch absolut unklar.

Allzu klar scheint dagegen, dass bei anhaltender Erwärmung das Eis Grönlands irgendwann Geschichte sein wird. Wissenschaftler des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung prognostizierten im Februar 2008 in einer Studie: „Wird aber die kritische Grenze von 3°C lokaler Erwärmung überschritten, könnte der Eisschild schon innerhalb von 300 Jahren abschmelzen. Dies würde den Meeresspiegel um bis zu sieben Meter ansteigen lassen.“ Auch der IPCC-Bericht spricht von einer „vollständigen Elimination des grönländischen Eisschildes“. Allerdings merken auch hier die Autoren an, dass die dynamischen Prozesse im Eis nur unzureichend verstanden sind und daher kein Konsens über ihr Ausmaß herrsche.

Antarktis: Eisverlust im Westen nagt an Gesamtbilanz

Die bis zu 4.000 Meter mächtige Eisdecke der Antarktis ist das größte Eisreservoir der Erde. Doch die Klimaerwärmung sorgt dafür, dass inzwischen selbst im „Gefrierschrank“ unseres Planeten das Eis zu tauen beginnt. Zwar sind die Eismassen im Osten des Kontinents noch weitgehend stabil, die Westantarktis jedoch taut. Das zeigt unter anderem eine im Januar 2008 in der Fachzeitschrift „Nature Geoscience“ veröffentlichte Studie britischer Forscher. Sie hatten Satellitendaten der Eisdecke von rund 85 Prozent der Küstenlinie des Kontinents ausgewertet und diese Daten mit Simulationen der Schneeansammlung über die gleiche Zeitperiode verglichen.

Eingepflegt in ein regionales Klimamodell, ergab sich ein alarmierender Trend: In der Westantarktis waren allein im Jahr 2006 rund 132 Milliarden Tonnen Eis verloren gegangen – erschreckend viel verglichen mit einem Verlust von „nur“ 83 Milliarden Tonnen im Jahr 1996. Um diese Zahlen in eine Perspektive zu bringen: Vier Milliarden Tonnen Eis reichen aus, um die gesamte Bevölkerung Großbritanniens ein Jahr lang mit Trinkwasser zu versorgen“, erklärte dazu Jonathan Bamber von der Universität Bristol.



Doch nicht allein das schiere Ausmaß des Eisverlusts war neu, die Ergebnisse widersprachen auch deutlich bisherigen Modellen und Prognosen, denen zufolge diese Verluste durch einen entsprechenden Zuwachs im Osten und in der Mitte der Antarktis ausgeglichen werden sollen. Stattdessen ist die Gesamtbilanz des antarktischen Eisschildes in den letzten Jahren immer stärker in die roten Zahlen gerutscht: Im Osten kann der Schneefall zwar die regionalen Verluste noch weitgehend kompensieren, doch selbst hier haben die Küstengletscher ihren Abfluss bereits stark erhöht. Und



zum Ausgleich für den rapiden Eisschwund im Westen reicht es nicht mehr. Der Eisverlust des gesamten antarktischen Schildes hat sich in den letzten zehn Jahren dadurch um 75 Prozent beschleunigt.

Gebirge: Gletscher adé?

Aber nicht nur die großen Eisdecken der Polargebiete schrumpfen, auch in den Gebirgen der Erde geht die weiße Pracht zurück. Besonders stark trifft es die Alpen: Hier registrierten die IPCC-Forscher zwischen 1980 und 2001 einen durchschnittlichen Eisverlust von rund 600 Kilogramm pro Quadratmeter und Jahr. 2003 allerdings stieg der Schwund, verursacht unter anderem durch die ungewöhnlich hohen Temperaturen des „Jahrhundertsommers“, plötzlich auf 2.500 Kilogramm pro Quadratmeter – fast das Vierfache – an. Auf dem Rückzug sind auch alle Hochgebirgsgletscher der tropischen Regionen, beispielsweise in den Anden. Die wenigen Gletscher auf den Gipfeln afrikanischer Berge wie dem Kilimandscharo, Ruwenzori oder Mount Kenia sind inzwischen so weit geschrumpft, dass sie kurz vor dem völligen Verschwinden stehen.

Als Ursache sehen Klimaforscher hier neben gestiegenen Temperaturen vor allem einen Wechsel zu deutlich trockenerem Klima. Im Himalaja und in anderen Hochgebirgen Asiens ist das Bild weniger klar. Hier sind zwar die meisten Gletscher ebenfalls mit jeweils unterschiedlicher Geschwindigkeit geschrumpft, einige Gletscher im zentralen Karakoram-Gebirge rückten jedoch vor oder entwickelten dickere Gletscherzungen. Die IPCC-Forscher werten dies als Folge der regional angestiegenen Niederschläge in dieser Region.

Der Boulder-Gletscher im Glacier National Park, USA, fotografiert im Jahr 1932 und 2005. Deutlich ist der Schwund des Eises zu sehen. © Glacier National Park Archives/T.J. Hileman; USGS/ Greg Pederson

Spurensuche auf 88,9° Nord – mit Klimaforschern unterwegs

Seit zwei Stunden dröhnen nun schon die Motoren der Twin Otter in den Ohren, stumm sitzen die Forscher in der engen Maschine. Zum zweiten Mal kreist der Pilot über dem möglichen Landeplatz. Diskutiert mit James Morison, dem Leiter der kleinen Expedition. Zeigt nach unten, wo im Zwielflicht der schräg einfallenden Sonne – nur etwa 100 Meter über Grund – jede Unebenheit furchteinflößend aussieht. Morison kennt sich aus in dieser Gegend. Doch jedes Jahr sieht sie anders aus. Zehn Minuten später rumpelt die Maschine über den unruhigen Boden, bis sie endlich zum Stehen kommt. Applaus, wie in einem Ferienflieger nach Mallorca. Alle sind erleichtert. Die Tür öffnet sich und allen stockt der Atem. So fühlt es sich also an: Windstille bei -40°C. Sie sind am Nordpol! Besser gesagt: 88,9° Nord und 110° Ost.

*Klimaforscher James Morison (links) berät sich mit einem Techniker über das Bergen einer Unterwassersonde in der Nähe des North Pole Environmental Observatory der amerikanischen National Science Foundation.
© Peter West/National Science Foundation*

James Morison von der University of Washington baut mit seinen Kollegen in diesen Apriltagen des Jahres 2000 zum ersten Mal eine automatische Forschungsstation auf einer Eisscholle im arktischen Ozean auf. Versehen mit einem Satellitentelefon als Sender, einer Webcam und einem GPS-Gerät. So stehen die



Forscher rund um die Uhr mit ihrer Station in Verbindung. Können zum ersten Mal über eine ganze Saison die Veränderung des arktischen Meereises verfolgen. Die Station misst Temperatur von Luft, Eis und Wasser, die Feuchte, den Luftdruck, den Wind. Ein Mast wird so verankert, dass er die Schneehöhe und die Dicke des Meereises bestimmen kann. Zum Zeitpunkt der Verankerung ist es über drei Meter mächtig.

Die Forscher machen sich an die Arbeit, beeilen sich, das Flugzeug auszuräumen, denn der Pilot will schnell wieder weg, bevor das Wetter schlechter wird. In fünf oder sechs Tagen wird er sie wieder abholen – Zeit, die die Wissenschaftler brauchen, um die Station aufzubauen. Denn bei -40°C bleibt keiner von ihnen lange an der frischen Luft. Während sich drei Kollegen mit dem Zeltaufbau abmühen, hält ein vierter Wache. Lange wird es nicht dauern, bis der große Weiße auftaucht. Eisbären kennen keine Angst, und gerade wenn sie jetzt mit ihren Jungen unterwegs sind, können sie sehr gefährlich werden. Die Abwehrtaktik der Forscher besteht aus zwei Schritten: Zuerst wird eine Signalpistole abgeschossen, die mit einem lauten Knall und einer Feuerkugel die Bären abschrecken soll. Wenn das nicht hilft und der Eisbär immer dichter kommt, wird scharf geschossen.

Im Laufe der nächsten Wochen und Monate wird diese Eisscholle über den Nordpol hinweggleiten und sich schließlich auf die Framstraße zubewegen. In dieser Meerenge zwischen Spitzbergen und Grönland endet die Drift der meisten Eisschollen, sie treffen dort auf die wärmeren Ausläufer des Nordatlantikstroms, schmelzen und lösen sich schließlich auf. Doch bis dahin werden die Wissenschaftler eine Unmenge an Daten gesammelt haben. Obwohl die Wettersatelliten seit 1979 Daten über die Eisbedeckung der Arktis liefern, sind viele kleine Details noch immer nicht bekannt.

Lange Zeit dachten die Wissenschaftler, dass zum Beispiel die Temperatur unmittelbar am Nordpol auch im Hochsommer nicht auf über 0°C klettern kann. Sie namen an, dass die sommerliche Eisschmelze nur am Rand des arktischen Packeises stattfindet. Umso erstaunter waren Morison und seine Kollegen, als ihre kleine automatische Wetterstation auf der Eisscholle ab Anfang Juli auch positive Temperaturen ins Büro funkte. Es sind zwar nur wenige Zehntelgrad über Null, aber die Sonneneinstrahlung während des Polartages reicht aus, um auch am Nordpol für Tauwetter zu sorgen. Die Webcam liefert eindeutige Spuren von Tauwetter. Mitten auf dem meterdicken Eis bilden sich für wenige Woche große Süßwasserseen. Einige Messgeräte versinken sogar im Schneematsch. Inzwischen werden in jedem Frühjahr, international koordiniert, mehrere solcher automatischen Messstationen auf dem Eis verankert, Meeresbojen driften mit den Schollen teilweise jahrelang über den arktischen Ozean und das russische Polarforschungsinstitut hat sogar eine bemannte Nordpolstation für neun Monate auf die Reise geschickt.



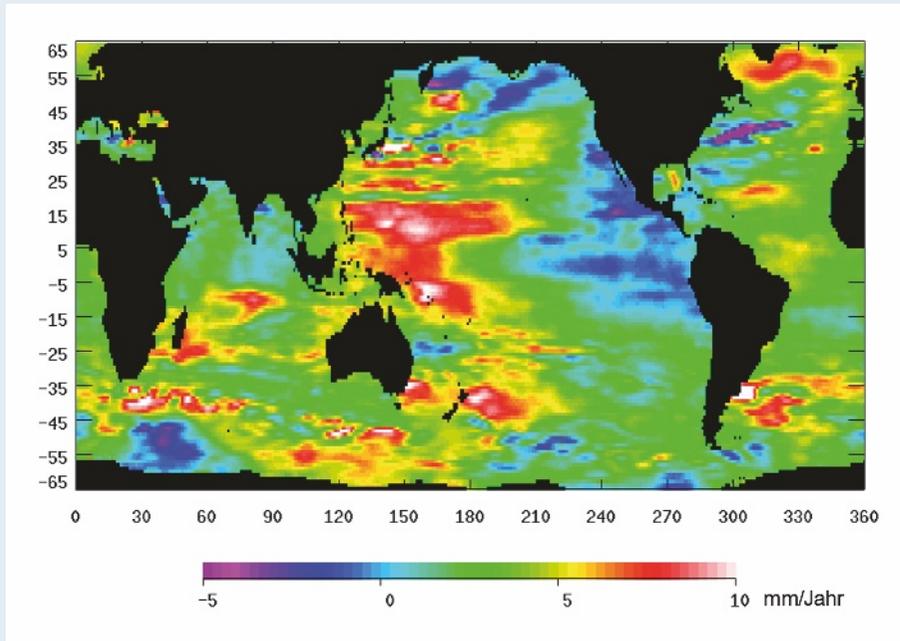
Ein Großteil der Ballungsräume weltweit liegt an den Küsten der Meere, wie hier Alexandria. Der Meeresspiegelanstieg ist für sie eine potenzielle Bedrohung.
© SXC/Alaa Hamed

Meeresspiegel: Tendenz steigend

Die Ozeane speichern in ihrem gewaltigen Wasservolumen mehr als 90 Prozent der Wärme im Klimasystem der Erde. Sie wirken damit als wichtiger Puffer gegen die Auswirkungen des Klimawandels. Andererseits aber bleibt die Erwärmung der Meere nicht folgenlos: Denn das Meerwasser dehnt sich mit zunehmender Temperatur aus. Diese so genannte thermische Expansion trägt entscheidend zum Anstieg des Meeresspiegels bei. Weitere Faktoren sind der Einstrom von Schmelzwasser aus dem Eis der Gletscher und Eiskappen und von Süßwasser aus Flüssen.

Die Veränderungen des Meeresspiegels sind dabei keineswegs immer global. Es gibt auch Faktoren, wie die Meeresströmungen oder den örtlichen Luftdruck, die nur regional wirken und sich im weltweiten Durchschnitt kaum bemerkbar machen. So beispielsweise das alle paar Jahre wiederkehrende El-Niño-Phänomen im tropischen Pazifik. Normalerweise wird warmes Wasser im Westen des Meeres von den westwärts wehenden Passatwinden festgehalten. Die gestauten Wassermassen wölben die Meeresoberfläche so stark auf, dass der Meeresspiegel im Westen um bis zu 150 Zentimeter höher liegt als im Osten. In El-Niño-Jahren werden die Passatwinde schwächer und können das Wasser nicht mehr aufhalten: Unerbittlich strömt dann das warme Meerwasser „bergab“ gen Osten und sammelt sich, meist mit Beginn des Winters, vor der Küste Südamerikas. Hier staut es sich und als Folge steigt nun der Meeresspiegel im Osten des Pazifiks.

Um auch solche regionalen Veränderungen erfassen zu können, wird der Pegelstand der Meere durch ein weltweites Netz von Messstationen gemessen,



Sich erwärmendes Meerwasser und schmelzendes Gletschereis haben die globalen Meeresspiegel zwischen 1993 und 2008 um 4,5 Zentimeter ansteigen lassen. Dieser Anstieg ist jedoch nicht gleichförmig: Die mithilfe von Daten der Satelliten Topex/Poseidon und Jason-1 erstellte Karte zeigt, wo in diesem Zeitraum welche Veränderungen aufgetreten sind.
© NASA/JPL

seit 1993 auch mithilfe von Satelliten. Und diese Daten haben es in sich. Denn sie zeigen, dass der Meeresspiegel seit Mitte des letzten Jahrhunderts allmählich, aber scheinbar unaufhörlich ansteigt – und dies auch dann, wenn nicht gerade ein El Niño die pazifischen Werte durcheinanderwirbelt.

Nach Angaben des IPCC ist der mittlere globale Meeresspiegel von 1961 bis 2003 um rund 1,8 Millimeter pro Jahr angestiegen. Seit 1993 hat sich dieser Trend sogar noch beschleunigt, hier registrieren die Messungen inzwischen sogar 3,1 Millimeter pro Jahr. Insgesamt ergeben die Werte für das 20. Jahrhundert eine Zunahme von rund 17 Zentimetern und übertreffen damit noch die anhand der bekannten Klimafaktoren geschätzten Werte. Möglicherweise jedoch sind diese Daten des IPCC sogar noch zu niedrig.

Denn eine im Juni 2008 in „Nature“ veröffentlichte Studie eines internationalen Forscherteams glich Klimamodelle und tatsächliche Beobachtungen miteinander ab und korrigierte dabei eine kleine, aber ausschlaggebende statistische Verzerrung in den Daten. Das Ergebnis: In den oberen 700 Metern Wassertiefe übertrafen Erwärmung und thermale Ausdehnung des Meerwassers zwischen 1961 und 2003 die IPCC-Werte um rund die Hälfte, in den obersten 300 Metern sogar um deutlich mehr. Noch ist nicht klar, ob sich dieser Trend verfestigt und wie schnell die Entwicklung fortschreitet, Einigkeit herrscht aber darüber, dass der Meeresspiegel mit zunehmender Erwärmung weiter steigen wird.



Ursachen – wer ist schuld am Klimawandel?

Das Klima erwärmt sich – schuld daran sind vor allem die vom Menschen freigesetzten Treibhausgase. © SXC

Das Klima verändert sich – so viel ist klar. Aber wer ist schuld? Diese Frage wird seit Jahren heiß diskutiert. Als Kandidaten waren lange Zeit gleich mehrere Faktoren im Rennen, denn theoretisch wären sowohl natürliche als auch menschengemachte Prozesse als Erklärung denkbar.

Das Klima der Erde ist keine kontinuierliche oder gar gleichbleibende Größe. Ganz im Gegenteil: Die gesamte Erdgeschichte ist durch vielfache Klimaschwünge und -schwankungen gekennzeichnet. Da das Klima überall seine Spuren hinterlässt, in Gesteinen, im Meeresboden oder in den großen Eispanzern der Erde, sind die Paläoklimatologen in der Lage, anhand dieser klimatologischen Fingerabdrücke das Klima der Vorzeit zu rekonstruieren. Auswertungen unter anderem von Sediment- und Eisbohrkernen haben ergeben, dass allein während der letzten 2,3 Millionen Jahre die Klimabedingungen mehr als 20 Mal zwischen Warm- und Kaltzeiten wechselten.

Zwischen den zuletzt etwa 100.000 Jahre andauernden Eiszeiten lagen vergleichsweise kurze Warmzeiten von rund 10.000 bis 20.000 Jahren. Erstaunlicherweise lagen die Temperaturen selbst in den kältesten Eiszeiten unseres Planeten nur wenige Grade unterhalb des heutigen Temperaturmittels von etwa 15°C. Während der Warmzeiten entsprach die Durchschnittstemperatur minde-

stens der heutigen oder sie war sogar noch etwas höher. Schon geringe Veränderungen in der Durchschnittstemperatur können demnach weitreichende Folgen nach sich ziehen. Aber auch innerhalb der Eis- und Warmzeiten blieben die Temperaturen nicht konstant. Vor allem die letzte Eiszeit, als Würm- oder Weichseleiszeit bezeichnet, ist durch mehrmalige kurzfristige Gletschervorstöße und dazwischen liegende Abschmelzphasen gekennzeichnet. Sie überzog vor „erst“ 20.000 Jahren das nördliche Europa mit einem dicken Eispanzer. Über Skandinavien erreichten die Eismassen damals eine Mächtigkeit von drei Kilometern. Seit dieser Zeit hat sich die Erde wieder um mindestens 5 bis 7°C erwärmt, aber auch in der aktuellen Warmzeit traten mehrfache Schwankungen von Temperatur und Niederschlagsmengen auf.

Sonne, Vulkane und Meeresströmungen - natürliche Faktoren

Zwar sind die möglichen Auslöser für das Auf und Ab der Temperaturen im Laufe der Erdgeschichte im Prinzip bekannt, aber welcher der Faktoren konkret einen Umschwung auslöste oder wie sich die zahlreichen, vernetzten Prozesse gegenseitig beeinflussen, ist nicht immer leicht festzustellen. Klar ist, dass astronomische Faktoren wie die Schwankungen der Erdumlaufbahn, das Taumeln der Erdachse (Präzession) und die Zyklen der Sonnenaktivität vor allem für die langen Kältephasen der Eiszeiten eine wichtige Rolle spielten. Sie verringerten die Sonneneinstrahlung auf die Erde und damit auch die Wärme, die dem Planeten von außen zugeführt wird.

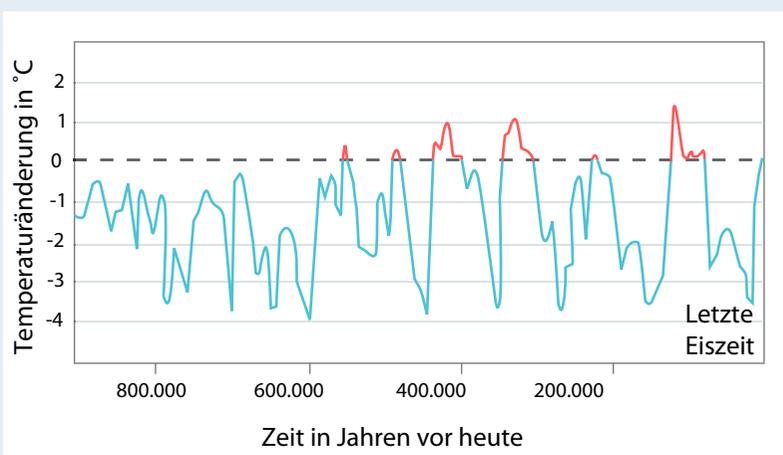
Ein solches Nachlassen der Sonnenaktivität und damit der Intensität der Strahlung wird auch mit dem Auftreten der so genannten „kleinen Eiszeit“ in Mitteleuropa in Verbindung gebracht. Zwischen 1350 und 1850 sanken die Temperaturen hier um rund 1°C und das Klima der Nordhemisphäre verschlechterte sich. In den Alpen erreichten die Gletscher ihre bislang weiteste Ausdehnung. Die Themse und auch der Hafen New Yorks froren zu. Missernten und Hungersnöte beutelten die Menschen.

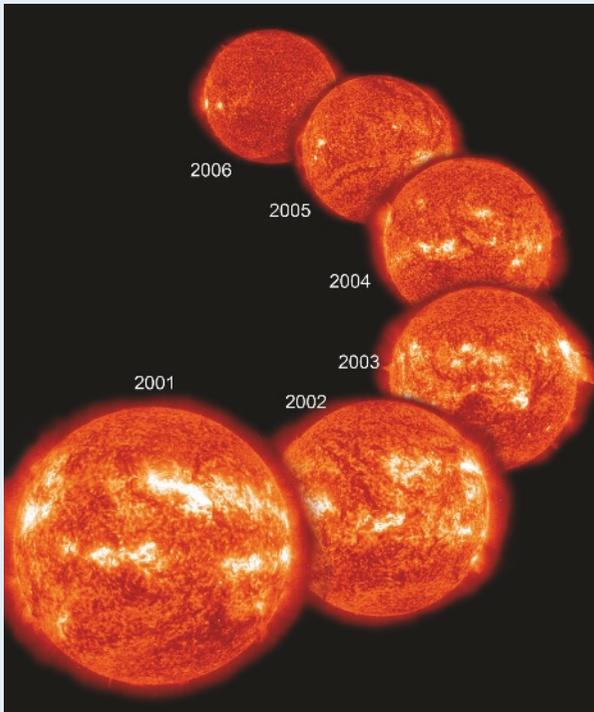
Aber auch Vorgänge auf der Erde selbst können eine Klimaveränderung auslösen. So wirken beispielsweise Staub und Schwebstoffe, die von Vulkanausbrüchen in die Atmosphäre geschleudert werden, wie ein Sonnenfilter und verringern die Menge der Strahlung, die auf den Erdboden gelangt. Der Ausbruch des Vulkans Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991 beispielsweise reduzierte den Sonneneinfall um rund fünf Prozent und ließ die durchschnittlichen Temperaturen der Nordhalbkugel um rund 0,5°C absinken. Umgekehrt



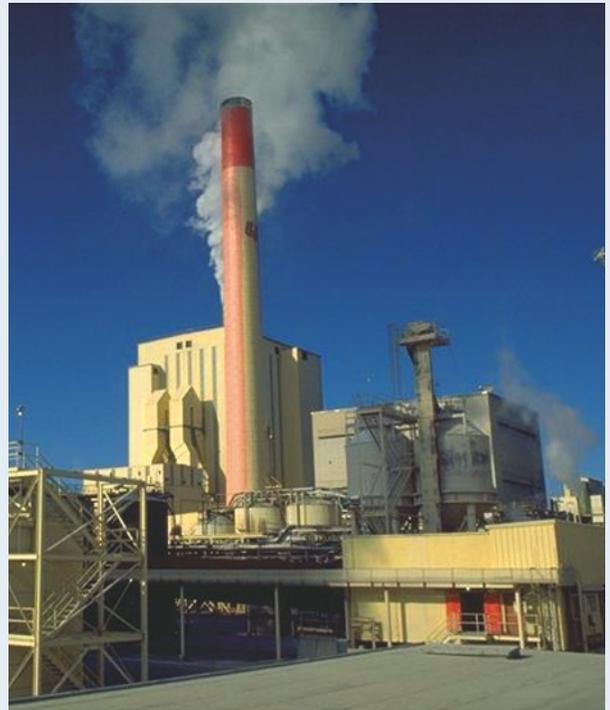
Deutschland erlebte von 600.000 bis 20.000 Jahren vor heute drei große Gletschervorstöße. Die globalen Temperaturen lagen zu dieser Zeit nur wenige Grad unter den heutigen. Dennoch entstand über Skandinavien ein mehr als drei Kilometer dicker Eispanzer. © MMCD

Das Klima der Erde ist keineswegs konstant, sondern schwankte im Laufe der Erdgeschichte. Hier die Temperaturentwicklung der letzten eine Million Jahre. © MMCD





Die Sonnenaktivität hat einen Einfluss auf das Erdklima. Aber dieser ist nur gering im Vergleich zum menschlichen Beitrag beispielsweise durch den Treibhausgasausstoß von Kraftwerken. © NASA/ESA/SOHO; BMU/Oed



können großflächige Veränderungen von Meeresströmungen, wie beispielsweise im Pazifik während einer El-Niño-Saison, für eine Erwärmung des Meeres und der darüberliegenden Luftmassen sorgen.

Für den aktuellen Klimawandel galt lange Zeit die Sonnenaktivität als einer der maßgeblichen Einflussfaktoren. Doch neuere Studien belegen, dass die Schwankungen im Strahlungseinfall der Sonne zu schwach sind, um die globale Erwärmung des letzten Jahrhunderts zu erklären. Rund drei- bis fünfmal stärker hätten die Veränderungen dafür mindestens sein müssen. Zudem zeigen die Messungen mit Satelliten über die letzten 30 Jahre keinen Trend in der Sonnenaktivität, der parallel zur Erwärmung verläuft und so als Antrieb hätte wirken können.

Das IPCC beziffert den so genannten Strahlungsantrieb der Sonne auf rund 0,12 Watt pro Quadratmeter, doch gemessen an anderen Faktoren ist dies geradezu verschwindend gering. Der Strahlungsantrieb gibt die Nettoveränderung in der Strahlungsbilanz der Erde an. Dafür wird im Prinzip die einfallende Sonnenstrahlung mit der wieder abgestrahlten Strahlung verrechnet. Positive Werte kennzeichnen eine Erwärmung, negative eine Abkühlung.

Treibhaus marsch: der Höhenflug des CO₂

Als Hauptkandidat im Spiel der „Heizelemente“ gilt daher heute ein ganz anderer Faktor: das Kohlendioxid. Das geruchslose und unsichtbare Gas ist ein natürlicher



Bestandteil der Atmosphäre. Ohne seine natürliche Treibhauswirkung lägen die Temperaturen unserer Erde nur bei lebensfeindlichen -15°C . Gemeinsam mit dem Wasserdampf und anderen Treibhausgasen sorgt das CO_2 dafür, dass die energiereiche Strahlung von der Sonne den Erdboden erreicht, aber die von diesem reflektierte Wärmestrahlung in der Atmosphäre zurückgehalten wird. Wie eine Wärmedecke oder die Glasscheibe eines Gewächshauses verhindern die Treibhausgase damit ein komplettes Entweichen der Sonnenwärme in das Weltall.

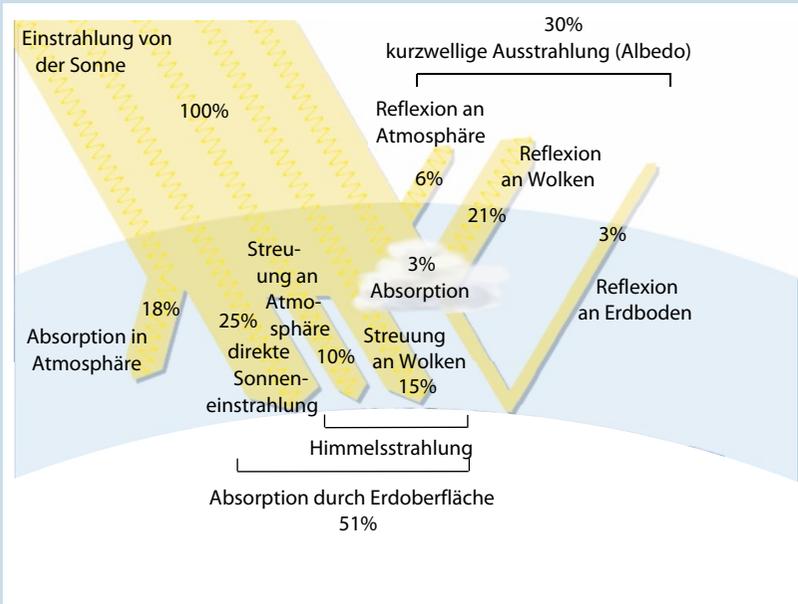
Abgase aus Verkehr und Industrie gehören weltweit zu den Hauptverursachern des anthropogenen Treibhauseffekts.

© SXC

Zu Beginn der Erdgeschichte konnte nur wegen dieses Effekts überhaupt Leben entstehen. Damals war die Sonneneinstrahlung um 25 Prozent schwächer als heute und nur der extrem hohe CO_2 -Anteil der Uratmosphäre ermöglichte lebensfreundliche Bedingungen. Als die Intensität der Sonnenstrahlung später langsam zunahm, gab es bereits genügend Pflanzen auf der Erde, die mit ihrer Photosynthese einen Teil des Kohlendioxids aus der Luft entfernten und so das Klima vor dem Entgleisen bewahrten.

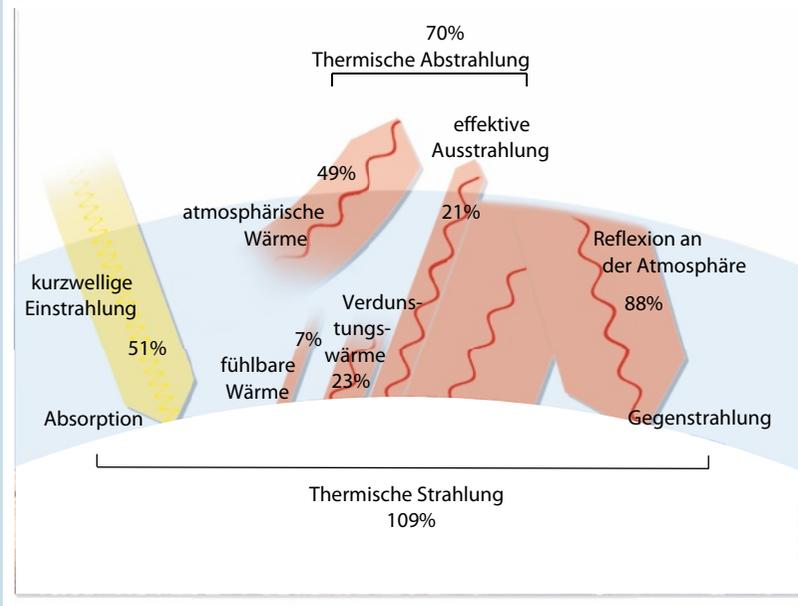
Inzwischen allerdings reicht die ausgleichende Wirkung der pflanzlichen Photosynthese nicht mehr aus. Die globale atmosphärische CO_2 -Konzentration ist heute so hoch wie seit hundertausenden von Jahren nicht mehr. Ihr Anteil liegt bei knapp vier Promille oder 383 parts per million (ppm) im Jahr 2007. Damit ist der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre heute um 28 Prozent höher als jemals zuvor in den letzten 800.000 Jahren. Das ergab im Mai 2008 die Auswertung der Daten aus

Treibhaus Erde - warum unsere Atmosphäre wie ein Gewächshaus wirkt



Die Atmosphäre wirkt ähnlich wie die Glasscheiben eines Gewächshauses: Sie lässt Wärme von außen durch und hält sie im Inneren fest.

Kurzwellige Strahlung von der Sonne (gelb) dringt durch die Lufthülle zur Erdoberfläche, erwärmt diese und wird von dort als langwellige Wärmestrahlung (rot) abgegeben.



Einige Gase in der Atmosphäre, darunter vor allem Kohlendioxid und Wasserdampf, können diese Strahlung absorbieren und dadurch die Wärme in der Atmosphäre halten.

Dieser Treibhauseffekt ist ein ganz natürlicher Prozess. Er hat überhaupt erst die Entstehung von Leben auf unserem Planeten möglich gemacht, denn ohne ihn läge die globale Durchschnittstemperatur nur bei frostigen -15°C .

Der natürliche Treibhauseffekt kann aber durch eine Anreicherung weiterer Treibhausgase verstärkt werden – entsprechend stärker heizt sich dann auch die Atmosphäre auf.

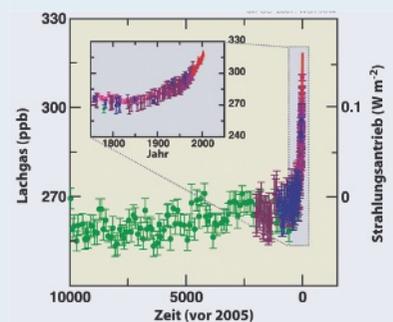
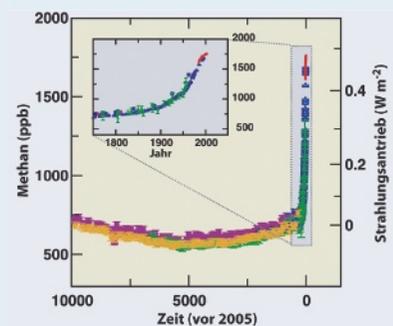
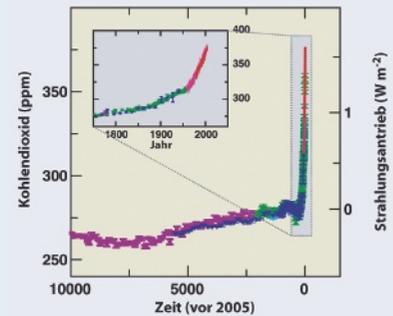
dem ältesten je geborgenen antarktischen Eisbohrkern. Dieser war im Jahr 2004 an der Antarktis-Station „Dome Concordia“ aus einer Tiefe von 3.270 Metern erbohrt worden und enthält die Klimainformation von acht vollständigen Eiszeitzyklen. Dessen nicht genug, ist auch die Geschwindigkeit der heutigen CO_2 -Zunahme rekordverdächtig. Mit zwei ppm seit dem Jahr 2000 ist die CO_2 -Zunahme um 33 Prozent schneller als während der vorhergehenden 20 Jahre. Innerhalb des Jahres 2007 erhöhte sich dieser Wert sogar auf 2,2 ppm – wir können demnach fast schon zuschauen, wie die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre ansteigt.

Woher aber kommt das ganze CO_2 ? Die Hauptquelle dieses Treibhausgases ist der Verbrauch fossiler Brennstoffe: Das Verfeuern von Öl, Erdgas und Kohle setzt den seit Jahrtausenden oder sogar Jahrtausenden in diesen Energieträgern gebundenen Kohlenstoff frei und gibt ihn als CO_2 an die Atmosphäre ab. Durch den zunehmenden Verkehr, Prozesse in der Industrie, aber vor allem die Energieerzeugung in Kraftwerken für Strom und Wärme wird immer mehr Treibhausgas freigesetzt. Und der Energiehunger der menschlichen Gesellschaften wächst stetig. Im Jahr 2007 stieg der weltweite Primärenergieverbrauch um 2,4 Prozent und markierte damit das fünfte Jahr in Folge mit einem überdurchschnittlichen Wachstum.

Ein Großteil des Bedarfs geht dabei auf die rasant wachsende und meist nicht gerade klima- und umweltfreundliche Wirtschaft in den Schwellenländern zurück. So war 2007 allein China für die Hälfte der Zunahmen verantwortlich. Das bevölkerungsreichste Land der Erde nutzt vor allem Kohle als Energieträger und steigert dadurch seine CO_2 -Emissionen um mindestens 2,5, möglicherweise aber sogar um elf Prozent jährlich. Nach Schätzungen einer 2008 erschienenen Studie könnte das Land den bisherigen Spitzenreiter USA mit seinen Emissionen sogar schon überholt haben, sicher ist dies wegen der ungenauen Daten allerdings nicht. In den meisten Industrieländern, darunter auch Japan und die EU, hat sich der Energieverbrauch dagegen trotz anhaltenden Wirtschaftswachstums wieder leicht reduziert. Effektivere und umweltfreundlichere Technologien und Bemühungen zur Energieeffizienz scheinen damit erste Früchte zu tragen. Deutschland ist hier sogar Spitzenreiter: Um 5,6 Prozent sank hier der Energiebedarf im Jahr 2007.

Nicht nur Kohlendioxid: andere Treibhausgase

Aber das CO_2 ist keineswegs das einzige Gas in der Atmosphäre, das den Klimaforschern Sorgen bereitet. Wissenschaftler kennen noch mindestens 38 weitere Gase, die die Treibhauswirkung verstärken. Dazu zählt auch der Wasserdampf – als Luftfeuchtigkeit jedem beispielsweise aus dem Wetterbericht bekannt. Er ist eine natürliche Komponente der Atmosphäre, dessen Konzentration primär durch den ständigen Austausch mit Meeresoberflächen, Gewässern, der Vegetation und anderen Komponenten des Wasserkreislaufs beeinflusst wird. Der Wasserdampfgehalt wird daher vor allem indirekt durch den Menschen beeinflusst, beispielsweise durch Eingriffe in die Vegetation. Obwohl der Wasserdampf zu rund 60 Prozent zum natürlichen Treibhauseffekt beiträgt, spielt er für die gegenwärtige



Atmosphärische Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Lachgas. Dargestellt sind Messungen aus Eisbohrkernen (verschiedene Farben = unterschiedliche Studien) und atmosphärischen Proben (rote Linien). © IPCC 2007, AR4 WG-1



globale Erwärmung eher eine verstärkende als eine auslösende Rolle.

Weitaus potenter ist dagegen das Methan, ein Kohlenwasserstoff, das den Hauptbestandteil von Erdgas, Sumpfgas, aber auch Biogasen bildet. Es hat eine mehr als zwanzigfach höhere Treibhauswirkung als Kohlendioxid und auch sein Anteil in der Atmosphäre ist seit Beginn der Industrialisierung dramatisch angestiegen. 1.774 parts per billion (ppb), Teilchen in einer Milliarde Luftmoleküle, wurden im Jahr 2005 gemessen – das ist mehr als jemals zuvor in den letzten 650.000 Jahren.

Eine der wichtigsten Methanquellen ist die Landwirtschaft. Ein ausgewachsenes Rind kann es zum Beispiel auf einen Methan-Ausstoß von bis zu 300 Litern pro Tag bringen. Weltweit grasen inzwischen mehr als drei Milliarden Wiederkäuer auf den Weiden und tragen so zum Treibhauseffekt bei. Methan wird aber auch aus Reisfeldern, bei Brandrodungen des Tropenwaldes, aus Mülldeponien, Lecks in Erdgasleitungen und Sümpfen freigesetzt. Ebenfalls in der Landwirtschaft und bei Brandrodungen wird Lachgas frei. Das Distickstoffoxid entsteht beispielsweise, wenn Bodenbakterien die in überdüngten Böden reichlich vorhandenen Stickstoffverbindungen unter Sauerstoffmangel zersetzen. Das Gas gehört zu den extrem starken Treibhausgasen – es wirkt 310 Mal stärker als CO_2 . Nach Einschätzung des IPCC sind mehr als ein Drittel aller Lachgasemissionen menschlichen Ursprungs.

Auch Ozon gehört, wenn es in den unteren Schichten der Atmosphäre vorkommt, zu den Treibhausgasen. Während es in der oberen Luftschicht, der Stratosphäre, die schädliche UV-Strahlung der Sonne abfängt, ist es in der tiefer gelegenen Troposphäre eher unerwünscht. Hier trägt es nach den Erkenntnissen der Klimaforscher zur atmosphärischen Erwärmung bei, sein Strahlungsantrieb liegt laut IPCC bei rund 0,35 Watt pro Quadratmeter. Troposphärisches Ozon entsteht überall dort, wo Industrie und Autoverkehr besonders viel Stickoxide und Kohlenwasserstoffe produzieren. Diese Vorläufersubstanzen des Ozons reagieren unter Einfluss des Sonnenlichts in einer photochemischen Reaktion miteinander und bilden dann den so genannten „Sommersmog“.