

Die Veränderung des weltweiten Klimas durch den Menschen findet in den Medien, in der Politik und in der Wissenschaft eine außerordentliche Beachtung. Dieser Beachtung steht allerdings die geringe Erfahrbarkeit des anthropogenen Klimawandels gegenüber.

Das Wissen darüber stammt nicht aus Erfahrung, sondern ist ein Ergebnis Computer gestützter Modellsimulationen, die gegenwärtige Klimaänderungen und Prognosen über unser künftiges Klima erstellen.

Dieses Buch vermittelt den Stand der Forschung und legt gesicherte Erkenntnisse begründet dar. Es will ferner Entscheidungsgrundlagen für eigenes Handeln und Verhalten liefern.

ISBN 3-623-00856-7

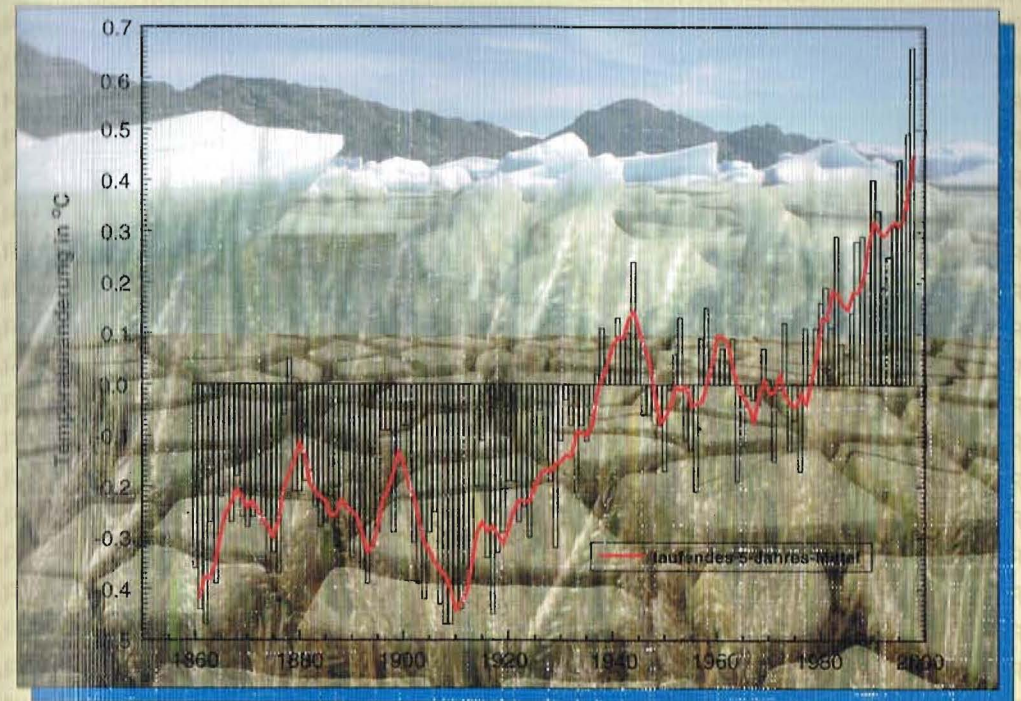


9 783623 008561

Anthropogener Klimawandel

Ulrich Cubasch und Dieter Kasang

HS 2241



Ulrich Cubasch  
Dieter Kasang

## Anthropogener Klimawandel

Klett



KLETT-PERTHES



Perthes GeographieKompakt

Ulrich Cubasch  
Dieter Kasang

# Anthropogener Klimawandel



**KLETT-PERTHES**  
Gotha und Stuttgart

Cubasch, Ulrich:  
Anthropogener Klimawandel / Ulrich Cubasch ; Dieter Kasang. – 1. Aufl. – Gotha:  
Klett-Perthes, 2000  
(Perthes Geographie kompakt)  
ISBN 3-623-00856-7



ISBN 3-623-00856-7  
1. Auflage

© Justus Perthes Verlag Gotha GmbH 2000  
Alle Rechte vorbehalten

Redaktion: Stephan Frisch  
Grafik: Norbert P. Noreiks, Hamburg  
Druck und buchbinderische Verarbeitung: Druckhaus Th Müntzer, Bad Langensalza

<http://www.klett-verlag.de/klett-perthes>

Gedruckt auf Papier aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff

## Inhaltsverzeichnis

Einleitung	5	<b>3. Prognosen</b>	22
<b>1. Klimaänderungen</b>	8	3.1 Stehen wir vor einer Klimawende?	22
1.1 Temperaturzunahme im 20. Jahrhundert	8	3.2 Szenarien und Prognosen	22
1998: die höchste globale Durchschnittstemperatur seit über 100 Jahren!	8	3.3 Das Klima im 21. Jahrhundert	24
Räumliche und zeitliche Muster der Erwärmung	9	Die globale Durchschnittstemperatur	24
1.2 Ein Blick in die Klimageschichte	10	Regionale Veränderungen im 21. Jahrhundert	26
Die Eiszeit	10	<b>4. Klimasystem und Treibhauseffekt</b>	30
Das Holozän	11	4.1 Das Klimasystem	30
Warme Klimaperioden	11	Wetter und Klima	30
Kältere Klimaperioden	12	Das Klimasystem und seine Subsysteme	30
Das wärmste Jahrhundert seit 1000 Jahren	12	Sonnenenergie und Atmosphäre	30
<b>2. Verändert der Mensch das globale Klima?</b>	14	Der Ozean	31
2.1 Natürlich oder anthropogen? Vom Opfer zum Täter?	14	Eis und Schnee	32
Das Signal vom Rauschen trennen!	14	Die Biosphäre	33
2.2 Natürliche Ursachen	14	Boden und Gestein	33
Veränderungen der Erdbahnparameter	14	Externe und interne Klimafaktoren	34
Aktivitäten auf der Sonne	15	Zeitskalen	34
Vulkanausbrüche	15	4.2 Der Stockwerkaufbau der Atmosphäre	35
Ozean-Atmosphäre-Variabilität	15	Das Temperaturprofil der Atmosphäre	35
2.3 Der Nachweis einer anthropogenen Klimaänderung	16	Die Zusammensetzung der Atmosphäre	35
Die Erwärmung im 20. Jahrhundert – ein natürliches Phänomen?	16	4.3 Der Treibhauseffekt	37
Der anthropogene „Fingerabdruck“ der Erwärmung	18	Der Strahlungshaushalt der Atmosphäre	37
Den Fingerabdruck erkennen	18	Der natürliche Treibhauseffekt	38
Verbesserte Klimamodelle	19	Der anthropogene Treibhauseffekt	40
Der Nachweis eines Signals	19	<b>5. Treibhausgase und Aerosole</b>	45
Das Muster der Erwärmung: die Frage der Zuordnung	20	5.1 Kohlendioxid	45
		Der Anstieg der CO <sub>2</sub> -Konzentration	45
		Der Kohlenstoffkreislauf	48

Der natürliche Kohlenstoff- kreislauf	48	Das Jüngere Dryas-Ereignis	82
Der anthropogene Kohlenstoffkreislauf	49	Rückkopplungsprozesse	83
5.2 Methan	51	Der Golfstrom im Treibhausklima	85
Der Anstieg der Methan- Konzentration	51	6.3 El Niño	86
Methan-Quellen	52	Das Ereignis	86
Methan-Senken	54	Die Folgen	87
5.3 Distickstoffoxid (Lachgas)	55	Die Zirkulationsverhältnisse	91
5.4 FCKW und Ozon	57	In normalen Jahren	91
Die Treibhauswirkung von FCKW und Ozon	57	In El-Niño-Jahren	92
Ozon-Zerstörung in der Stratosphäre	59	Eine Erklärung	92
Bedeutung und Verteilung von stratosphärischem Ozon	59	El Niño und der anthropogene Treibhauseffekt	97
Natürliche Ozonchemie	60	<b>7. Klimamodelle</b>	98
Anthropogene Ozonchemie	63	7.1 Wozu Klimamodelle?	98
Die Entstehung des Ozonlochs	64	7.2 Was sind Klimamodelle?	100
Beobachtungen zur Ozon-Zerstörung	66	Die Modellkomponenten	100
Der Sommersmog in der Troposphäre	68	Räumliche Auflösung	102
5.5 Aerosole	70	Global	102
Bedeutung	70	Regional	103
Entstehung und chemische Umwandlung	71	7.3 Anwendung und Ergebnisse	106
Klimatische Wirkung	72	Das gegenwärtige Klima	106
<b>6. Ozean und Klima</b>	74	Die natürliche Klimavariabilität	106
6.1 Die Rolle des Ozeans im Klimasystem	74	Das künftige Klima	107
6.2 Das große marine Förderband	75	7.4 Probleme von Klimamodellen	107
Sein Verlauf	75	Die Flusskorrektur	107
Seine Ursache	77	Das Kaltstart-Problem	108
Seine klimatischen Folgen	79	Rückkopplungen	109
Seine Stabilität	81	Probleme bei der Bestimmung der Antriebsfaktoren	109
Bleibt der Golfstrom aus?	81	7.5 Fazit	110
		<b>8. Ausblick</b>	112
		<b>Benutzte Literatur</b>	114
		<b>Internetseiten</b>	118
		<b>Index</b>	119

## Einleitung

Am Ende des 20. Jahrhunderts hat sich das Verhältnis des Menschen zum Klima in bemerkenswerter Weise gewandelt. Die jahrhundertlang in der Wissenschaft und in populären Erklärungsversuchen herrschende Vorstellung, dass das Klima als etwas extern vorgegebenes das menschliche Befinden, seine Gesundheit, seine Lebensweise, ja sogar ganze Zivilisationen entscheidend beeinflusst,<sup>1</sup> ist abgelöst worden durch die die Forschung wie die Öffentlichkeit bestimmende Diskussion über eine anthropogene Klimaänderung mit globaler Dimension. Es gilt heute nicht mehr als ausgemacht, dass bei Hitzewellen, Dürren, Überschwemmungen oder Stürmen, der Mensch nur den Gewalten der Natur ausgesetzt ist; vielmehr wird in den Naturgewalten ein menschlicher Anteil vermutet oder gar als erwiesen angesehen. Das Verhältnis zwischen Mensch und Klima wird somit nicht mehr als kausale Einbahnstraße wahrgenommen, sondern als unübersichtlich gewordene Wechselwirkung und ist damit im Bewusstsein von Wissenschaft und Öffentlichkeit offensichtlich einem ähnlichen Wandel unterworfen wie andere grundlegende Eigenschaften der modernen Industriegesellschaft.

Für namhafte Vertreter der Soziologie geht mit dem Ende des 20. Jahrhunderts eine historische Epoche zu Ende, die Epoche der Moderne, der Aufklärung, der staatlichen Organisation und der arbeitsteiligen Industriegesellschaft, die im modernen Sozialstaat ihren Höhepunkt gefunden hat, und es kündigt sich eine neue Epoche jenseits des Nationalstaats an, für die Globalität, Unübersichtlichkeit, Unordnung und die Virtualität der Telekommunikationsmedien die bestimmenden Merkmale sind.<sup>2</sup> In diesem Kontext hat auch die Beziehung des Menschen zur Natur durch die zunehmende ökologische Problematik eine neue Qualität angenommen. Die Ordnung der Moderne mit ihrer eindeutigen Trennung zwischen Natur und Kultur, in der die kulturelle Tätigkeit des Menschen die Natur als Ressource auffasste, wird abgelöst durch eine neue Unordnung vielfältiger Wechselbeziehungen zwischen natürlichen und kulturellen Phänomenen. Bereits die Entdeckungen der Quantenphysik haben im mikrophysikalischen Bereich bewusst gemacht, dass die Betrachtung das Betrachtete selbst verändert. Die komplexen Veränderungen der natürlichen Umwelt durch menschliche Aktivitäten zeigen in der Welt der Erfahrungen, dass der Wirkungszusammenhang zwischen Natur und Mensch nicht mehr linear zu verstehen ist. Die Natur ist nicht mehr nur die Bedingung für die Existenz des Menschen und bestimmt als Bedrohungs- oder Ressourcenpotential einseitig sein Wohlbefinden und sein Schicksal. Der Mensch wirkt auf die Natur zurück und die durch ihn verursachten Veränderungen der Natur wirken wiederum auf ihn, was den Menschen dann zu weiteren Veränderungen der Natur veranlasst. Auf diese Weise entstehen Rückkopplungsprozesse, deren Ergebnisse kaum noch festzumachen sind, sondern sich weitgehend in Unübersichtlichkeiten verlieren. In diesem Sinne sind Umweltprobleme und insbesondere das anthropogene Klimaproblem ein typisches Phänomen der „re-

<sup>1</sup> STEHR, N. und H. v. STORCH (1999): Klima, Wetter, Mensch. München, S. 45 ff.; die Verfasser machen allerdings auch darauf aufmerksam, dass es bereits um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert eine kurzfristige wissenschaftliche Diskussion um den menschlichen Einfluss auf das Klima gegeben hat (ebd., S. 62 ff.).

<sup>2</sup> Vgl. etwa HABERMAS, J. (1995): Die Neue Unübersichtlichkeit. Frankfurt a. M.; HABERMAS, J. (1998): Die postnationale Konstellation. Politische Essays. Frankfurt a. M.; BECK, U. (1986): Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne, Frankfurt a. M.; BECK, U. (1997): Was ist Globalisierung?. Frankfurt a. M.; MENZEL, U. (1998): Globalisierung versus Fragmentarisierung. Frankfurt a. M.



flexiven Modernisierung“.<sup>1</sup> Reflexive Modernisierung meint das Fragwürdig-Werden der geradlinigen Modernisierung der Industriegesellschaft durch deren eigene Nebenfolgen. Gerade der Siegeszug der industriellen Moderne hat jene ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgen hervorgebracht, die als Umweltbelastung, Arbeitslosigkeit oder Finanzkrisen die unreflektiert auf Wachstum setzende Industriegesellschaft zunehmend in Frage stellen. Eine blinde „Weitermodernisierung hebt die Grundlagen industriegesellschaftlicher Modernisierung auf.“<sup>2</sup> Gerade die Ausblendung der ökologischen Frage etwa verschärft die ökologische Krise. Die moderne Gesellschaft ist daher um ihres Überlebens willen gezwungen, sich selbst zu hinterfragen, sich der eigenen Dynamik und ihrer Folgen bewusst zu werden. Der anthropogene Treibhauseffekt stellt ohne Zweifel eine beispielhafte Nebenfolge der rasanten Entwicklung der Industriegesellschaft und ihres explosionsartig wachsenden Energiekonsums dar.<sup>3</sup> Die menschengemachte Klimaänderung hat sich gleichsam schleichend und zunächst unbemerkt hinter dem Rücken der Industriegesellschaft ereignet. Sie ist eine der Nebenfolgen, die nicht eingeplant waren in dem fortschrittsgläubigen Konzept der modernen Wachstums- und Konsumgesellschaft. Nur durch einen sich auf deren Nebenfolgen beziehenden reflexiven Akt der Wissenschaft konnte sie überhaupt erst ans Tageslicht geholt werden.

Inzwischen findet die Veränderung des weltweiten Klimas durch den Menschen wie wohl keine andere Umweltveränderung in den Medien, in der Politik und in der Wissenschaft eine außerordentlich starke Beachtung. Für kaum ein ungewöhnliches Wetterereignis versäumen es die Massenmedien, den anthropogenen Treibhauseffekt verantwortlich zu machen. Zu keinem anderen Umweltproblem hat es auch nur annähernd vergleichbare politische Reaktionen gegeben, wie sie die bisher fünf Weltklimakonferenzen von Rio de Janeiro 1992, Berlin 1995, Kioto 1997, Buenos Aires 1998 und Bonn 1999 darstellen. Die öffentliche Bedeutung des Themas fördert aber unübersehbar auch seinen Stellenwert in der Wissenschaft. So sucht der durch die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) konstituierte Zusammenschluss der führenden Klimaforscher der Welt im Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), der in Abständen von einigen Jahren den Stand des wissenschaftlichen Wissens zum anthropogenen Treibhauseffekt in gewichtigen Publikationen zusammenträgt,<sup>4</sup> in der modernen Wissenschaftsgeschichte wohl seinesgleichen.

Der großen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Beachtung des anthropogenen Klimawandels steht allerdings seine geringe Erfahrbarkeit gegenüber. Was wir über den vom Menschen verursachten Klimawandel wissen, stammt (zumindest gegenwärtig) nicht aus der Erfahrung, sondern ist bestenfalls ein „wissenschaftliches Konstrukt“, genauer ein Konstrukt Computer gestützter Modellsimulationen, die in einer Art Ersatzrealität gegenwärtige Klimaänderungen und ihre Ursachen sowie Prognosen über das künftige Klima erstellen.<sup>5</sup> Anders als viele andere Nebenfolgen der Industrie-Moderne wie Arbeitslosigkeit oder Woh-

<sup>1</sup> BECK, U., A. GIDDENS und S. LASH (1996): Reflexive Modernisierung. Frankfurt a. M.

<sup>2</sup> ebd., S. 50

<sup>3</sup> Zum Klimawandel im Kontext der „reflexiven Modernisierung“ vgl. auch BECHMANN, G. u.a. (1996): Sozialwissenschaftliche Konzepte einer interdisziplinären Klimawirkungsforschung. Karlsruhe, S. 34 ff.

<sup>4</sup> Die wichtigsten Berichte zum Wissensstand über den Klimawandel sind HOUGHTON et al. (1990): Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Cambridge; HOUGHTON et al. (1992): Climate Change 1992. Cambridge; HOUGHTON, J. T. et al. (1996): Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge; ein Nachfolgebericht ist in Arbeit; weitere Berichte sind zu den Folgen des Klimawandels und den möglichen Maßnahmen erschienen

nungsnot, die Verschmutzung von Gewässern oder der Luft ist das anthropogene Treibhaus-Problem nicht aus der Alltagserfahrung abgeleitet, sondern von der Wissenschaft entdeckt und in der Wissenschaft ausdifferenziert worden. Was davon aus dem wissenschaftlichen Raum nach außen, in die Gesellschaft, dringt, unterliegt vielfältigen Transformationsprozessen durch Medien, Bildungseinrichtungen oder die Politik. Daraus bildet sich eine neue Vorstellung über das Klimaproblem, das „soziale Konstrukt“ des anthropogenen Klimawandels. Die gesellschaftliche Wahrnehmung des Klimawandels kann sich von der wissenschaftlichen Erkenntnis weit entfernen. Sie kann sie bis zur Katastrophe überzeichnen wie in der verbreiteten Meinung, dass ‚die Pole abschmelzen‘ und dadurch der Kölner Dom im Meer versinken würde; sie kann sie verzerren und verfälschen wie in der Vorstellung, dass die anthropogene Erwärmung durch das Ozonloch verursacht werde; sie kann sie gänzlich leugnen, da die Erfahrung keine Veränderung des Klimas belege; oder sie kann sie bei jedem extremen Wetterereignis voreilig bestätigt finden.

Dieses Buch will dazu beitragen, den Abstand zwischen dem wissenschaftlichen und dem sozialen Konstrukt des menschengemachten Treibhauseffekts zu verringern. Mit seiner Veröffentlichung ist die Hoffnung verbunden, all jenen eine wissenschaftliche Grundlage ihrer Kenntnisse anbieten zu können, die im Bildungssektor oder in der Öffentlichkeitsinformation Wissen über den Klimawandel vermitteln bzw. es z. B. in der Agenda-21-Arbeit als Entscheidungsgrundlage für ihr eigenes Handeln und Verhalten brauchen. Das Buch möchte damit vor allem der – keineswegs als wichtig und sinnvoll bestrittenen – Vermittlung des Themas in den Massenmedien, die notwendig ihren eigenen Vermarktungsgesetzen folgt,<sup>6</sup> ein Korrektiv entgegensetzen, das den Stand der Forschung dokumentiert, gesicherte Ergebnisse begründet darlegt und das weiterhin vorhandene Feld des Nicht-Wissens bewusst macht. Die Autoren stützen sich bei dieser nicht einfachen Aufgabe größtenteils auf jene wissenschaftliche Literatur, die auch den IPCC-Berichten zugrundeliegt, und folgen dem Mainstream der Forschung.

Entstanden ist das Werk aus der Kooperation zwischen einem Wissenschaftler (ULRICH CUBASCH) und einem Lehrer (DIETER KASANG), die seit mehreren Jahren am Deutschen Klimarechenzentrum und Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg mit dem Ziel zusammenzuarbeiten, aktuelle Forschungsergebnisse über den anthropogenen Treibhauseffekt für den Bildungssektor aufzuarbeiten. Die Arbeit an dieser Thematik wurde durch die Hamburger Schulbehörde, das Alexander-von-Humboldt-Gymnasium in Hamburg und zahlreiche Personen der beiden wissenschaftlichen Institute ermöglicht und gefördert, denen wir hier herzlich danken möchten. Insbesondere gilt unser Dank Reiner Schmitz, Uwe Heinrichs, Herbert Hollmann, Krista Ernst-Fischer und Jürgen Marek für die organisatorische Unterstützung der Arbeit, Ernst Maier-Reimer, Martin Heimann, Josef Oberhuber, Reinhard Voß, Johann Feichter, Hans Luthardt für die fachliche Beratung, Marion Grunert und Norbert No-reiks für die Herstellung und Bearbeitung zahlreicher Abbildungen, Jörg Wegner und Hans-Hermann Winter für technische Hilfe und Theda Schuhmann und Cornelia Cubasch für die sprachliche Durchsicht des Manuskripts.

<sup>5</sup> BECHMANN, G. u.a. (1996): Sozialwissenschaftliche Konzepte einer interdisziplinären Klimawirkungsforschung. Karlsruhe, S. 126; STORCH, H. v. (1999): Das Klimasystem und seine Modellierung. Eine Einführung. Berlin, Heidelberg, S. 124

<sup>6</sup> Vgl. dazu die selbstkritische Darstellung eines Journalisten: BIEBER, H. (1997): Wahrheit und Wahrnehmung, – Die Kluft zwischen wissenschaftlicher Erkenntnis und publizistischer Vermarktung, in: BARZ, W. u.a.: Globale Umweltveränderungen. Symposium am 17. und 18. Juni 1996 in Münster, S. 233–242



# 1. Klimaänderungen

## 1.1. Temperaturzunahme im 20. Jahrhundert

### 1998: die höchste globale Durchschnittstemperatur seit über 100 Jahren!

Seit es verlässliche instrumentelle Messungen gibt, d.h. seit etwa 1860, war die bodennahe globale Durchschnittstemperatur der Erde nie so hoch wie im Jahr 1998. Bis dahin hatten das Jahr 1997 und davor 1995 und 1990 den Rekord gehalten. Aber auch die Jahre 1996, 1991 und 1994 übertreffen noch die globalen Mittelwerte aller früheren Jahre seit 1860, so dass die sieben wärmsten Jahre in diesem Jahrhundert alle in den 90er Jahren liegen.

Abb. 1.1 lässt erkennen, dass die aus dem Mittel aller Messstationen gewonnene globale Durchschnittstemperatur 1998 um 0,66 °C über dem Wert der Jahre 1951–1980 lag. 1990 war die Jahresdurchschnittstemperatur um 0,4 °C, 1995 um 0,44 °C und 1997 um 0,49 °C höher als das langjährige Mittel. Nur die relativ niedrigen, durch den Ausbruch des philippinischen Vulkans Pinatubo bedingten Temperaturen von 1992 und 1993 werden von früheren Werten übertroffen. Die Temperaturen vor 1910 lagen im Durchschnitt um 0,3 °C unter dem hier zugrunde gelegten Mittel. Vergleicht man die Mittelwerte über mehrere Jahre, erhält man einen Temperaturanstieg von etwa 0,6 °C in den vergangenen 100 Jahren. Dabei zeigen sich zwei Perioden mit einer deutlichen Temperaturzunahme: von 1910 bis Mitte der 40er Jahre und von 1976 bis 1998. Demgegenüber weisen die Perioden 1860–1910 und 1945–1975 keinen auffälligen Trend auf. Der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert vollzog sich also in zwei Schüben.

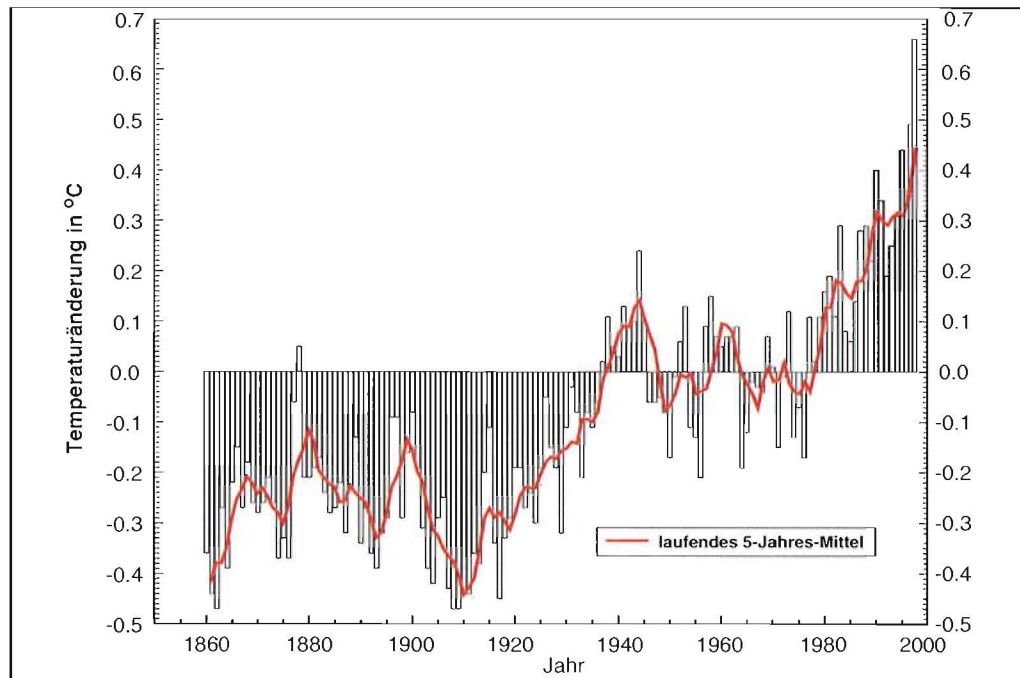


Abb. 1.1: Veränderung der globalen Mitteltemperatur 1860-1998  
(Quelle: MPI/DKRZ)

### Räumliche und zeitliche Muster der Erwärmung

Der hohe globale Mittelwert der 90er Jahre verteilt sich regional durchaus verschieden. Teile Sibiriens wiesen 1995 mit +3 °C die stärkste Abweichung vom Durchschnitt auf. Auch in Westeuropa gab es eine deutliche Anhebung des Mittelwertes. So lag die Durchschnittstemperatur für 1995 in den Niederlanden um 1 °C über dem Mittel von 1901–1987. Viele Stationen zeigten zudem außergewöhnlich hohe Extremwerte. In Mittelengland wurden im Juli und August mit 34 °C die höchsten Temperaturen seit 1659 gemessen. Auch das südliche Spanien wartete im Juli 1995 mit einer Rekordhitze von 47 °C in Sevilla und Cordoba auf. Im August 1998 wurden mit knapp über 40 °C an der Mosel die höchsten je gemessenen Temperaturen in Deutschland erreicht. Dagegen wiesen Grönland und der angrenzende Nordwest-Atlantik ähnlich wie die mittleren Breiten des Pazifik 1995 eine Abkühlung auf.

Betrachtet man längere Zeiträume, so ergeben sich charakteristische räumliche Muster in der Temperaturveränderung: Die Erwärmung ist stärker über dem Land, insbesondere über den großen Kontinentalmassen, als über dem Meer, das sich z.T. sogar abkühlt. Sie zeigt die höchsten Werte über Sibirien und Kanada, allgemein über den Kontinenten zwischen 40° und 70° nördlicher Breite. Über dem nordwestlichen Nordatlantik und über den mittleren Breiten des Pazifiks nahm die Temperatur ab. Ein weiteres Charakteristikum ist die stärkere Erwärmung über höheren Breiten im Vergleich zu den äquatornahen Zonen, in denen es auch über dem Land teilweise etwas kühler wurde. Neben dem horizontalen zeigt der Temperaturwandel der letzten Jahrzehnte auch ein charakteristisches vertikales Muster. So steht im Kontrast zu der Zunahme der bodennahen Temperatur eine Abnahme der Temperatur in der unteren Stratosphäre (in 17–22 km Höhe). Radiosonden- und Satellitenmes-

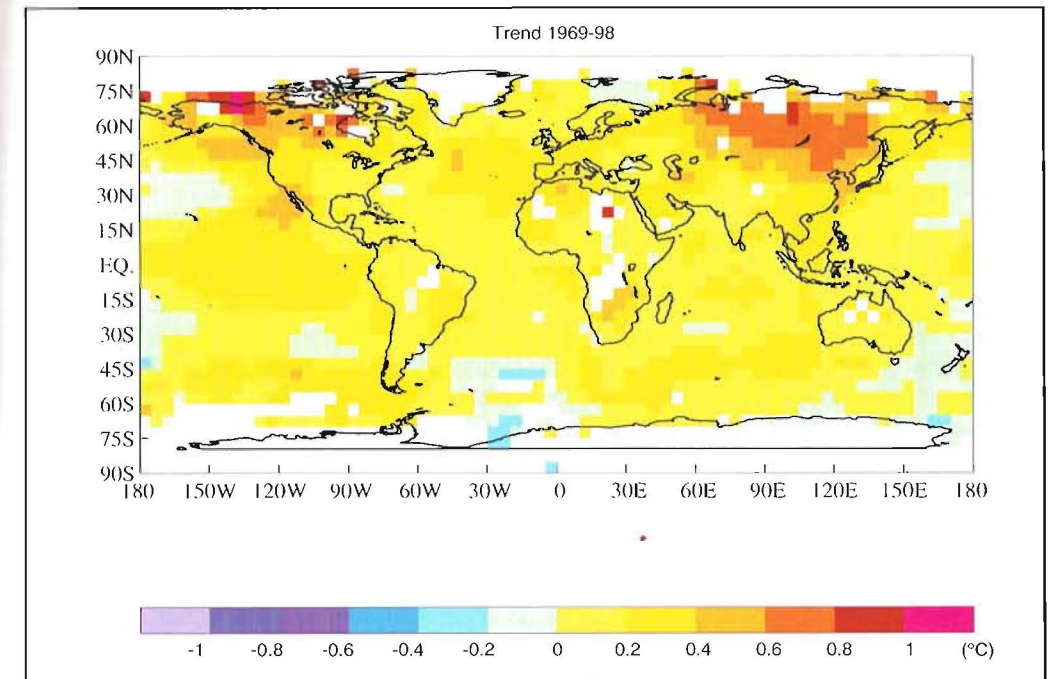


Abb. 1.2: Veränderung der globalen Sommertemperatur 1948-1997 in °C pro Jahrzehnt  
(Quelle: MPI/DKRZ; für die weißen Flächen liegen nicht genügend Daten vor)



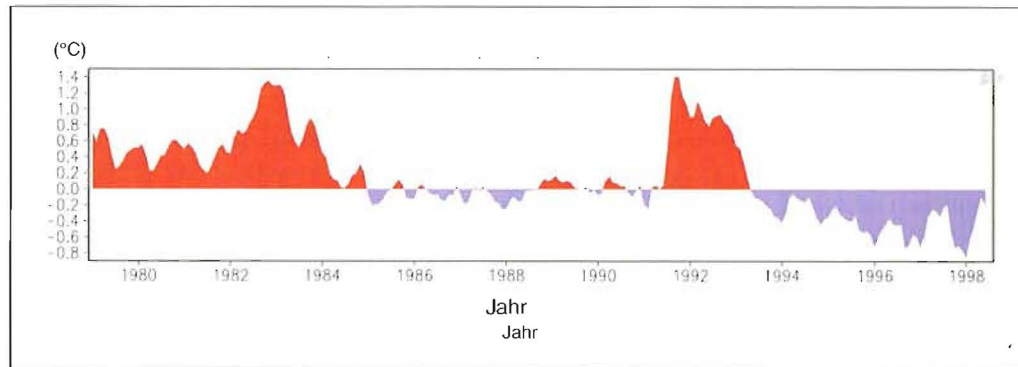


Abb. 1.3: Temperaturveränderung der unteren Stratosphäre (Quelle: MPI/DKRZ)

sungen ergeben eine Abkühlung von  $-0,35$  °C pro Jahrzehnt seit den 70er Jahren. Seit Beginn der Messungen war die Temperatur in der unteren Stratosphäre nie so niedrig wie in den letzten Jahren.

Abb. 1.3 zeigt die Abweichungen der globalen Mitteltemperatur in der unteren Stratosphäre vom Durchschnitt der Jahre 1979–1998. Der generelle Trend der Temperaturabnahme wird unterbrochen durch zwei markante, aber kurzfristige Erwärmungen, die durch die Vulkanausbrüche des El Chichon 1982 und des Mt. Pinatubo 1991 verursacht worden sind.

Immer mehr Daten deuten darauf hin, dass sich die Erwärmung der letzten Jahrzehnte stärker durch eine Anhebung der Minimal- als der Maximaltemperaturen vollzieht. Daraus ergibt sich vor allem eine Abschwächung des Unterschieds zwischen Tag- und Nachttemperaturen. In den meisten Fällen wird diese Verminderung des Tag-Nacht-Gegensatzes durch eine kräftigere Erhöhung der Nacht-Temperaturen bewirkt.

## 1.2. Ein Blick in die Klimageschichte

### Die Eiszeit

Ein Blick in die Vergangenheit bis in die letzte Kaltzeit und davor zeigt: Klimaänderungen hat es seit jeher gegeben und anscheinend auch extreme Veränderungen innerhalb von Jahrzehnten. Während der letzten Kaltzeit, als die Gletscherzungen des skandinavischen Inlandeis große Teile Norddeutschlands bedeckten, war es im globalen Mittel etwa  $4$  °C kälter als heute. In der Übergangsphase dieser Klimaepoche zur gegenwärtigen Warmzeit, die etwa vor 11 000 Jahren begann, gab es heftige Temperaturschwankungen von  $5$ – $7$  °C in wenigen Jahrzehnten, die die Änderungen der letzten 100 Jahre bei weitem übertrafen. Allerdings hat man Belege dafür bislang nur regional, d. h. auf Grönland und in der Nordatlantik-Region, gefunden. Wahrscheinlich ereigneten sich solche Klimawechsel aber auch in der letzten Kaltzeit selbst und möglicherweise auch in der Warmzeit davor, der Eem-Warmzeit. Demgegenüber weisen die letzten 10 000 Jahre, d. h. die gegenwärtige Warmzeit, ein ausgesprochen stabiles Klima auf. Dennoch hat es auch in der Nacheiszeit immer wieder Phasen gegeben, in denen die globalen Durchschnittstemperaturen über einen längeren Zeitraum um ein halbes Grad oder mehr geschwankt haben.

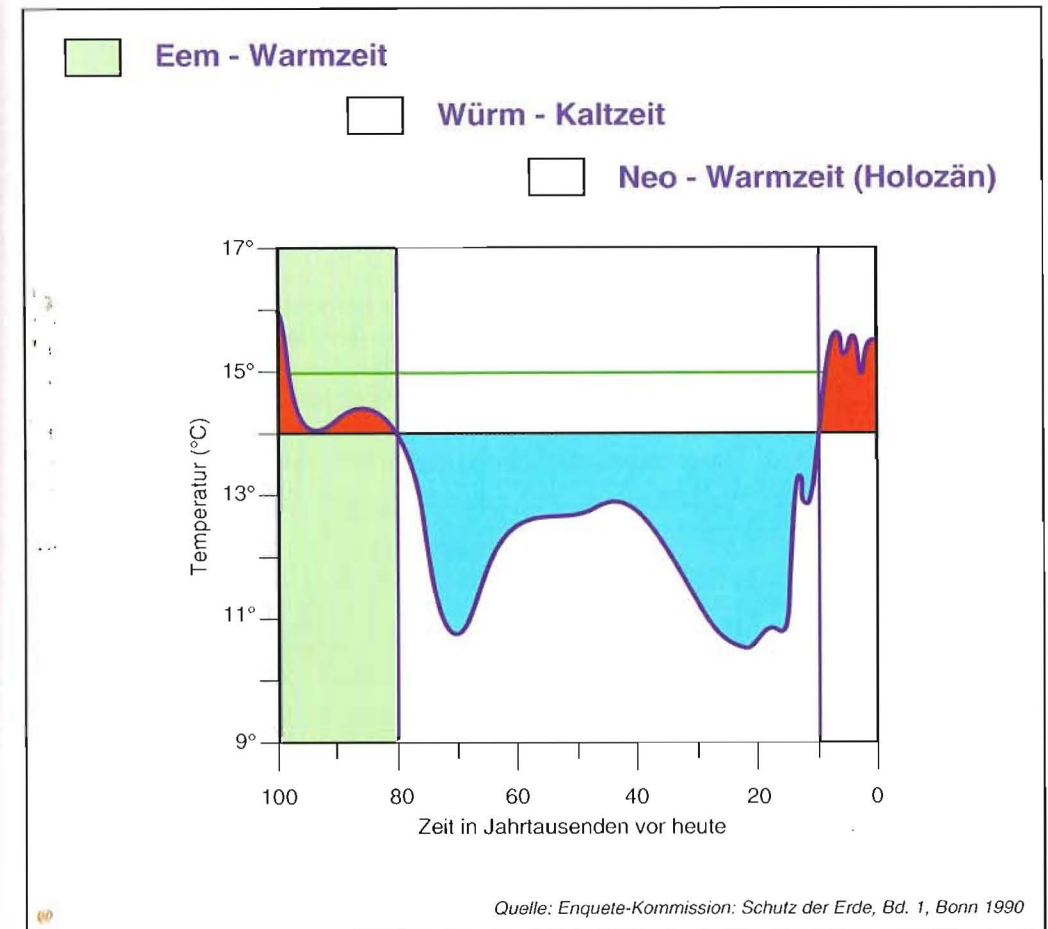


Abb. 1.4: Temperaturveränderungen in den letzten 150 000 Jahren

### Das Holozän

#### Warme Klimaperioden

Vor 6 000 bis 7 000 und noch einmal vor 4 000 bis 5 000 Jahren, im sog. „Hauptoptimum“ der Nacheiszeit, war das Klima möglicherweise schon einmal deutlich wärmer als heute – und feuchter. Die Menschen wurden in dieser Zeit sesshaft, und es entstanden die ersten Hochkulturen. Satellitenaufnahmen zeigen, dass es Flusssysteme in der Sahara gab, Felszeichnungen und Fossilien von Krokodilen und Nilpferden weisen ebenfalls darauf hin; die biblischen Berichte über die „Sintflut“ fallen gleichfalls in diese Epoche. Warm war es auch zur Römerzeit („Römisches Optimum“), was Hannibal den Übergang über die Alpen erleichterte, und noch einmal im Mittelalter („Mittelalterliches Optimum“), wodurch es den Normannen möglich wurde, Grönland (das „grüne Land“) für 200 Jahre zu besiedeln und weit vor Kolumbus Amerika zu entdecken. In England wurde im Mittelalter sogar Wein angebaut.

### Kältere Klimaperioden

Dazwischen lagen kühlere Perioden. Um 1000 v.Chr. war es möglicherweise um 1–2°C kälter als heute. Nicht ganz so kalt zeigte sich das „Pessimum der Völkerwanderungszeit“, das die germanischen Völker aus dem Ostseeraum in den Mittelmeerraum getrieben hat. Nach der Klimawende zwischen 1200 und 1400, mit der das „Mittelalterliche Optimum“ zu Ende ging, sanken in der sogenannten „Kleinen Eiszeit“ von 1250–1850 die Temperaturen erneut. Kühle Sommer und strenge Winter führten z.B. in England zu Missernten und Hungersnöten.

### Das wärmste Jahrhundert seit 1000 Jahren

Allerdings sind die Daten bis zum Mittelalter mit vielen Unsicherheiten behaftet. Die Temperaturen für diese Zeit werden aus sogenannten Proxy-Daten (indirekten Quellen wie Baumringen, Pollen, Tiefseesedimenten, Eiskernen usw.) abgeleitet, deren Interpretation z.T. umstritten ist. Auch für die folgenden Jahrhunderte muss man auf Proxy-Daten zurückgreifen, die aber ab 1400 eine bessere Einschätzung des vergangenen Klimas erlauben. Danach ist es sehr wahrscheinlich, dass kein Jahrhundert in den letzten 600 oder sogar 1000 Jahren so

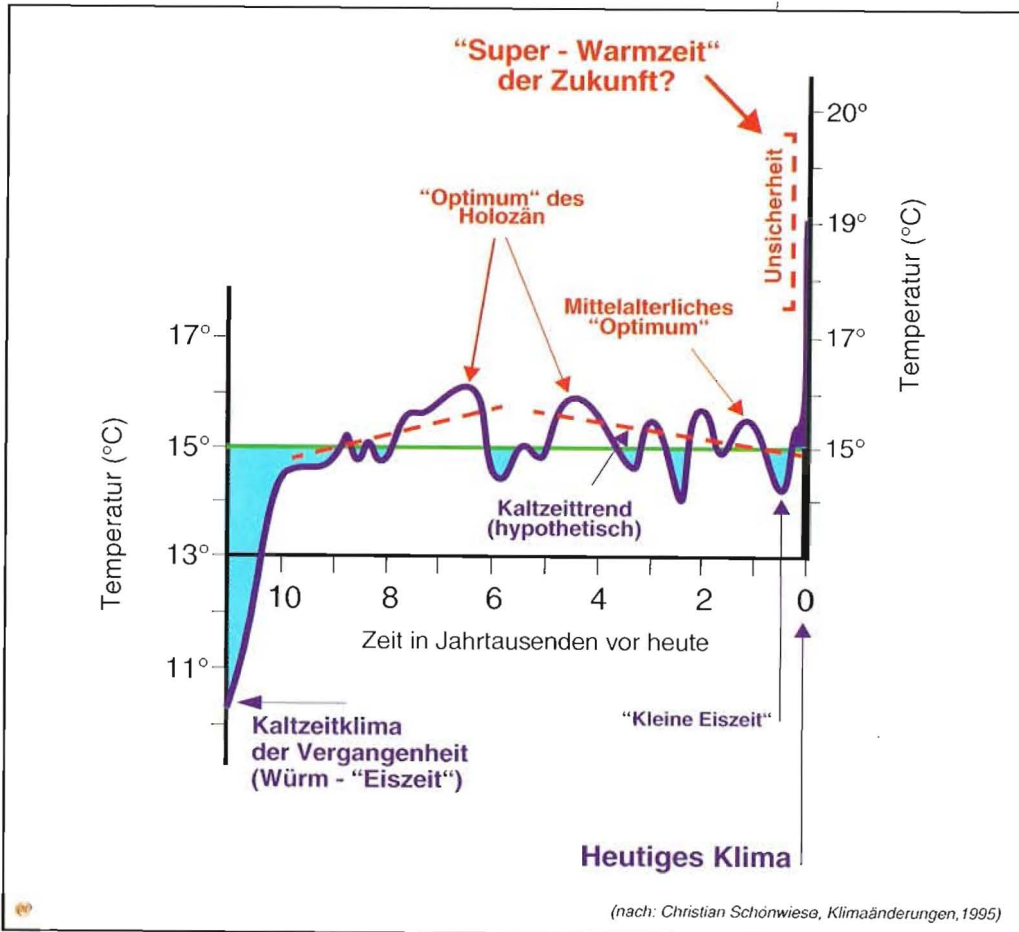


Abb. 1.5: Temperaturveränderungen in den letzten 11000 Jahren

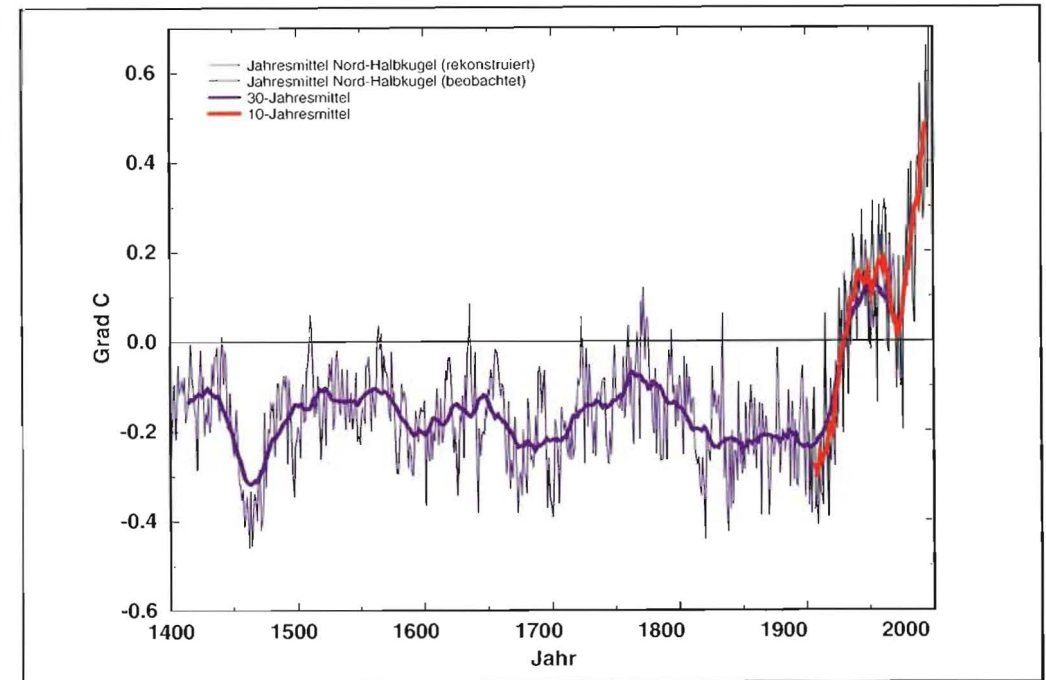


Abb. 1.6: Temperaturveränderungen seit 1400 (N-Halbkugel)<sup>1</sup>

warm wie das 20. gewesen ist. Die 1990er Jahre waren offensichtlich das wärmste Jahrzehnt des Jahrtausends und das Jahr 1998 das wärmste Jahr. Niemals hat es innerhalb von 100 Jahren eine Temperaturschwankung von 0,6 °C oder gar mehr gegeben; und noch weniger ereignete sich in 30 Jahren ein Anstieg von 0,4 °C wie in den letzten drei Jahrzehnten.

<sup>1</sup> nach MANN, M. E. et al. (1998): Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries, nature, 392, S. 779–787



## 2. Verändert der Mensch das globale Klima?

### 2.1. Natürlich oder anthropogen?

#### Vom Opfer zum Täter?

Vor Beginn der Industrialisierung hat der Mensch kaum die Möglichkeiten besessen, durch seine wirtschaftlichen Tätigkeiten mehr als das regionale Klima zu beeinflussen; vielmehr war er oft genug selber den Wirkungen der klimatischen Verhältnisse ausgeliefert. Natürliche Faktoren wie Schwankungen der Sonneneinstrahlung, Vulkanausbrüche oder ein interner Klimawandel begünstigten oder benachteiligten das Leben ganzer Völker. Heute stellt sich allerdings die Frage, ob sich der Spieß umgedreht hat. Ist der Mensch dabei, zum ersten Mal in seiner Geschichte das Weltklima zu verändern? Steckt hinter der Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um 0,6 °C in den letzten 100 Jahren die zunehmend wachsende und immer mehr Güter produzierende und konsumierende Bevölkerung der Erde? Überschreitet die Umweltbeeinflussung des Menschen damit endgültig den Nahbereich, den nächsten Fluss, die Wälder der Region, und wirkt global? Werden die Fahrzeuge auf deutschen Autobahnen damit zu einem Ursachenfaktor für Überschwemmungen in Bangladesch?

#### Das Signal vom Rauschen trennen!

Die Frage, ob der Mensch in das globale Klimageschehen bereits eingegriffen hat, kann nicht ohne gründliche Kenntnis der natürlichen Klimaschwankungen beantwortet werden. Jede vom Menschen verursachte Klimaänderung überlagert die natürliche Klimavariabilität. Natürliche Klimaänderungen hat es schon immer gegeben und wird es immer geben. Sie bilden das „Rauschen“, den Hintergrund für das anthropogene Klima-„Signal“. Ein möglicher Klimawandel durch den Menschen kann nur bestimmt werden, wenn er von dem Rauschen der natürlichen Veränderung unterschieden werden kann. Das aber ist nur möglich, wenn es gelingt,

1. die klimatische Wirkung der natürlichen Klimafaktoren, und zwar der externen (Sonneneinstrahlung, Vulkanausbrüche) wie der internen (Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre, Biosphäre und Atmosphäre usw.), eindeutig zu erfassen,
2. die klimatische Wirkung der anthropogenen Treibhausgase wie Kohlendioxid, Methan, FCKW etc. genau zu bestimmen,
3. ein Verfahren zu entwickeln, das es erlaubt, die Wirkung der natürlichen von der der anthropogenen Ursachen klar zu trennen.

### 2.2. Natürliche Ursachen

#### Veränderungen der Erdbahnparameter

Die Strahlung der Sonne beträgt am Außenrand der Erdatmosphäre durchschnittlich 1365 W/m<sup>2</sup>. Davon erreichen die Atmosphäre wegen der Kugelgestalt der Erde und der sonnenabgewandten Nachtseite jeweils einer Erdhälfte im globalen Mittel aber nur 342 W/m<sup>2</sup>. Diese sogenannte Solarkonstante ist im strengen Sinne keineswegs konstant, sondern unterliegt aufgrund verschiedener Ursachen geringen Schwankungen. So beeinflussen Veränderungen in der Erdumlaufbahn um die Sonne über längere Zeiträume hinweg die Intensität der Sonneneinstrahlung. Das geschieht allerdings in einem Zyklus von mehr als 100000 Jahren;

man erklärt damit den Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten während des Eiszeitalters, zu dem auch die jetzige Warmzeit gehört. Die Veränderungen in den Erdbahnparametern können zusätzlich Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen des Klimasystems, z. B. zwischen Meer und Atmosphäre, anstoßen.

#### Aktivitäten auf der Sonne

Veränderte Parameter in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne können allerdings nicht verantwortlich für die relativ kurzfristigen Schwankungen der Nacheiszeit sein, deren Zeitskalen bei Jahrzehnten bis Jahrhunderten liegen.

Eine mögliche Erklärung hierfür liegt in der Sonnenaktivität. Die seit Erfindung des Fernrohrs beobachteten und seit 1610 dokumentierten Sonnenflecken werden begleitet von Sonnenfackeln und Protuberanzen, die die Energieabstrahlung der Sonne verstärken und die Solar-konstante leicht erhöhen. So fällt das sogenannte Maunder-Minimum (1650–1710) während der „Kleinen Eiszeit“ in eine Zeit ohne Sonnenflecken.

Die Sonnenaktivität verändert sich in bestimmten Zyklen (vgl. Abb. 2.1). Zum einen ist eine Periode von ca. 11 Jahren zu erkennen, der sogenannte Schwalbe-Zyklus, in der die Sonnenenergie aber nur mit einem geringen Betrag von etwa 0,1 % an der Obergrenze der Atmosphäre schwankt. Dagegen variiert die Einstrahlung des ca. 80-jährigen Gleissberg-Zyklus um 0,24–0,30 %, was einer Veränderung der Solarkonstanten um ca. 5 W/m<sup>2</sup> entspricht.

#### Vulkanausbrüche

Auch Vulkanausbrüche beeinflussen die Temperatur, jedoch nur für wenige Jahre. Die bei stärkeren Eruptionen bis in die untere Stratosphäre geschleuderten, aus chemischen Reaktionen entstandenen Aerosolpartikel reflektieren einen Teil der Sonnenstrahlen und bewirken somit eine Abkühlung der bodennahen Luftschichten und eine Erwärmung der unteren Stratosphäre. Bekannte Beispiele der Gegenwart sind die Ausbrüche des El Chichon 1982 und des Mt. Pinatubo 1991.

#### Ozean-Atmosphäre-Variabilität

Das Klima wird aber nicht nur durch externe Ursachen wie die Solarstrahlung oder Vulkanausbrüche verändert, sondern auch durch die komplexen internen Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre.

Ein gut untersuchtes Beispiel für Ozean-Atmosphäre-Schwankungen ist das in Kapitel 6 behandelte El-Niño-Southern-Oscillation-Phänomen (ENSO) in den niederen Breiten des Süd-Pazifik, das sich allerdings in Zeitskalen von nur wenigen Jahren abspielt. Es wirkt damit in einem ähnlichen Zeitbereich wie Vulkanausbrüche, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen. Als Folge einer periodischen Eigenschwingung des Systems Ozean-Atmosphäre im Süd-Pazifik, in der Luftdruck und Meeresströmungen gekoppelt sind, wird in einer El-Niño-Phase kaltes Auftriebswasser durch Warmwasser ersetzt. Die klimatischen Auswirkungen – u. a. Dürren in Australien und Nordost-Brasilien, Überschwemmungen in den USA – sind nahezu weltweit nachweisbar. Auf ein El-Niño-Ereignis folgt in der Regel die entgegengesetzte Reaktion der Southern Oscillation mit starkem Auftrieb von kaltem Wasser, die La Niña genannt wird.



Als mögliche Alternative zu einem anthropogenen Klimaantrieb sind wichtiger jedoch Schwankungen der ozeanischen Zirkulation in höheren Breiten, die im wesentlichen durch Temperatur und Salzgehalt des Meerwassers gesteuert und daher auch thermohaline Zirkulation genannt wird. Sie spielen sich in ähnlichen Zeitskalen ab wie jene Klimaänderungen, die für das 20. Jahrhundert mit hoher Wahrscheinlichkeit dem menschlichen Einfluss zugeschrieben werden. Ihr Nachweis ist allerdings schwierig, da es fast keine entsprechenden Messreihen gibt und man weitgehend auf Modellrechnungen angewiesen ist. Relativ gut belegt ist eine Schwankung der thermohalinen Zirkulation des „großen marinen Förderbands“, von der der Golfstrom ein Teil ist, im Nordatlantik in einem 35-Jahre-Zyklus. Entsprechende Modellrechnungen werden in diesem Fall gestützt durch die empirisch nachgewiesene „Große Salzgehaltsanomalie“ vom Ende der 60er bis in die 70er Jahre. Als Ursache wird eine Rückkopplung zwischen Atmosphäre und Ozean angenommen, bei der die Wechselwirkung von Luftdruck, Windantrieb, Frischwasserzufluss, Meereis, Temperatur und Salzgehalt des Oberflächenwassers die Dichte und damit die Konvektion des Nordatlantik-Wassers in dem genannten Rhythmus variieren (s. Kapitel 6).<sup>1</sup>

Eine weitere Schwankung der thermohalinen Zirkulation des Nordatlantiks, die im Zeitbereich von Jahrhunderten liegt, ist bisher nur von einigen Modellrechnungen aufgezeigt worden. In diesem Fall wird eine Eigenschwingung des Ozeans angenommen, die sich in einer Variation des Salzgehalts äußert. Da der Salzgehalt entscheidend die Dichte von Meerwasser bestimmt und damit die sogenannte thermohaline Zirkulation der Ozeane antreibt, übertragen sich Schwankungen im Salzgehalt auf Veränderungen der Meeresströmungen. Bei einem geringeren Salzgehalt im Nordatlantik etwa wird das Absinken von Oberflächenwasser in tiefere Schichten gebremst und damit die Golfstromzirkulation und die Wärmeabgabe an die Atmosphäre vermindert. Die Salzgehaltsanomalie wird mit dem bei 60° N entstehenden Tiefenwasser in 2–3 km Tiefe in den Südatlantik weitertransportiert und gelangt dort wieder an die Oberfläche und mit der Oberflächenzirkulation in den Nordatlantik zurück. Diese Anomalie unterliegt nach einigen Modell-Ergebnissen einem Rhythmus von ca. 320 Jahren, der der Umlaufzeit des Atlantiks, d. h. der Erneuerung des atlantischen Tiefenwassers, entspricht.<sup>2</sup>

### 2.3. Der Nachweis einer anthropogenen Klimaänderung

#### Die Erwärmung im 20. Jahrhundert - ein natürliches Phänomen?

Die Erhöhung der bodennahen globalen Durchschnittstemperatur in den letzten 100 Jahren um ca. 0,6°C kann sowohl durch natürliche Faktoren wie durch den Anstieg der anthropogenen Treibhausgase wie durch beide zusammen verursacht sein. Die deutlichen Schwankungen des Temperaturanstiegs seit 1860 lassen allerdings eine monokausale Erklärung nur durch Treibhausgase unwahrscheinlich erscheinen. Während die Zunahme der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration und anderer Treibhausgase seit Beginn des industriellen Zeitalters

<sup>1</sup> WEISSE, R. (1994): Nordatlantische Variabilität in einem Ozeanzirkulationsmodell im Zeitbereich von Dekaden, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Examensarbeit Nr. 24; TIMMERMANN, A. et al. (1998): North Hemispheric Interdecadal Variability: A Coupled Air-Sea Mode, J. Climate, Vol. 11, S. 1906–1931

<sup>2</sup> MIKOLAJEWZ, U. und E. MAIER-REIMER (1990): Internal secular variability in an OGCM, Climate Dynamics, 4, S. 145–156

Tabelle 2.1: Klimaschwankungen und ihre natürlichen Ursachen

Klimaschwankungen	Ursachen	Zeitskalen
Wechsel von Warm- und Kaltzeiten	Änderungen der Erdbahnparameter	Zyklen von über 100 000 Jahren
extreme Temperaturwechsel am Ende der letzten Kaltzeit	plötzliche Änderungen in der ozeanischen Zirkulation (z.B. Golfstrom)	Jahrzehnte
wärmere und kältere Perioden in der Nacheiszeit	- Solaraktivitäten des Gleissberg-Zyklus - Variabilität der ozeanischen Zirkulation über längere Perioden	mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte
kurzfristige Temperaturschwankungen	Solaraktivität des Schwalbe-Zyklus	11 Jahre
kurzfristige Temperaturerhöhung	El-Niño-Ereignisse	wenige Jahre
kurzfristige Temperaturerniedrigung	Vulkanausbrüche, La-Niña-Ereignisse	wenige Jahre

einen gleichmäßig ansteigenden Trend aufweist (Abb. 5.1), erfolgt die Temperaturerhöhung in zwei Schüben mit von Jahr zu Jahr deutlicher Variabilität (Abb. 1.1). Anzunehmen ist, dass der Temperaturveränderung natürliche und anthropogene Ursachen zugrunde liegen.

Welche natürlichen Faktoren kommen als Ursachen für die Klimavariabilität der letzten 100 Jahre in Frage? Veränderungen der Erdbahnparameter wirken sich erst in einer wesentlich längeren Zeitskala aus und rufen pro Jahrhundert nur eine Temperaturabweichung in der Größenordnung von Hundertstel °C hervor. Vulkanausbrüche und der El Niño-Effekt haben meistens nur eine Wirkung von einigen Jahren und können allenfalls die kurzfristigeren Schwankungen hervorgerufen, nicht aber den Gesamtrend bzw. Trends über Jahrzehnte im 20. Jahrhundert bestimmt haben. Im Hinblick auf die Zeitskala, in der sich die gegenwärtige Temperaturzunahme vollzieht, kommen als natürliche Ursache daher nur die Solaraktivität und die Variabilität des Ozeans in Betracht. Sowohl über die langfristigen ozeanischen Eigenschwingungen wie über die Solaraktivitäten liegen nicht genügend Beobachtungsdaten vor, um eine schlüssige Beziehung zu dem Temperaturverlauf der letzten 100 Jahre nachweisen zu können, so dass man auf Proxy-Daten aus Sedimentuntersuchungen oder Beobachtung von Sonnenflecken angewiesen ist. Abb. 2.1 zeigt den aus solchen Daten berechneten Anteil der Solaraktivität an der gegenwärtigen Erwärmung.<sup>3</sup>

Die Veränderung der Solarkonstanten weist danach in den letzten 100 Jahren einen ähnlichen Verlauf auf wie die der globalen Durchschnittstemperatur, mit einem deutlichen Anstieg von der Jahrhundertwende bis in die 40er Jahre und einem zweiten Anstieg seit den 1970er Jahren bis heute. Das spricht zumindest für einen Einfluss auf die Temperaturzunahme in

<sup>3</sup> CUBASCH, U. et al. (1997): Simulation with an O-AGCM of the influence of variations of the solar constant on the global climate, Climate Dynamics, 13, S. 757–767



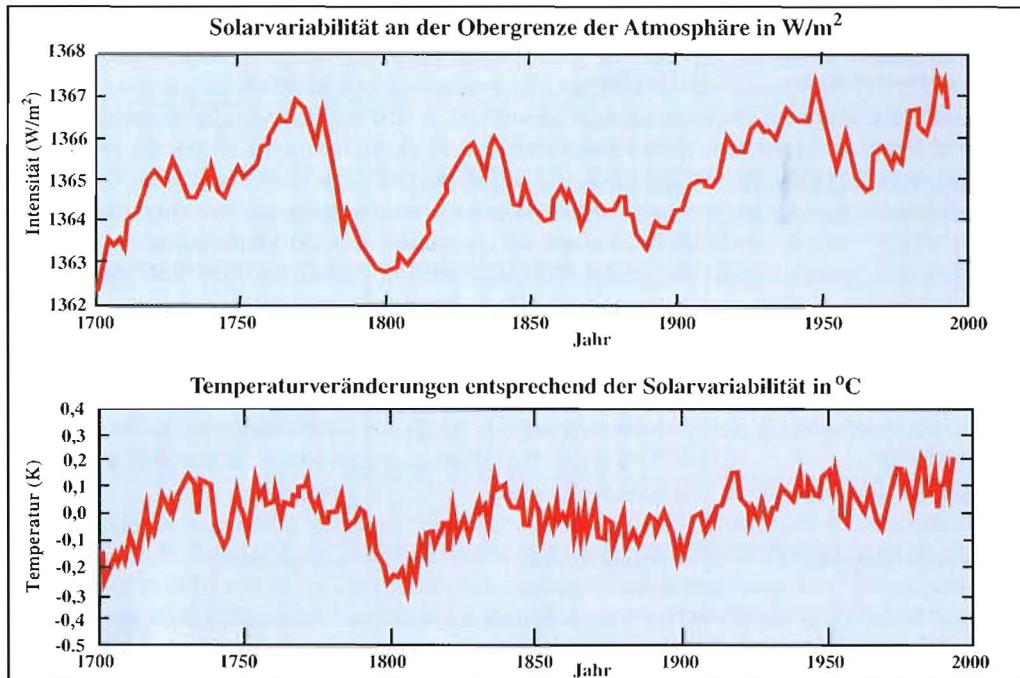


Abb. 2.1: Veränderung der Solarstrahlung und ihre Temperaturwirkung seit 1700 (Quelle: MPI/DKRZ; Daten nach HOYT, D. V. and SCHATTEN, K. H. : A discussion of plausible solar irradiance variations, 1700–1992, J.Geophys. Res. 98, 18895–18906, 1993)

diesem Jahrhundert. Auch über den längeren Zeitraum seit dem Maunder-Minimum um 1700 nimmt die Solaraktivität allmählich zu, so dass die gegenwärtige Erwärmung als Teil einer längerfristigen Temperaturerhöhung gesehen werden kann. Sie ist aber dennoch durch die Solaraktivität allein nicht zu erklären.

Abb. 2.1 zeigt im oberen Teil die Veränderung der Solarstrahlung von 1700 bis zur Gegenwart. Man erkennt Schwankungen von max.  $5 W/m^2$ . Aufgrund der Kugelgestalt der Erde und der Sonnenabgewandtheit jeweils einer Erdhälfte sowie der Reflexion eines Drittels der Sonnenstrahlung durch Atmosphäre und Erdboden erreichen jedoch nur 16 % dieses Wertes, d. h.  $0,8 W/m^2$ , den Boden. Zum Vergleich: Der Strahlungsantrieb, d.h. die Veränderung der Strahlungsbilanz, durch den anthropogenen Treibhauseffekt wird mit  $2,4 W/m^2$  angenommen; entsprechend gering ist die Temperaturveränderung (Abb. 2.1 unten) durch die Schwankung der Solarstrahlung; sie macht für das 20. Jahrhundert höchstens 30 % des als Folge des Treibhauseffekts angenommenen Wertes von  $0,6 ^{\circ}C$  aus. An der besonders deutlichen Erwärmung der letzten 30 Jahre von  $0,4 ^{\circ}C$  sind die Schwankungen der Solarkonstanten noch erheblich weniger beteiligt.

### Der anthropogene „Fingerabdruck“ der Erwärmung Den Fingerabdruck erkennen

Die überzeugendsten Argumente für eine anthropogene Verursachung der Temperaturerhöhung hat in den letzten Jahren die sogenannte „Fingerabdruck“-Methode geliefert. Hier-

bei geht man davon aus, dass verschiedene Ursachen auch verschiedene räumliche Muster der Erwärmung hervorrufen. Eine durch veränderte Solarstrahlung verursachte Erwärmung müsste danach einen anderen horizontalen und vertikalen „Fingerabdruck“ hinterlassen als ein durch anthropogene Treibhausgase verursachter Temperaturanstieg. Wenn man nun das Muster der tatsächlichen Erwärmung mit dem Muster einer Temperaturveränderung durch Treibhausgase, das durch Klimamodelle errechnet werden kann, vergleicht und eine hohe Ähnlichkeit feststellt, ist die Wahrscheinlichkeit einer Erwärmung durch Treibhausgase groß. Unterscheidet sich bei einem ähnlichen Vergleich das Muster der Erwärmung durch Solaraktivität von dem beobachteten Muster deutlich, wird die Treibhausthese zusätzlich gestützt.<sup>1</sup>

### Verbesserte Klimamodelle

Den jeweiligen Fingerabdruck zu erfassen war nur möglich durch eine Weiterentwicklung der Klimamodelle (vgl. Kapitel 7), die wiederum nur durch eine deutlich höhere Computerleistung erreicht wurde. Die Weiterentwicklung der Modelle bestand in folgenden Punkten:

- Es wurde nicht nur die Veränderung der Atmosphäre, sondern auch die des Ozeans in seiner gesamten Tiefe berücksichtigt und beide miteinander gekoppelt.
- Man untersuchte nicht nur die Folgen einer plötzlichen  $CO_2$ -Verdoppelung wie in früheren, einfacheren Modellen, sondern auch die einer sich mit der Zeit ändernden  $CO_2$ -Konzentration.
- Es wurde nicht nur die Wirkung von  $CO_2$  und anderen anthropogenen Treibhausgasen berücksichtigt, sondern auch die abkühlende Wirkung von Aerosolen sowie die Temperatur-Effekte der Ozon-Zerstörung durch FCKW in der Stratosphäre.
- Modell-Rechnungen, die das Klima über 1000 Jahre und mehr simulierten, waren in der Lage, besser als früher die natürliche interne Klima-Variabilität zu erfassen.
- Verbesserte statistische Techniken ermöglichten eine feinere Unterscheidung eines Signals von einem Hintergrundrauschen.

### Der Nachweis eines Signals

Mit heutigen Klimamodellen lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit nachweisen, dass die Erwärmung von  $0,6 ^{\circ}C$  in diesem Jahrhundert nicht durch natürliche Klimaschwankungen, wie sie in den letzten 1000 Jahren auftraten, verursacht sein kann. Die Temperaturerhöhung um  $0,4 ^{\circ}C$  von 1966–1998 liegt sogar mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 95 % über der natürlichen Variabilität des Klimas.<sup>2</sup> Damit konnte das „Signal“ einer ungewöhnlichen Klimaveränderung von dem „Rauschen“ der natürlichen Variabilität des Klimas statistisch signifikant unterschieden werden. Die Ursache dieser Veränderung ist auf diese Weise jedoch letztlich noch nicht bestimmt. Sie lässt sich nur erfassen, wenn gezeigt werden kann, dass die Höhe und das räumliche und zeitliche Muster der beobachteten Erwärmung mit der Höhe und dem räumlichen und zeitlichen Muster einer Erwärmung durch anthropogene Treibhausgase übereinstimmt und sich von dem einer natürlichen Erwärmung unterscheidet.

<sup>1</sup> Zu Nachweis und Zuordnung eines Klimasignals: HASSELMANN, K. (1997): Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change, *Climate Dynamics*, 13, 601–612; HOUGHTON, J.T. et al. (1996): *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Cambridge, S.413

<sup>2</sup> CUBASCH, U. et al.(1997): Klimamodelle und Klimasimulation, in: *Globale Umweltveränderungen*, Landsberg, 37–57; HEGERL, G.C. et al.(1997): Multi-fingerprint detection and attribution of greenhouse gas- and aerosol forced climate change, *Climate Dynamics* 13, 613–634



### Das Muster der Erwärmung: die Frage der Zuordnung

Durch die Einbeziehung der Strahlungswirkung der anthropogenen Aerosole wurde besonders für die letzten 30 Jahre eine hohe Übereinstimmung zwischen Modellergebnissen und beobachteter Temperaturänderung erreicht. Während man in früheren Modellen, bei Berücksichtigung nur der Treibhausgase, eine Temperaturerhöhung von 0,3 °C pro Jahrzehnt errechnete, zeigen die Modelle heute den mit der Beobachtung besser übereinstimmenden Wert von 0,2 °C in 10 Jahren.<sup>1</sup> In einer jüngeren Modellrechnung am DKRZ (Abb. 2.2) wurde neben der direkten Aerosol-Wirkung, die in einer erhöhten Reflexion der Solarstrahlung besteht, auch die - allerdings schwer abzuschätzende - indirekte Wirkung, d.h. der Einfluss der Aerosole auf die optischen Eigenschaften der Wolken, berücksichtigt. Zusätzlich wurde auch der Effekt der Ozon-Abnahme in der Stratosphäre und der Ozon-Zunahme in der Troposphäre in die Rechnung mit einbezogen. Das Ergebnis weist vor allem für die beiden letzten Jahrzehnte eine weitgehende Identität der berechneten mit den beobachteten bodennahen globalen Mitteltemperaturen auf.<sup>2</sup>

Nicht zuletzt hatte die Einbeziehung der Aerosole eine wirklichkeitsnähere Abbildung der räumlichen Muster der Temperaturveränderung ermöglicht. Dabei zeigte sich, dass die simulierte Temperaturänderung durch Treibhausgase und Aerosole besser mit dem horizontalen und vertikalen Muster der beobachteten Veränderung übereinstimmt als mit dem simulierten Muster der Solarvariabilität.<sup>3</sup> Zwar weisen in beiden Fällen die Kontinente eine höhere Erwärmung als die Ozeane auf. Berücksichtigt man jedoch die Jahreszeiten, ergeben sich zumindest im Nordsommer signifikante Unterschiede, da für die solare Einstrahlung die Wolkenbedeckung eine wichtigere Rolle spielt als für die langwellige Ausstrahlung. D. h. die Subtropen reagieren in diesem Fall stärker auf Veränderungen der Solarstrahlung als auf den anthropogenen Treibhausantrieb. Die Beobachtung zeigt jedoch in Übereinstimmung mit dem simulierten anthropogenen Treibhauseffekt eine höhere Temperaturzunahme in mittleren und hohen Breiten als in den Subtropen.

Auch der vertikale Gegensatz zwischen der beobachteten Temperaturzunahme in Bodennähe und der Abnahme in der unteren Stratosphäre (s. Abb. 1.3) spricht eher für die

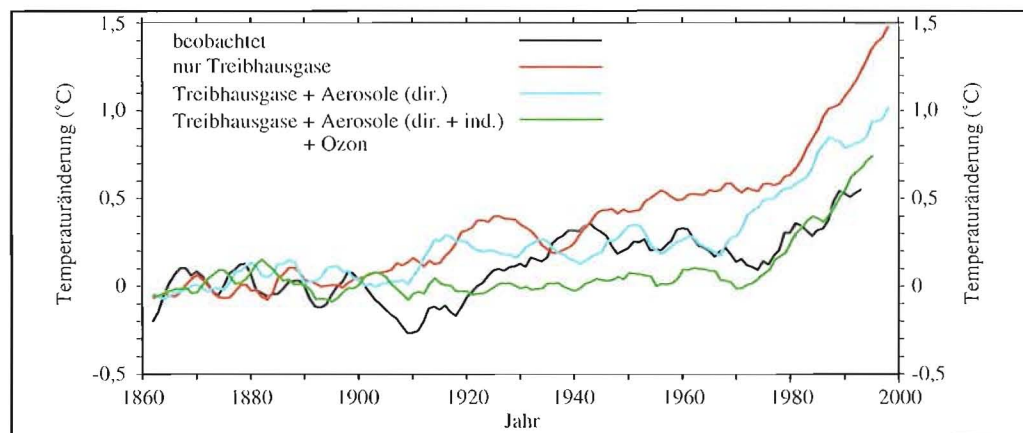


Abb. 2.2: Temperaturentwicklung bei Berücksichtigung der direkten und indirekten Aerosol-Wirkung (Quelle: MPI/DKRZ)

Treibhausthese als für eine Verursachung durch Solarvariabilität. Eine erhöhte Solarstrahlung würde vor allem wegen der Absorption durch das stratosphärische Ozon auch die Temperatur in der Stratosphäre erhöhen. Das Gegenteil ist jedoch der Fall. Dagegen passt die stratosphärische Temperaturabnahme zum Treibhauseffekt durch CO<sub>2</sub> und andere anthropogene Spurengase. Allerdings muss hier auch die abkühlende Wirkung des Ozonschwunds durch FCKW in der Stratosphäre berücksichtigt werden, die nach heutigem Wissensstand keineswegs gering ist.<sup>4</sup>

Der Gegensatz von Abkühlung in der Stratosphäre und Erwärmung in Bodennähe sowie das geographische Muster der Temperaturveränderung verdichten sich zu dem Indizien-Beweis, dass die Erhöhung der Temperatur von 0,6 °C in den letzten 100 Jahren menschengemacht ist. Der IPCC stellt in seinem letzten Bericht, der die bisherigen Ergebnisse der Klimaforschung zusammenfasst, dazu fest: „the balance of evidence suggests that there is a discernible human influence on global climate“ (die Abwägung des Beweismaterials weist auf einen erkennbaren menschlichen Einfluss auf das globale Klima).<sup>5</sup>

<sup>1</sup> HOUGHTON, J.T. et al. (1996): Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge, S. 289

<sup>2</sup> ROECKNER, E. et al. (1999): Transient climate change simulations with a coupled atmosphere ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle. J.Climate, 12, 3004–3032

<sup>3</sup> Vgl. CUBASCH, U. et al. (1997): Simulation with an O-AGCM of the influence of variations of the solar constant on the global climate, Climate Dynamics, 13, 757–767; CUBASCH, U. et al. (1997): Klimamodelle und Klimasimulation, in: Globale Umweltveränderungen, Landsberg, 37–57

<sup>4</sup> RAMASWAMY, V. (1996): Fingerprint of ozone depletion in the spatial and temporal pattern of recent lower-stratospheric cooling, nature, Vol 382, S.616–618

<sup>5</sup> HOUGHTON, J.T. et al. (1996): Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge, S.4



### 3. Prognosen

#### 3.1. Stehen wir vor einer Klimawende?

Die menschlichen Lebensverhältnisse waren seit jeher stark von klimatischen Änderungen beeinflusst. In der Vergangenheit haben Klimaschwankungen Hungersnöte und Völkerwanderungen ausgelöst. Auch heute noch leiden viele Menschen unter Dürren, Überschwemmungen und Stürmen. Im Vergleich zur geologischen Vergangenheit ist das Klima seit 10000 Jahren, d.h. seit dem Beginn der menschlichen Kulturentwicklung, jedoch trotz aller Schwankungen relativ stabil geblieben.

Heute müssen wir uns allerdings die Frage stellen, ob wir vor einer Klimawende stehen, die wesentlich tiefgreifender, folgenreicher und plötzlicher sein könnte als alles, was die Menschheit in den letzten 10000 Jahren erlebt hat – vor einer Klimawende, die außerdem noch zum ersten Mal in der menschlichen Geschichte selbstgemacht wäre. Wird der Mensch im nächsten Jahrhundert nicht mehr nur Opfer von Klimaänderungen sein, sondern zum ersten Mal Täter – und zugleich allerdings auch das Opfer der klimatischen Folgen seiner Taten?

Nach dem Stand der heutigen Klimaforschung wird eine solche Entwicklung bei weiter ansteigender Konzentration der anthropogen verursachten Treibhausgase aller Voraussicht nach eintreten. Die bereits heute mit hoher Wahrscheinlichkeit nachgewiesene Klimaänderung wird sich danach im 21. Jahrhundert beschleunigt fortsetzen. Der Klimawandel wird so kurzfristig erfolgen, dass sich die heutigen Ökosysteme diesem Wandel nicht ohne Schaden anpassen können. Die sozioökonomischen Folgen werden unübersehbar und gravierend sein.

#### 3.2. Szenarien und Prognosen

Eine wesentliche Voraussetzung zur Entwicklung geeigneter Klimaschutzstrategien sind begründete Prognosen des Klimawandels. Solche Prognosen zu liefern ist eine der zentralen Aufgaben der heutigen Klimaforschung. Klimaprognosen sind jedoch keine Vorhersagen, sondern Projektionen eines künftigen Klimas in Abhängigkeit von menschlichen Verhaltensweisen. Diese Szenarien beschreiben die Entwicklung der Emissionen und atmosphärischen Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen im nächsten Jahrhundert, soweit sie durch Energieumwandlung, Waldvernichtung, landwirtschaftliche Tätigkeit usw. verursacht werden.

Nach zehn Jahren öffentlicher Diskussion der Klimafrage und nach den Weltklimakonferenzen von Rio de Janeiro 1992, Berlin 1995, Kyoto 1997, Buenos Aires 1998 und Bonn 1999, die die Ernsthaftigkeit des Problems benannt, aber weltweit wenig bewirkt haben, heißt das wahrscheinlichste Szenario auch heute noch: „business as usual“ („weiter wie bisher“). D. h. die Wachstumsraten der Treibhausgas-Emissionen, besonders der CO<sub>2</sub>-Emission, werden sich auch in den folgenden Jahrzehnten wie bisher steigern. Dieses Szenario wurde 1992 vom IPCC unter der Bezeichnung IS92a aufgestellt und 1995 weiterentwickelt. Es berück-

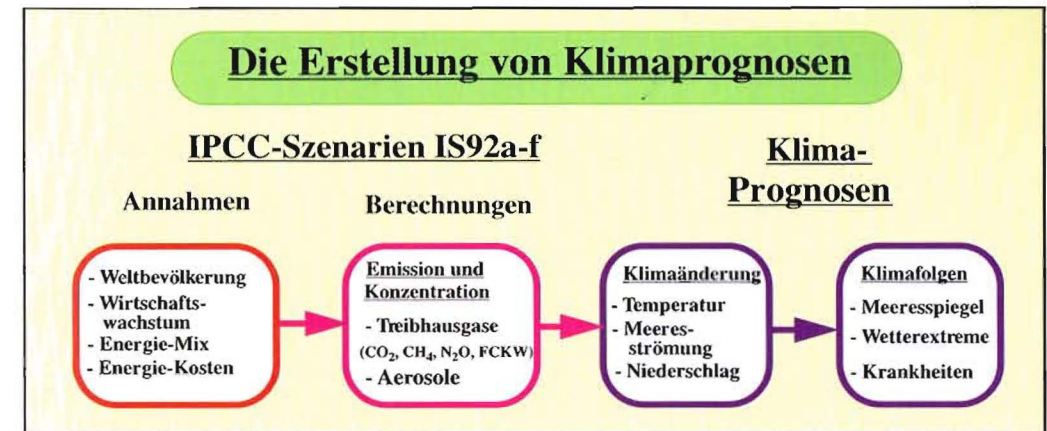


Abb. 3.1: Grundlagen von Klimaprognosen  
(Quelle: MPI/DKRZ)

sichtigt die Emission und atmosphärische Konzentration der langlebigen Treibhausgase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und FCKW, des troposphärischen Ozons und der Sulfat-Aerosole. Die Emissions-Szenarien basieren auf einer Reihe von Annahmen über die Entwicklung der Weltbevölkerung, des Bruttosozialprodukts, der Energiekosten, der technischen Entwicklung usw. Die Emission von Kohlenstoff z.B. wird sich nach diesem Szenario von gegenwärtig knapp 8 Gt C/a (Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr: 1 Gt C=1 Milliarde t C = 3,7Gt CO<sub>2</sub>) auf ca. 20 Gt C/a im Jahre 2100 steigern und die CO<sub>2</sub>-Konzentration von z. Zt. 360 ppm (parts per million) auf 720 ppm erhöhen. Ein anderes IPCC-Szenario, das Szenario IS92e, liegt weit über diesen Werten, das Szenario IS92d deutlich darunter. Angesichts der hohen wirtschaftlichen Wachstumsraten im süd- und ostasiatischen Raum ist auch das hohe Szenario nicht auszuschließen, während das Szenario IS92d, das inzwischen den Spitznamen „drakonisch“ erhalten hat, nur bei durchgreifenden energiepolitischen Maßnahmen, einem mäßigen Wirtschaftswachstum und einer sehr geringen Bevölkerungszunahme auf 6,4 Milliarden im Jahre 2100 (bei gegenwärtig schon über 6 Milliarden) denkbar ist.

Auf der Grundlage der IPCC-Szenarien berechnen heutige Großcomputer das mögliche Klima der nächsten 100 Jahre. Nur wenn die Szenarien stimmen, stimmen die Prognosen. Und diese stimmen auch nur dann, wenn die Modellrechnungen in der Lage sind, die Klima-reaktion auf einen veränderten Antrieb durch die Zunahme von Treibhausgasen und Aerosolen richtig wiederzugeben. In die Modellrechnungen müssen dabei nicht nur die klimatischen Folgen der anthropogenen Veränderungen der Spurengaszusammensetzung der Atmosphäre eingehen, sondern auch die natürliche Klimavariabilität. Da das natürliche Klima aber sowohl externen Einflussfaktoren, z. B. einer Änderung der Solarstrahlung und den Folgen von Vulkanausbrüchen, wie internen Schwankungen, z. B. der ozeanischen Zirkulation, unterliegt, die noch nicht endgültig verstanden sind, bleibt hier ein Unsicherheitsbereich. Ein Qualitätstest für Modellrechnungen ist die Simulation des Klimas der vergangenen Jahrzehnte. Da hier in den letzten Jahren, besonders seit der Einbeziehung der Sulfat-Aerosole, eine zunehmend bessere Übereinstimmung erzielt wurde, ist auch das Vertrauen in die Prognosen über das Klima des 21. Jahrhunderts gewachsen.



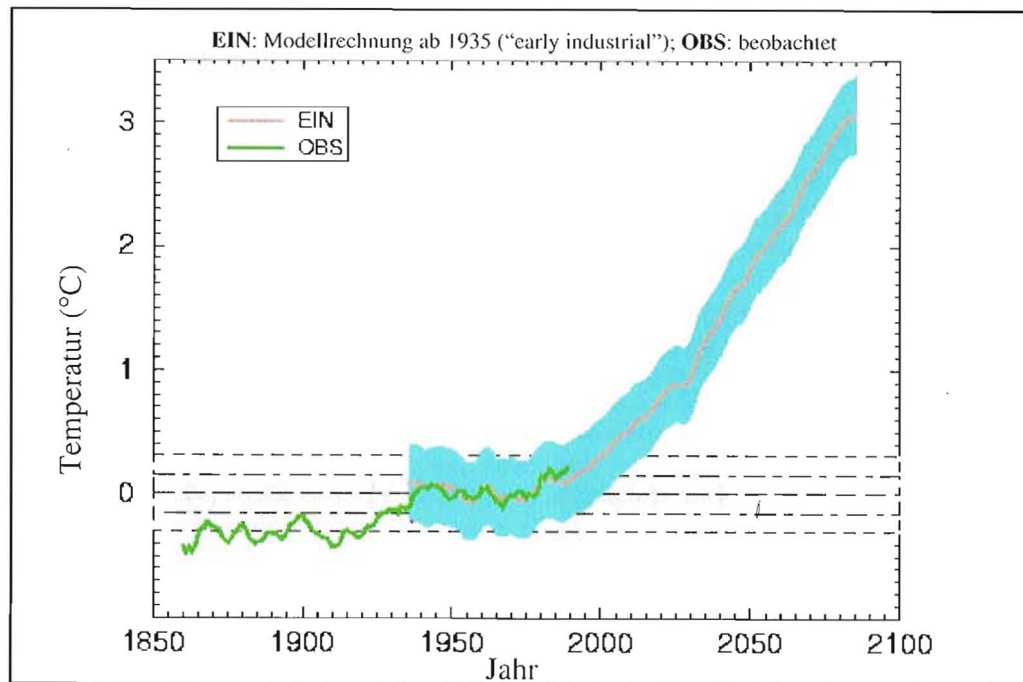


Abb. 3.2: Veränderung der globalen Mitteltemperatur 1935-2085  
(Quelle: MPI/DKRZ)

### 3.3. Das Klima im 21. Jahrhundert

#### Die globale Durchschnittstemperatur

Bis ca. 1994 galt eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur in 100 Jahren um etwa 3°C bei dem Szenario „weiter wie bisher“ (Szenario IS92a) als wissenschaftlicher Konsens. Abb. 3.2 zeigt eine Modellrechnung des DKRZ, deren Ergebnis in diesem Bereich liegt.<sup>1</sup> Die „OBS“-Kurve gibt die beobachtete Temperatur seit 1860 wieder. Der untere, horizontale Balken zeigt die berechnete Schwankungsbreite des Klimas ohne anthropogenen Einfluss. Die „EIN“-Kurve („EIN“ leitet sich von „early industrial“ ab) zeigt den Anstieg der globalen Mitteltemperatur von 1935 bis 2085 um 3 °C durch die Zunahme der Konzentration von Treibhausgasen nach dem IPCC-Szenario IS92a; der Balken gibt die Variabilität des Modellklimas an.

Gegenüber früheren Prognosen, die als Startpunkt 1885 gewählt hatten, wurde durch den Beginn der Modellrechnung im Jahre 1935 eine um 10 % höhere Temperatur für das Jahr 2085 ermittelt. Der Grund liegt in der Minderung des sogenannten Kaltstart-Problems. Bei Modellrechnungen mit dem Startpunkt 1885 wurden Atmosphäre und Ozean im Gleichgewicht mit der gegenwärtigen Konzentration der Treibhausgase angesetzt. Dadurch wurde die Spätwirkung der zunehmenden Treibhausgaskonzentration vom Beginn der Industriali-

<sup>1</sup> CUBASCH, U. et al. (1995): A climate change simulation starting from 1935, *Climate Dynamics*, 11, 752–762

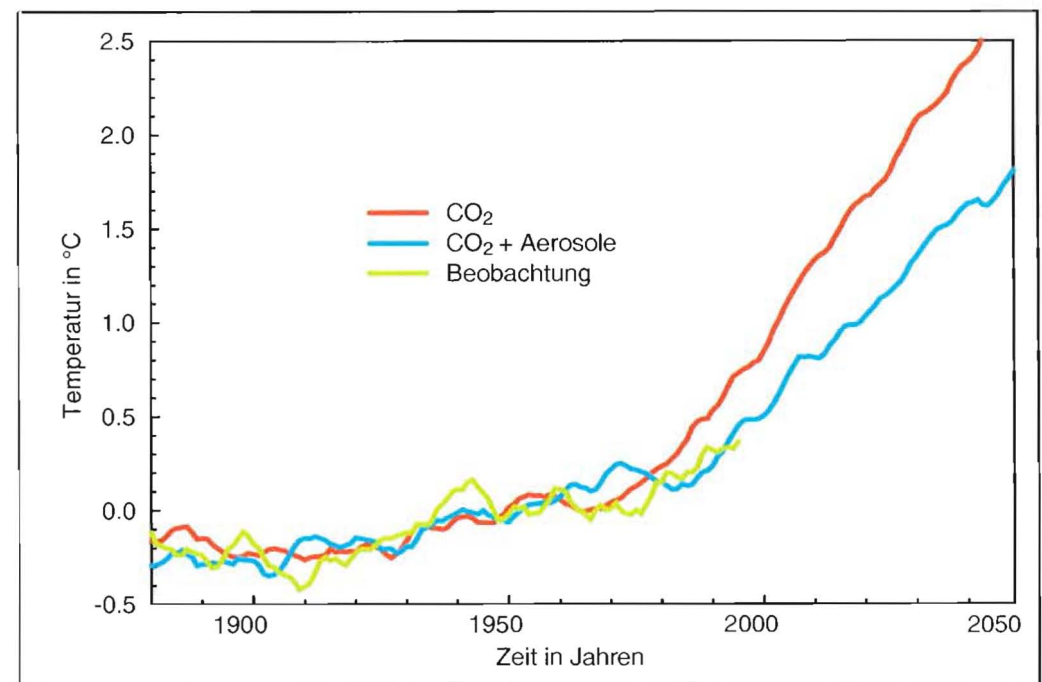


Abb. 3.3: Temperaturanstieg 1880-2050 bei CO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> + Aerosole  
(Quelle: MPI/DKRZ)

sierung (ca. 1750) bis zur Gegenwart nicht berücksichtigt. Frühere Erwärmungen des mittleren und tiefen Ozeans, die erst nach Jahrzehnten an die Atmosphäre weitergegeben werden, konnten so nicht erfasst werden.

Erst seit etwa 1995 wird in den Modellrechnungen zur Temperaturentwicklung im 21. Jahrhundert neben der Wirkung der anthropogenen Treibhausgase auch die von Aerosolen berücksichtigt. Vor allem aufgrund der Aerosol-Wirkung hat der IPCC seine früheren Prognosen um ein Grad Celsius nach unten korrigiert.<sup>2</sup> Aber auch die thermische Trägheit des Ozeans spielt dabei eine Rolle. So wird gegenwärtig bei dem Szenario IS92a eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur gegenüber heute um 2 °C im Jahre 2100 angenommen. In Abhängigkeit von den Szenarien reicht die Schwankungsbreite von 0,9 bis 3,5 °C.

Damit ist aber keineswegs Beruhigung angesagt. In jedem Fall wird die Erwärmungsrate im nächsten Jahrhundert höher sein als jemals in den letzten 10000 Jahren. Die Verzögerung durch den Ozean bedeutet, dass auch nach einer möglichen Stabilisierung der Konzentration der Treibhausgase z. B. im Jahre 2100 die Erwärmung noch um 1–2 °C weitergehen wird. Außerdem ist die Wirkung der Aerosole nicht nur positiv zu sehen. Sie sind erstens an der Entstehung des „sauren Regens“ beteiligt und können somit indirekt den Treibhauseffekt durch Schädigung der Wälder wieder fördern. Und sie haben zweitens eine nicht unproble-

<sup>2</sup> HOUGHTON, J.T. et al. (1996): *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Cambridge, S. 289



matische regional differenzierte Wirkung, da ihre Verbreitung aufgrund der geringen Lebensdauer von einigen Tagen bis wenigen Wochen auf die Entstehungsgebiete und deren Lee-Zonen beschränkt ist.

Abb. 3.3 gibt eine neuere Modellrechnung des DKRZ wieder, die durch den Beginn mit den Bedingungen des Jahres 1880 das Kaltstart-Problem noch weiter reduziert hat. Sie zeigt neben der beobachteten globalen Mitteltemperatur die berechnete zeitliche Temperaturentwicklung mit und ohne Berücksichtigung des Aerosol-Effekts (Unsicherheitsbereiche sind nicht angegeben). Bis in die 70er Jahre verlaufen die beiden Modellkurven und die Beobachtung nahe zusammen. Das spricht zum einen für die Qualität der Modellrechnung, die das reale Klima gut simuliert, und zeigt zum anderen, dass bis dahin die klimatische Wirkung der Aerosole nur gering war. Danach verläuft die Kurve der Beobachtung zwischen den beiden Modellkurven, die ab 1975 ohne Berücksichtigung der Aerosole einen Temperaturanstieg um  $0,35^\circ\text{C}$  pro Jahrzehnt und mit deren Berücksichtigung um  $0,25^\circ\text{C}$  anzeigen. Das bedeutet eine Steigerung der globalen Durchschnittstemperatur in 100 Jahren um  $3,5^\circ\text{C}$  (ohne Aerosole) bzw.  $2,5^\circ\text{C}$  (mit Aerosolen). Die höheren Werte gegenüber den IPCC-Angaben sind möglicherweise in den Fortschritten bei der Eliminierung des Kaltstart-Problems begründet. D. h. auch bei Einbeziehung der Aerosole und bei Berücksichtigung des Unsicherheitsbereichs der Modellrechnungen könnte es am Ende des nächsten Jahrhunderts bei dem „weiter wie bisher“-Szenario durchaus um fast  $3^\circ\text{C}$  wärmer als heute sein.

### Regionale Veränderungen im 21. Jahrhundert

Wesentlich ungesicherter als die globalen sind die regionalen Prognosen für das Klima im 21. Jahrhundert. Interne Klimaschwankungen wirken sich in der Regel regional stärker aus als im globalen Durchschnitt. So können Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation eine regionale Umverteilung von Wärme auslösen, die sich im globalen Mittel nicht bemerkbar macht. Die kalten europäischen Winter 1995/96 und 1996/97 etwa sind daher kein Widerspruch zu dem globalen Erwärmungstrend. Sie wurden verursacht durch eine Abschwächung des Luftdruckgegensatzes zwischen Azoren-Hoch und Island-Tief, wodurch die sonst durch das Golfstromwasser erwärmten Westwinde weitgehend ausblieben und sich das kalte osteuropäische Hoch ungehindert nach Westen ausbreiten konnte.

Da regionale Schwankungen immer ausgeprägter als großräumige Mittelwerte sind, ist ein schwaches Klima-Änderungssignal im großräumigen Mittel leichter auszumachen als in der regionalen Variabilität. Heutige Klimamodelle sind in der Lage, Zirkulationsmuster zu berechnen, die eine räumliche Ausdehnung von mehr als einigen 100 km besitzen. Im kontinentalen Maßstab lassen sich daher gewisse Wahrscheinlichkeitsaussagen machen. Die prognostizierte Erwärmung ist allgemein über den Kontinenten wesentlich höher als über dem Ozean. Der Hauptgrund liegt in der thermischen Trägheit des Ozeans. In den meisten ozeanischen Gebieten findet zwar nur eine relativ geringe Verzögerung der Erwärmung statt, da nur die wenige 100 m tief reichende Deckschicht erwärmt wird. In Gebieten mit Tiefenkonvektion wird die Temperaturerhöhung dagegen in den mittleren und tiefen Ozean weitergegeben. Die geringste Erwärmung bzw. – durch eine Veränderung der ozeanischen Zirkulation – sogar eine geringe Abkühlung findet sich nach den Modellberechnungen daher rund um die Antarktis und im nördlichen Atlantik, d. h. in den Gebieten mit absinkendem Oberflächenwasser. Ein weiterer Grund für die geringere Temperaturzunahme über dem Ozean liegt auch in einer stärkeren Verdunstung (und damit verbundenen Abkühlung) gegenüber den trockneren Landflächen bei einer globalen Temperaturzunahme.<sup>1</sup>

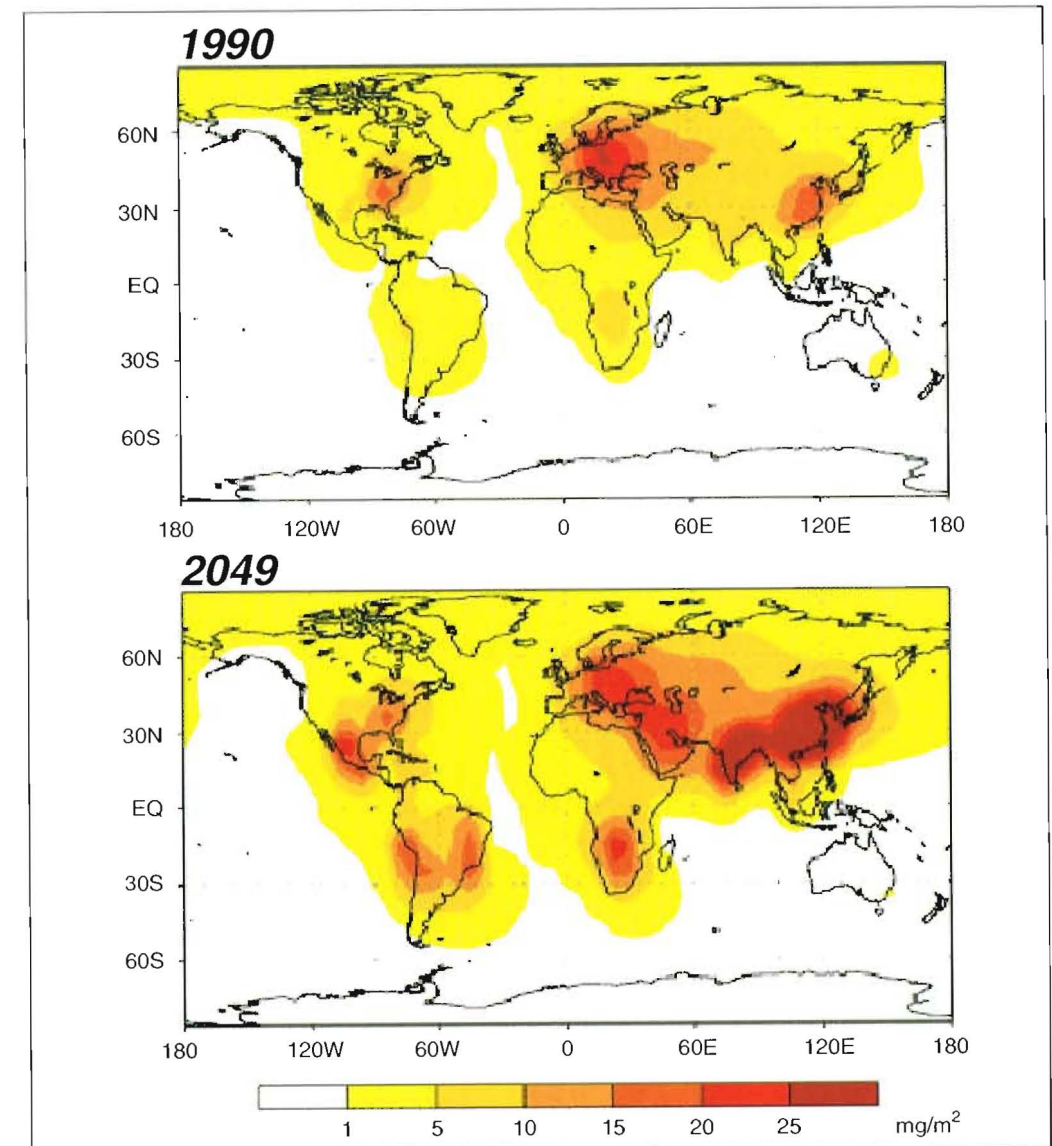


Abb. 3.4: Verbreitung anthropogener Aerosole 1990 und 2049

(Quelle: MPI/DKRZ)

Eine Abkühlung prognostizieren einige Modellrechnungen insbesondere über dem Nordatlantik, da hier zusätzlich eine Schwächung der thermohalinen Golfstromzirkulation durch vermehrte Niederschläge erwartet wird.<sup>2</sup> Die globale Erwärmung fördert insgesamt den hy-

<sup>1</sup> HOUGHTON, J.T. et al. (1996): Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge, S.301

<sup>2</sup> MANABE, S. and R.J.STOUFFER (1999): The role of thermohaline circulation in climate, Tellus, 51, 91–109; RAHMSTORF, S. (1999) : Shifting seas in the greenhouse?, nature 399, 523–524