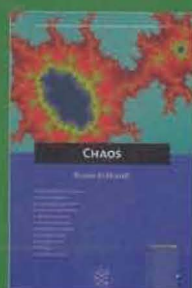


**MOJIB LATIF** ist Professor am Institut für Meereskunde an der Universität Kiel und wurde im Jahre 2000 mit dem »Max-Planck-Preis für öffentliche Wissenschaft« ausgezeichnet. Zahlreiche Veröffentlichungen zum Klimawandel.

**FISCHER KOMPAKT** Verlässliches Wissen kompetent, übersichtlich und auf knappem Raum dargestellt. Hinweise der Autoren auf neueste Entwicklungen, interessante Literatur und empfehlenswerte Links zu jedem Band finden sich im Internet:

[www.fischer-kompakt.de](http://www.fischer-kompakt.de)

**WEITERE TITEL** ▶ Chaos ▶ Gehirn und Sprache ▶ Grundgesetz ▶ Sozialstaat ▶ Spezielle Relativitätstheorie



[www.fischer-kompakt.de](http://www.fischer-kompakt.de) € 8,90 (D)  
ISBN 3-508-16125-8

9 783598 161256

FISCHER KOMPAKT

Co  
1  
La

KLIMA

16125

Klima ist das, was man erwartet,  
Wetter ist das, was man bekommt.

# KLIMA

Mojib Latif

- Wetter und Klima
- Treibhauseffekt
- Klimaschwankung
- Einfluss des Menschen
- Prognosen
- Kyoto-Protokoll
- Klimamodelle
- Wolken und Niederschlag
- El Niño
- Golfstrom
- Ozonloch



Die Bände der Reihe Fischer Kompakt gliedern sich in vier Abschnitte. Der **GRUNDRISS** gibt eine bündige Gesamtdarstellung des Themas. Die **VERTIEFUNGEN** geben die Möglichkeit, verschiedene Facetten, die im Grundriss angesprochen werden, genauer kennen zu lernen. Das **GLOSSAR** erläutert zentrale Begriffe. Die **LITERATURHINWEISE** geben Empfehlungen für weitere Lektüren. Laufend aktualisierte Hinweise des Autors auf interessante Texte und Links sind im Internet zu finden unter [www.fischer-kompakt.de/klima](http://www.fischer-kompakt.de/klima)

5.109

Die Markierungen in der Marginalspalte, zusammen mit Hervorhebungen im Text, verweisen auf einen entsprechenden Abschnitt in den Vertiefungen.

**Latif, Mojib:**

Klima. - Orig.-Ausg. - Fischer-Taschenbuch-Verl., 2004  
ISBN 3-596-16125-8 kt. : EUR 8.90

Vermittelt werden die wissenschaftlichen Grundlagen der Klimakunde.

(Ccl 1)  
(N 456)

881932 ekz 579.702.8  
1069

# KLIMA

## GRUNDRISS

<b>Wissenschaftliche Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
Was ist der Unterschied zwischen Wetter und Klima? .....	3
Die Zusammensetzung der Atmosphäre .....	5
Der natürliche Treibhauseffekt .....	9
Der anthropogene Treibhauseffekt .....	13
Die globale Kohlenstoffbilanz .....	16
Warum schwankt das Klima? .....	21
Die Eiszeitzyklen .....	23
Vorhersagbarkeit des Klimas .....	26
<b>Das Klima des 20. und 21. Jahrhunderts</b> .....	<b>29</b>
Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) .....	29
Was kann man heute schon an Veränderungen sehen? .....	30
Wer ist schuld an den Veränderungen? .....	33
Was bringt die Zukunft? .....	37
Wie wird das Klima in Europa in der Mitte des 21. Jahrhunderts aussehen? .....	41
Wie stark steigt der Meeresspiegel? .....	46
Was will das Kioto-Protokoll? .....	51

## VERTIEFUNGEN

Einfluss von Vulkanen .....	55
Klimamodelle .....	60
Das Lorenz-Modell .....	62
Die Trägheit des Klimas .....	68
Der Fingerabdruck des Menschen .....	69
Wie entstehen Wolken und Niederschlag? .....	74

Was ist das El Niño-Phänomen? .....	78
Was ist der Golfstrom und wie verhält er sich in der Zukunft? .....	81
Meereis .....	85
Inlandeis .....	89
Vegetation .....	93
Die Nordatlantische Oszillation (NAO) .....	96
Welche Rolle spielen Kondensstreifen für unser Klima? .....	105
Die Ozonproblematik .....	108

## ANHANG

Glossar .....	116
Literaturhinweise .....	127

## WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

### Was ist der Unterschied zwischen Wetter und Klima?

Als Klimaforscher wird man oft gefragt, wie das Wetter am folgenden Tag werden wird. Der Laie unterscheidet offenbar nicht zwischen Wetter und Klima. Die Wetterforschung befasst sich mit der Entstehung, Verlagerung und der Vorhersage einzelner Wetterelemente, etwa eines bestimmten Tiefdruckgebietes oder eines Hurrikans, während die Klimaforschung an der Gesamtheit der Tiefs und Hurrikane interessiert ist und sich beispielsweise der Frage widmet, wie viele Tiefs oder Hurrikane es nächstes Jahr geben wird oder ob sie sich infolge der globalen Erwärmung intensivieren werden. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert das Klima als die Statistik des Wetters über einen Zeitraum, der lang genug ist, um diese statistischen Eigenschaften auch bestimmen zu können. Während das Wetter den physikalischen Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort beschreibt, ist Klima erst dann vollständig beschrieben, wenn auch die Wahrscheinlichkeit für Abweichungen vom Mittelwert angegeben werden kann, also auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von extremen Wetterereignissen, wie beispielsweise der Elbflut des Jahres 2002 oder der Dürre in Deutschland im Jahr darauf. Zur Beschreibung des Klimas wird in der Regel eine Zeitspanne von 30 Jahren als Bezugszeitraum herangezogen.

Der Begriff »Klima« ist von *klinein*, dem griechischen Wort für »neigen«, abgeleitet, denn Sommer und Winter sind Folge der Neigung der Erdachse relativ zur Bahnebene der Erde um die Sonne, der so genannten Ekliptik. Gegenwärtig beträgt die Neigung 23,5 Grad, wo-



durch während des Nordsommers die Nordhalbkugel und während des Südsommers die Südhalbkugel stärker von der Sonne bestrahlt wird. Die übliche geographische Einteilung in Klimazonen folgt überwiegend dem daraus resultierenden Jahresgang meteorologischer Größen wie etwa der Temperatur und des **Niederschlags**. Die Neigung der Erdachse wie auch andere Erdbahnparameter schwanken im Laufe der Jahrtausende und sind mit dafür verantwortlich, dass es in der Erdgeschichte immer wieder starke Klimaumschwünge gegeben hat.

Die im Jahresgang und im Mittel unterschiedliche Einstrahlung der Sonne am Äquator und am Pol sorgt für starke räumliche Unterschiede in der Oberflächentemperatur der Erde. Die daraus resultierenden horizontalen Temperaturunterschiede in der unteren Atmosphäre führen zu Luftdruckunterschieden. Unter dem Einfluss der Schwerkraft und der Rotation der Erde entstehen schließlich die Winde. Die mittleren dreidimensionalen Windverhältnisse bezeichnet man als »allgemeine Zirkulation« der Atmosphäre. Die Atmosphäre ist aber kein isoliertes System, sondern steht mit anderen Komponenten des Erdsystems in Wechselwirkung, der Hydrosphäre (Ozeane und Wasserkreislauf auf Kontinenten und in der Atmosphäre), der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Biosphäre (Tiere und Pflanzen), der Pedosphäre (Boden) und der Lithosphäre (Gestein). Diese Bestandteile definieren das Klimasystem (siehe Abbildung 1) und sie bewegen sich mit völlig unterschiedlichen Geschwindigkeiten und haben drastisch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten. Die Dynamik des Klimasystems und die daraus folgende Statistik des Klimas wird daher durch die stark unterschiedlichen Zeitskalen der individuellen Komponenten geprägt. Die untere Atmosphäre passt sich in Stunden den Bedingungen an der Oberfläche an, die Tiefenzirkulation der Ozeane reagiert erst in Jahrhunderten voll auf eine veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre, und ein großes **Inlandeisgebiet** wie die Antarktis braucht dazu viele



Abbildung 1: Schematische Darstellung des Klimasystems der Erde

Jahrtausende. Klimaveränderungen können einerseits aus Wechselwirkungen zwischen den individuellen Komponenten, beispielsweise zwischen Ozean und Atmosphäre, resultieren oder extern angelegt werden, beispielsweise durch eine Veränderung der solaren Einstrahlung, durch **Vulkanausbrüche** oder durch eine Veränderung der Zusammensetzung der Erdatmosphäre. In den letzten hundert Jahren gewinnt aber auch der Mensch immer mehr Bedeutung für das Klima, indem er klimarelevante Spurengase in die Atmosphäre emittiert, dadurch die Strahlungsbilanz der Atmosphäre verändert und so zu einer globalen Erwärmung der Erde beiträgt.

## Die Zusammensetzung der Atmosphäre

Die optimalen Lebensbedingungen auf der Erde verdanken wir u. a. der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre, die sich von der anderer Planeten im Sonnensystem deutlich unterscheidet. Die Hauptbestandteile der Erdatmosphäre sind Stickstoff ( $N_2$ ) mit 78% und Sauerstoff ( $O_2$ ) mit 21%, die zusammen also einen Anteil von



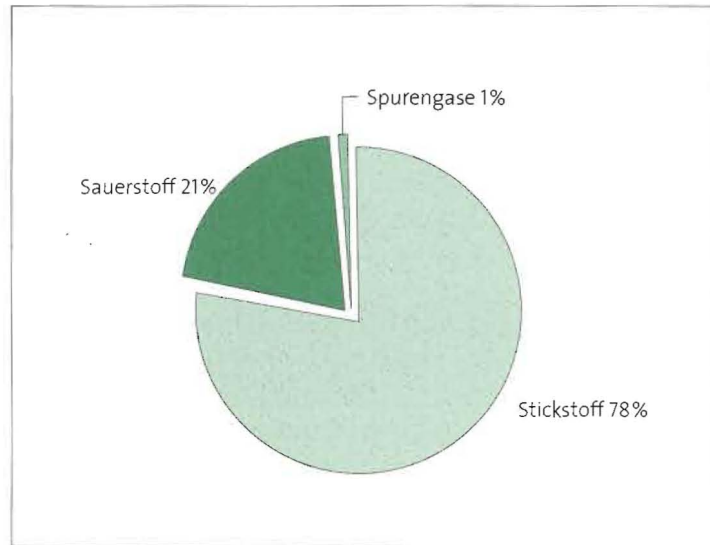
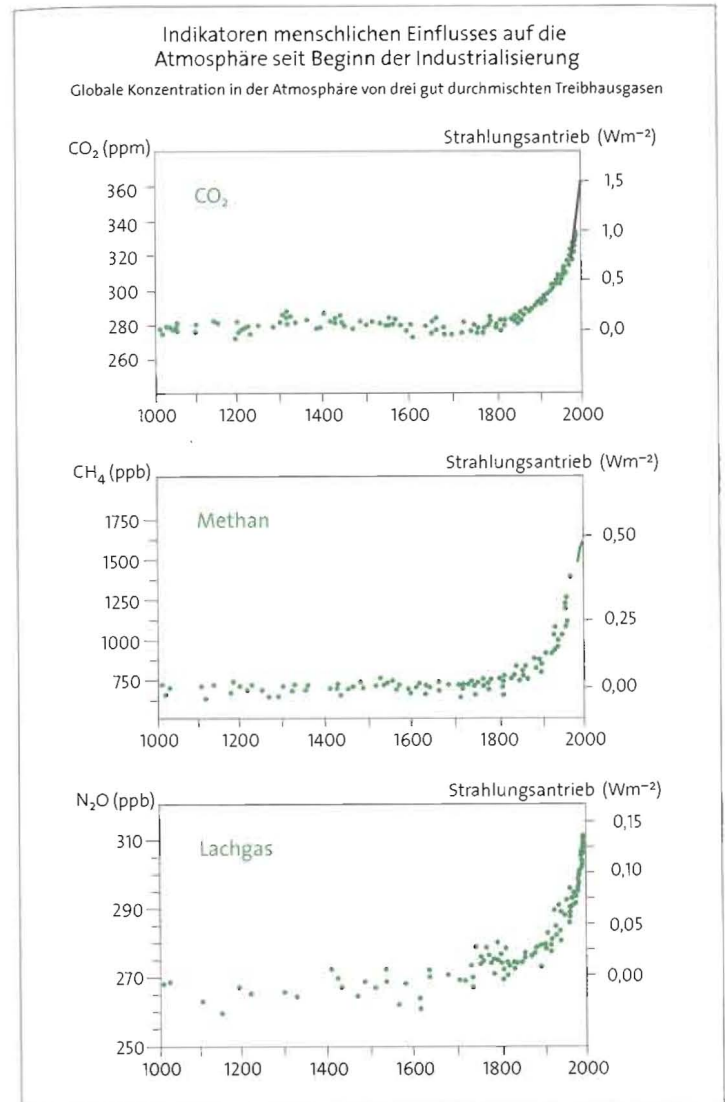


Abbildung 2: Die Zusammensetzung der Atmosphäre

etwa 99% haben. Unser lebensfreundliches Klima auf der Erde haben wir aber einigen wenigen anderen Gasen zu verdanken, die zwar nur in winzigen Spuren vorkommen (daher der Name Spurengase), jedoch einen starken Einfluss auf das Klima der Erde ausüben, indem sie den Strahlungshaushalt der Erde beeinflussen. Hierzu zählen vor allem der Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ), das Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und **Ozon** ( $\text{O}_3$ ). So hat beispielsweise das Kohlendioxid z.Zt. nur einen Anteil von etwa 0,037% (370 ppm, ppm = parts per million), es ist aber für unser derzeitiges und künftiges Klima von großer Bedeutung.

S. 108

Abbildung 3: Zeitliche Entwicklungen der drei Spurengase Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Distickstoffoxid (Lachgas,  $\text{N}_2\text{O}$ ) in den letzten 1000 Jahren. Ebenfalls angegeben sind die entsprechenden Strahlungsantriebe. Man erkennt deutlich den Anstieg der Konzentrationen seit Beginn der Industrialisierung (nach IPCC 2001a).



Messungen belegen zweifelsfrei, dass der Mensch durch seine vielfältigen Aktivitäten die Zusammensetzung der Atmosphäre verändert und dabei insbesondere die Konzentration der langlebigen klimarelevanten Spurengase erhöht (Abbildung 3, Tabelle 1). Dies ist der Kern des Klimaproblems. So stieg die Konzentration von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) um etwa 30%, die des Methans (CH<sub>4</sub>) um ca. 150% und die des Distickstoffoxids (Lachgas, N<sub>2</sub>O) um etwa 17% gegenüber ihren vorindustriellen Werten an. Die Gründe sind vielfältig. Sie liegen im starken Anstieg der Verbrennung fossiler Energieträger ebenso wie in der Ausweitung der industriellen Produktion, in Änderungen bei der Landnutzung oder bei der Ausweitung der Viehwirtschaft. Zum Teil gelangen völlig neue Stoffe wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) in die Atmosphäre, die in der Natur praktisch nicht vorkommen, sondern ausschließlich durch den Menschen erzeugt werden.

Alle diese Stoffe und Gase, zu denen auch Wasserdampf und Ozon gehören, haben eine besondere Eigenschaft. Sie lassen die von der Sonne (vor allem im sichtbaren, kurzwelligen Bereich) auf die Erde einfallende, energiereiche Strahlung nahezu ungehindert passieren, absorbieren teilweise aber die im Gegenzug von der erwärmten Erde ausgehende langwellige Strahlung. Dies ist, vereinfacht gesagt, die Natur des »Treibhauseffekts«. Die dabei beteiligten Gase werden allgemein als »Treibhausgase« bezeichnet.

Die vom Menschen in die Atmosphäre emittierten Treibhausgase haben relativ lange Lebensdauern. Beim Kohlendioxid schwankt die Lebensdauer stark in Abhängigkeit vom betrachteten Entfernungsprozess, sie beträgt im Mittel aber etwa hundert Jahre. Darüber hinaus schwanken die Raten der Konzentrationsänderungen auch innerhalb bestimmter Grenzen, die in der Tabelle angegebenen Zahlen sind daher als Mittelwerte über die 1990er zu verstehen. Die Spurengase verteilen sich wegen ihrer langen Lebensdauer über den Erdball und sind daher global wirksam, unabhängig vom Ort ihres Ausstoßes. Da die Senken nicht ausreichen, um die durch den Men-

	Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	Methan CH <sub>4</sub>	Distickstoffoxid N <sub>2</sub> O	Freon-11 FCKW-11	Fluorform HFC-23	Trifluormethan CF <sub>4</sub>
Vorindustrieller Wert	280 ppm	700 ppb	270 ppb	0	0	40 ppt
Konzentration 1998	365 ppm	1745 ppb	314 ppb	268 ppt	14 ppt	80 ppt
Rate der Konzentrationsveränderung in den 90ern [pro Jahr]	1,5 ppm	7,0 ppb	0,8 ppb	-1,4 ppt	0,55 ppt	1,0 ppt
Atmosphärische Lebensdauer in Jahren	ca. 100 (5–200)	12	114	45	260	> 50000

Tabelle 1: Die wichtigsten anthropogenen Spurengase und einige ihrer Charakteristika (nach IPCC 2001). Die Einheiten ppm, ppb und ppt sind aus dem Englischen übernommen und bedeuten parts per million, parts per billion und parts per trillion.

schen in die Atmosphäre eingebrachten Treibhausgase komplett zu entfernen, steigen ihre Konzentrationen an. Dabei verhält es sich so ähnlich wie mit der Staatsverschuldung bei uns in Deutschland, die durch laufende Neuverschuldung immer weiter in die Höhe getrieben wird. Selbst ein Zurückfahren der Neuverschuldung, sagen wir auf die Hälfte des Vorjahres, würde die Schuldenlast ansteigen lassen. Ein geringfügiges Zurückfahren des Ausstoßes der Treibhausgase durch den Menschen hätte einen entsprechenden Effekt, die Konzentrationen der meisten Treibhausgase würden trotzdem weiter ansteigen.

## Der natürliche Treibhauseffekt

Wenn über das Klimaproblem gesprochen wird, fällt oft das Stichwort Treibhauseffekt, eine natürliche Eigenschaft der Erdatmosphäre. Es ist dieses Phänomen, das uns die optimalen Lebensbedingun-

gen auf der Erde garantiert. Wegen der Analogie mit den Vorgängen in einem Treibhaus, dessen Glasdach ebenfalls die Sonne gut durchlässt, die Wärme aber nicht hinauslässt, ist das hier beschriebene Phänomen auch als natürlicher Treibhauseffekt bekannt. Die dafür in der Atmosphäre verantwortlichen Gase werden häufig als Treibhausgase bezeichnet.

Bekanntlich sendet Materie elektromagnetische Strahlung aller Wellenlängen in Form von Photonen aus (Emission), und zwar um so mehr je wärmer der emittierende Körper ist. So sorgt beispielsweise die Emission elektromagnetischer Strahlung an der (heißen) Sonnenoberfläche für Energie in Form des sichtbaren Lichtes auf der Erde. Einfallende elektromagnetische Strahlung wird aber auch von Materie verschluckt (Absorption) und trägt dadurch zur Energieerhöhung der Umgebung bei, die sich meist in einer Erwärmung ausdrückt. Bei den im Vergleich zur Sonne niedrigen Temperaturen des irdischen Klimasystems findet die Emission elektromagnetischer Strahlung durch die Erdoberfläche und/oder Atmosphärenbestandteile überwiegend im nicht-sichtbaren, so genannten thermischen, Bereich des Spektrums (zwischen etwa 3 und 100  $\mu\text{m}$ ) statt, weshalb man auch oft von Wärmestrahlung spricht.

Wichtig ist auch, dass Emission und Absorption vor allem bei Gasen sehr stark von der Wellenlänge abhängen können, weshalb oft von Emissionslinien oder -banden (Ansammlungen von Linien) die Rede ist. Insbesondere bei den beiden wichtigen Treibhausgasen Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) finden die wesentlichen Absorptions- und Emissionsvorgänge in solchen Banden statt. Dagegen besitzen gerade die beiden Hauptgase der Atmosphäre Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) oder Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) im energetisch wichtigen Bereich des Spektrums keine wesentliche Emission und Absorption.

Bei einer Erde ohne Atmosphäre wäre die Oberflächentemperatur ausschließlich durch die Bilanz zwischen eingestrahelter Sonnenenergie und der von der Oberfläche abgestrahlten Wärmestrahlung

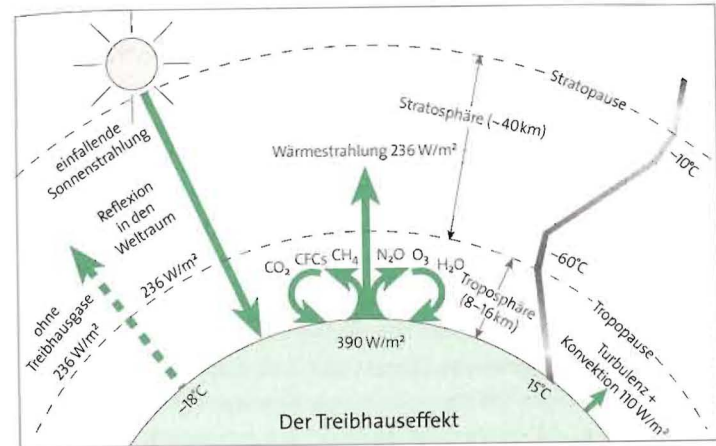


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Strahlungshaushaltes der Atmosphäre und des natürlichen Treibhauseffekts

festgelegt. Bei gleichem Rückstreuvermögen (Albedo) des Planeten wie heute würde diese Oberflächentemperatur im globalen Mittel etwa  $-18^\circ\text{C}$  betragen, sie beträgt heute jedoch ca.  $+15^\circ\text{C}$  (siehe Abbildung 4). Selbst eine Atmosphäre aus reinem Sauerstoff und Stickstoff, die ja die Hauptkomponenten (99%) unserer Atmosphäre bilden, würde daran nichts Wesentliches ändern: Unser Planet wäre eine Eiswüste.

Dagegen absorbieren Wasserdampf und in geringerem Maße auch  $\text{CO}_2$  (und andere Spurengase) einen kleinen Teil der Sonnenstrahlung und geben selbst Wärmestrahlung ab. In Richtung zum Erdboden übertrifft diese zusätzliche Wärmestrahlung aus der Atmosphäre die Reduktion der Sonnenstrahlung und bewirkt so am Erdboden eine höhere Energieeinstrahlung, als dies ohne solche Gase der Fall wäre. Diese vermehrte Einstrahlung führt zu einer Erwärmung der Erdoberfläche und (infolge verschiedener Transportvorgänge) auch der unteren Atmosphäre.



Diese Erwärmung der Erdoberfläche führt aber auch zu einem Ausgleich der Strahlungsbilanz am Atmosphärenoberrand, denn im längerfristigen Mittel muss die Erde ja genau so viel Wärmestrahlung in den Weltraum abgeben, wie sie Strahlung von der Sonne absorbiert. Die von der Erdoberfläche nach oben gestrahlte Energie wird von den atmosphärischen Spurengasen (teilweise) auch absorbiert, gelangt also nur zum Teil direkt in den Weltraum. Dafür emittieren die Spurengase selbst entsprechend ihrer Temperatur, die aber wegen der Temperaturabnahme bei steigender Höhe in der Atmosphäre geringer ist als die der Erdoberfläche. Daher verlässt mit zunehmender Menge an Spurengasen bei konstanter Temperatur der Erdoberfläche immer weniger Energie in Form von Wärmestrahlung die Erde in den Weltraum. Durch die erhöhte Oberflächentemperatur wird dieses Defizit in der Strahlungsbilanz aber wegen der von der Erdoberfläche ausgehenden erhöhten Wärmestrahlungsmenge wieder ausgeglichen. Für diesen Ausgleich ist vor allem das atmosphärische Strahlungsfenster hilfreich, ein Spektralbereich bei 10  $\mu\text{m}$  Wellenlänge innerhalb dessen die Strahlung von der Oberfläche bei wolkenloser Atmosphäre in den Weltraum entweichen kann.

Messungen der Wärmeabstrahlung in den Weltraum durch Satelliten lassen auf eine Temperaturerhöhung der Erdoberfläche durch den natürlichen Treibhauseffekt von etwa 33°C schließen. Zu dieser lebenserhaltenden Erwärmung trägt Wasserdampf den weitaus größten Teil – ungefähr zwei Drittel – bei; es folgen Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) mit einem Anteil von ca. 15%, Ozon mit etwa 10% und schließlich Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) mit jeweils ungefähr 3%. Die Existenz der Spurengase ist daher trotz ihrer geringen Konzentration einer der entscheidenden Faktoren, die unser Klima bestimmen.

Die Spurengase führen also insgesamt dazu, dass Wärme in der unteren Atmosphäre gefangen ist. Die Atmosphäre ist aber weitgehend transparent für die solare Strahlung.

Bei der Interpretation verschiedener Klimavorgänge ist Vorsicht geboten vor der allzu direkten Übertragung des Treibhausbildes. Die physikalischen Prozesse im richtigen Treibhaus sind völlig andere als die in der Atmosphäre ablaufenden. Außerdem sind natürlich die Verhältnisse in der strömenden Atmosphäre mit Bewölkung viel komplizierter als im Glashaus eines Gärtners.

## Der anthropogene Treibhauseffekt

Werden die natürlich vorhandenen Treibhausgase (z.B.  $\text{CO}_2$ ) durch anthropogenen (menschlichen) Einfluss vermehrt oder durch neue Stoffe, z.B. die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) ergänzt, so muss dies Auswirkungen auf unser Klima haben. Eine erhöhte Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre führt zwangsläufig infolge des verstärkten (anthropogenen) Treibhauseffektes zu einer Erhöhung der Temperatur der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre. Andere Faktoren, die ebenfalls Einfluss auf das Klima haben können, wie z.B. durch Flugzeuge verursachte **Kondensstreifen** oder der Ausstoß von Schwebstoffen (Aerosolen), werden hier nicht im Detail betrachtet. Die Abbildung 5 zeigt die so genannten Strahlungsantriebe der verschiedenen externen (anthropogenen und natürlichen) Faktoren, die unser Klima seit dem Beginn der Industrialisierung beeinflussen. Strahlungsantriebe entstehen durch Änderungen der atmosphärischen Zusammensetzung, Veränderung der Oberflächenreflexion durch Landnutzung und Einstrahlungsschwankungen der Sonne. Strahlungsantriebe durch die nur kurzfristig wirkenden Vulkane sind nicht dargestellt.

Die Konzentration der langlebigen Treibhausgase nimmt systematisch zu: Seit Beginn der Industrialisierung bis heute bei Kohlendioxid um ca. 30%, bei Methan um ca. 150% und bei Distickstoffoxid um ca. 17%. Hauptursache für die beobachtete Entwicklung ist mit 50% die Nutzung fossiler Brennstoffe. Aus der Chemieproduktion stam-

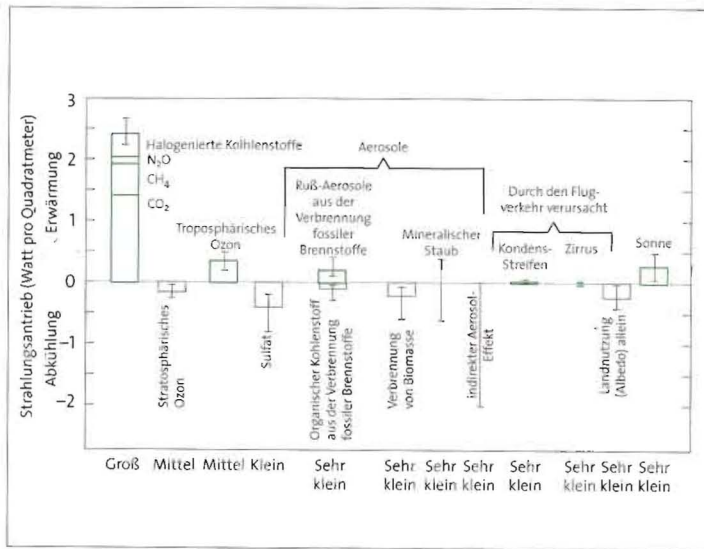


Abbildung 5: Der mittlere globale Strahlungsantrieb des Klimasystems im Jahr 2000, im Vergleich zu 1750. Die Unsicherheit ist jeweils durch die Balken angegeben. Bei dem indirekten Aerosoleffekt handelt es sich um den Effekt der Aerosole auf die Wolkenbildung. Nach IPCC (2001a).

men knapp 20% des gesamten weltweiten Ausstoßes von Treibhausgasen. Hier handelt es sich vor allem um die FCKWs. Eine weitere wichtige Quelle der global emittierten Treibhausgase ist die zunehmend intensiver betriebene Landwirtschaft mit 15% der Emissionen. Die Vernichtung der Wälder macht weitere 15% aus. Der aus diesem Anstieg anthropogener Treibhausgase seit der vorindustriellen Zeit resultierende Strahlungsantrieb ist positiv und beträgt etwa  $2,4 \text{ W/m}^2$ , was zu einer Erwärmung führen muss. Der Strahlungsantrieb des Aerosoleffektes ist negativ, führt also zu einer Abkühlung. Letzterer ist aber kleiner als der Strahlungsantrieb durch die anthropogenen Treibhausgase. Die Summe aller Faktoren, inklusive des

Sonneneffekts, ist positiv, wobei der Effekt der anthropogenen Treibhausgase deutlich dominiert. Während der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wuchs der positive Strahlungsantrieb der gut durchmischten Treibhausgase schnell an, während im Gegensatz hierzu die Summe aller natürlichen Strahlungsantriebe negativ war. Der Mensch ist also dabei, einen entscheidenden Einfluss auf das Klima auszuüben.

Durch den positiven Strahlungsantrieb wird eine langfristige Erwärmung der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche angestoßen, deren Ausmaß mit der Konzentrationsänderung ansteigt, aber auch stark von der Reaktion des Wasserkreislaufs (Wasserdampf, Bewölkung, Niederschlag, Verdunstung, Schneebedeckung, **Meereis- ausdehnung**) bestimmt wird. Der Wasserkreislauf kann sowohl verstärkend wie dämpfend eingreifen, weil viele seiner Zweige stark temperaturabhängig sind. Besonders wichtig ist die so genannte Wasserdampfrückkopplung; infolge der Erwärmung der unteren Atmosphäre kann diese auch mehr Wasserdampf aufnehmen. Wasserdampf ist, wie wir wissen, ebenfalls ein Treibhausgas, so dass dadurch die anfängliche Erwärmung weiter verstärkt wird. Wir sprechen von einer »positiven Rückkopplung«. Die Wasserdampfückkopplung ist die wirkungsvollste der verschiedenen Rückkopplungen, und sie wird natürlich auch bei den Klimamodellsimulationen berücksichtigt. Da die Erwärmung regional und innerhalb eines Jahres unterschiedlich ist und weil die Strahlungsbilanzstörung bei einer Konzentrationsänderung von der Struktur der Atmosphäre, der Jahreszeit und vom Oberflächentyp abhängt, führt ein erhöhter Treibhauseffekt auch zu veränderten Werten des Niederschlags, der Bewölkung, der Meereisausdehnung, der Schneebedeckung und des Meeresspiegels sowie zu anderen Wetterextremen, d.h. zu einer globalen Klimaveränderung. Für die Menschheit besonders wichtig sind hierbei die mögliche Veränderung in der Statistik extremer Wetterereignisse und ein möglicher langfristiger Anstieg des Meeresspiegels von vielen Metern.



## Die globale Kohlenstoffbilanz

Das wichtigste Treibhausgas im Hinblick auf den anthropogenen Treibhauseffekt ist das Kohlendioxid, das einen Anteil von ca. 60% an dem (durch die gut durchmischten Treibhausgase verursachten) anthropogenen Treibhauseffekt hat. Methan hat einen Anteil von ca. 20% und die FCKWs von knapp 15%. Diese Zahlen sind nicht mit denen des natürlichen Treibhauseffektes zu verwechseln, für den der Wasserdampf mit ca. 60% das dominierende Gas ist. Das zusätzliche Kohlendioxid entsteht vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, das sind Erdöl, Kohle und Erdgas. Der weltweite CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist daher eng an den weltweiten Energieverbrauch gekoppelt, da die Energiegewinnung vor allem auf der Verfeuerung fossiler Brennstoffe basiert. Vom Menschen in die Atmosphäre emittiertes CO<sub>2</sub> hat eine typische Verweildauer von ca. 100 Jahren, was die Langfristigkeit des Klimaproblems verdeutlicht. Etwa drei Viertel der CO<sub>2</sub>-Emissionen kommen zurzeit noch von den Industrienationen, in denen aber nur 25% der Weltbevölkerung leben. Dabei nehmen die USA mit etwa einem Viertel Anteil am weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoß den Spitzenplatz ein. Mit der Beschleunigung des wirtschaftlichen Wachstums wird jedoch der Anteil der Entwicklungsländer in den nächsten Jahrzehnten zunehmen.

Die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre hat sich seit Beginn der industriellen Revolution rasant erhöht. Lag der CO<sub>2</sub>-Gehalt um 1800 noch bei ca. 280 ppm, so liegt er heute schon bei ca. 370 ppm (Tabelle 1). Dass der Mensch für diesen Anstieg verantwortlich ist, ist unstrittig. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt heute schon so hoch ist wie seit ca. 400 000 Jahren nicht mehr. Dabei hat man die Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre aus Eisbohrkernen der Antarktis rekonstruiert, indem die im Eis eingeschlossenen Luftbläschen analysiert wurden. Die Temperaturen wurden ebenfalls, und zwar aus Sauer-

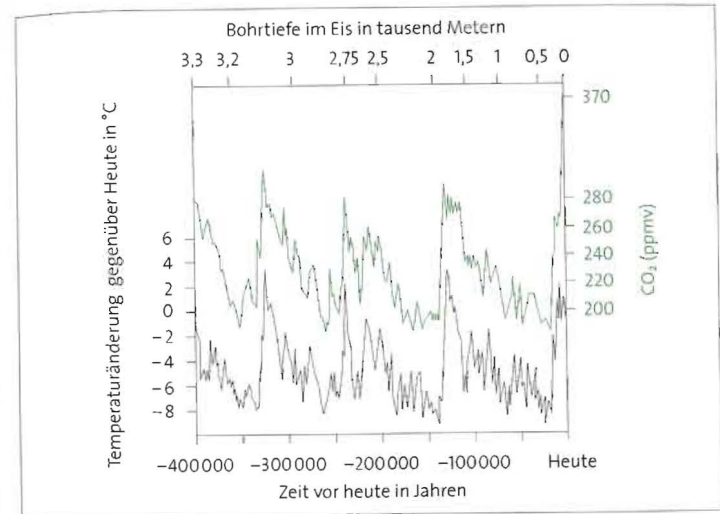


Abbildung 6: Schwankungen der Konzentration des Kohlendioxids (grüne Kurve) und der Temperatur (schwarze Kurve) der letzten ca. 400 000 Jahre.

stoffisotopenmessungen, abgeleitet. Man erkennt eine erstaunliche Parallelität der Verläufe von CO<sub>2</sub>-Gehalt und Temperatur, was auf einen engen Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen hindeutet. Den gleichen Sachverhalt beobachtet man zwischen der Temperatur und der Methankonzentration. Es scheint offensichtlich eine positive Rückkopplung zwischen der Temperatur und den Treibhausgaskonzentrationen zu geben: Eine Temperaturänderung führt zu einer Änderung der Treibhausgaskonzentrationen, welche die anfängliche Temperaturänderung weiter verstärkt. Ebenso führt eine Änderung der Treibhausgaskonzentration zu einer Änderung der Temperatur, welche die anfängliche Änderung der Treibhausgaskonzentration noch weiter verstärkt. Es sind diese positiven Rückkopplungen, die das Klimasystem sehr empfindlich auf relativ kleine externe Anregungen reagieren lässt.



Man erkennt in der Abbildung 6 auch, dass der  $\text{CO}_2$ -Gehalt zwar immer Schwankungen unterlegen ist, sich die  $\text{CO}_2$ -Konzentration aber typischerweise zwischen ca. 200 und 300 ppm bewegt hat. Während der letzten Eiszeit vor etwa 20 000 Jahren lag der  $\text{CO}_2$ -Gehalt bei etwas unterhalb von 200 ppm, während der letzten Warmzeit vor ca. 120 000 Jahren bei ca. 300 ppm. Wir befinden uns also heute in einem Bereich, der einmalig für die Menschheit ist und weit außerhalb der natürlichen Schwankungsbreite liegt. Es ist von daher schon äußerst unwahrscheinlich, dass der beobachtete  $\text{CO}_2$ -Anstieg auf natürliche Ursachen zurückzuführen ist. Darüber hinaus kann man mit modernen Meßmethoden sicher den Menschen als Verursacher entlarven. Messungen des Kohlenstoff-Isotops  $\text{C}^{14}$  erlauben, zwischen Kohlendioxid aus natürlichen (biogenen) Quellen und solchem, das z. B. durch Verbrennung fossiler Brennstoffe entstanden ist, zu unterscheiden. Durchgeführte  $\text{C}^{14}$ -Messungen bestätigen, dass der Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre anthropogenen Ursprungs ist und nicht auf Freisetzungen aus den Ozeanen zurückzuführen ist. Weiterhin zeigen direkte Kohlendioxid-Messungen, die parallel in Atmosphäre und Ozean durchgeführt werden, dass Kohlendioxid von der Atmosphäre in den Ozean übergeht, die Ozeane also als eine Kohlendioxid-Senke wirken. Im Folgenden wollen wir uns mit dem globalen Kohlenstoffkreislauf beschäftigen, um zu verstehen, wo das vom Menschen in die Atmosphäre emittierte  $\text{CO}_2$  verbleibt.

Inzwischen gibt es ein weltweites  $\text{CO}_2$ -Messnetz. Die erste Messstation wurde 1958 am Observatorium Mauna Loa auf Hawaii eingerichtet. Heute gibt es ein weltumspannendes Messnetz, und es wird sogar in der Antarktis gemessen. Mit Hilfe dieser Messungen und vieler anderer Beobachtungen kann man die globale Kohlenstoffbilanz abschätzen. Grundsätzlich kann man sagen, dass etwa die Hälfte des anthropogenen  $\text{CO}_2$  von den Ozeanen und der **Vegetation** aufgenommen werden, während die andere Hälfte in der Atmo-

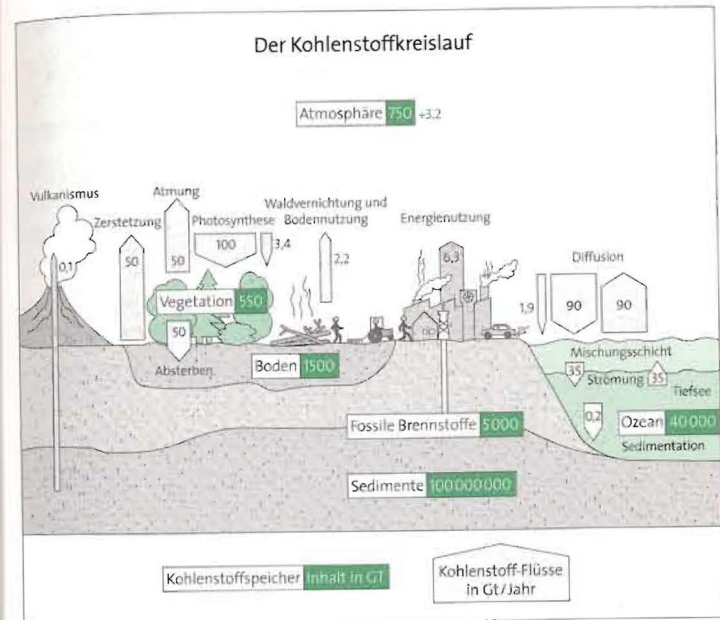


Abbildung 7: Der globale Kohlenstoffkreislauf

sphäre verbleibt. Obwohl die Kohlenstoffflüsse zwischen Ozean und Atmosphäre oder Land und Atmosphäre sehr viel größer sind als die Störung durch den Menschen, ist der anthropogene  $\text{CO}_2$ -Eintrag der zurzeit für das Klima dominierende Faktor, da die natürlichen Kohlenstoffflüsse, obwohl deutlich größer, sich weitgehend balancieren, d. h. beispielsweise vom Ozean normalerweise so viel  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre gelangt, wie er selbst wieder aufnimmt (Abbildung 7). Dasselbe gilt für die Flüsse zwischen Land und Atmosphäre. Diese Balance garantierte in den letzten Jahrhunderten eine relativ konstante atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration von etwa 280 ppm. Der Mensch stört dieses Gleichgewicht, wodurch der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung rasant ansteigt.

(1)	Emissionen aus Verbrennung von Gas, Kohle und Öl	$6,3 \pm 0,4$
(2)	Beobachtete atmosphärische Zunahme	$3,2 \pm 0,1$
(3)	CO <sub>2</sub> -Aufnahme durch den Ozean	$1,9 \pm 0,7$
(4)	Nettobilanz der terrestrischen Biosphäre = (1) - ((2) + (3))	$1,2 \pm 0,8$
(5)	Emissionen verursacht durch Landnutzungsänderungen (u.a. Brandrodungen in den Tropen)	$2,2 \pm 0,8$
(6)	CO <sub>2</sub> -Aufnahme durch andere Prozesse (u.a. nachwachsende Wälder, CO <sub>2</sub> -Düngungseffekt, Stickstoffdüngung, Klimavariabilität) = (4) + (5)	$3,4 \pm 1,1$

Tabelle 2: Atmosphärische Kohlenstoffbilanz 1990–99

Einheit: GtC/a (Pg Kohlenstoff pro Jahr)

Tabelle 2 stellt die globale Bilanz des atmosphärischen CO<sub>2</sub> für den Zeitraum 1990–1999 dar, wie sie aus aktuellen Messungen ermittelt wurde. Entsprechend standen den weltweiten Emissionen aus dem Verbrauch von fossilen Brennstoffen – 6,3 GtC/a (Gigatonne Kohlenstoff pro Jahr); 1 GtC = 10<sup>15</sup>g C oder 1 Pg C (Petagramm Kohlenstoff) – eine Zunahme in der Atmosphäre von 3,2 GtC/a und eine Aufnahme durch den Ozean von ca. 1,9 GtC/a gegenüber. Damit ergibt sich eine Nettoaufnahme der terrestrischen Biosphäre von 1,2 GtC/a. Berücksichtigt man jedoch zudem die Emissionen aus Änderungen der

Landnutzung (2,2 GtC/a), z. B. die Brandrodung der tropischen Regenwälder, die aus Statistiken der Landwirtschaftsflächen und Annahmen über Kohlenstoffgehalt in Vegetation und Böden von natürlichen und landwirtschaftlich genutzten Flächen abgeschätzt werden können, dann sind Senkenprozesse mit einem Beitrag von insgesamt 3,4 GtC/a zu suchen, um die Bilanz der terrestrischen Biosphäre zu schließen. Kontrovers diskutiert werden insbesondere die »Düngung« der Vegetation durch die Zunahme des atmosphärischen CO<sub>2</sub> oder durch anthropogenen Stickstoffeintrag, aber auch in der Vergangenheit stärker bewirtschaftete Wälder, welche heute nachwachsen und damit zusätzlichen Kohlenstoff binden können. Es ist aber auch möglich, dass natürliche Klimaschwankungen (z. B. Änderungen der Ozeanzirkulation, Dürreperioden, Erwärmung in mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre und eine damit verbundene Verlängerung der Vegetationsperiode) Variationen der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration verursachen können.

Die oben diskutierte, auf weltweiten Messungen basierende, globale Kohlenstoffbilanz zeigt eindeutig, dass die Senken offensichtlich nicht ausreichen, das anthropogen in die Atmosphäre eingebrachte CO<sub>2</sub> komplett zu entfernen, woraus sich der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration erklärt. Die Untersuchungen der anderen relevanten Stoffkreisläufe (Methan- und Stickstoffkreislauf) liefern qualitativ ähnliche Ergebnisse, werden hier aber nicht im Detail diskutiert.

## Warum schwankt das Klima?

Eines der herausragenden Charakteristika des Klimas ist seine starke Variabilität, d. h. seine große Schwankungsbreite (Abbildung 6). Das Erkennen anthropogener Klimaänderungen wird durch die Überlagerung natürlicher Klimaschwankungen erschwert. Klimaschwankungen beobachtet man auf einer Vielfalt von Zeitskalen, von Monaten bis hin zu Jahrtausenden. Prinzipiell unterscheidet man zwei



Arten von Klimaschwankungen: externe und interne. Während externe Klimaschwankungen durch Störungen von »außen« angeregt werden, entstehen interne Klimaschwankungen durch Wechselwirkungen in bzw. zwischen den verschiedenen Klimasubsystemen. Die bekanntesten Beispiele für externe Klimaschwankungen sind die Eiszeiten. Diese sind Kälteperioden, begleitet von anomal großer Eisausdehnung, welche unter anderem in Variationen der Erdbahnparameter begründet sind. Den anthropogenen Treibhauseffekt zählen wir ebenfalls zu den externen Klimaschwankungen, wie auch Klimaänderungen, hervorgerufen durch Vulkanausbrüche.

Obwohl Klimaschwankungen im Allgemeinen als längerfristige Änderungen der Eigenschaften der uns umgebenden Atmosphäre (z. B. Lufttemperatur oder Niederschlagshäufigkeit) wahrgenommen werden, sind die Ursachen von Klimaschwankungen nicht unbedingt innerhalb der Atmosphäre zu suchen, sondern vorwiegend auf die Wechselwirkungen mit den trägen Komponenten des Klimasystems (Ozean, Meereis, Landeis, Biosphäre) zurückzuführen. So induzieren nach dem von Hasselmann im Jahre 1976 vorgeschlagenen Konzept des »stochastischen Klimamodells« die mit dem Wettergeschehen assoziierten kurzperiodischen Schwankungen von Lufttemperatur und Wind in Analogie zu der aus der theoretischen Physik bekannten Brown'schen Bewegung langperiodische Schwankungen im Ozean und Meereis.

5.96

Änderungen der Meeresoberflächentemperatur und der Meereseisausdehnung wiederum führen zu Änderungen in den atmosphärischen Wetterabläufen (**Nordatlantische Oszillation**). Die Beobachtungen zeigen, dass Klimaschwankungen (wiederum in Übereinstimmung mit der Brown'schen Bewegung) mit zunehmender Zeitskala stärker werden, d. h. die Temperaturabweichungen während der Eiszeiten waren größer als die in der kleinen Eiszeit im Mittelalter, und diese wiederum waren größer als die zurzeit beobachteten jährlichen Temperaturschwankungen.

5.78

Die stärkste kurzfristige interne Klimaschwankung ist das **El Niño / Southern Oscillation (ENSO)**-Phänomen. ENSO ist ein klassisches Beispiel für die großskalige Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre und äußert sich in Anomalien der Meeresoberflächentemperatur des tropischen Pazifiks, die im Mittel etwa alle vier Jahre wiederkehren. Obwohl ENSO seinen Ursprung im tropischen Pazifik besitzt, beeinflusst es nicht nur das Regional-, sondern auch das Globalklima. Die Warmphasen von ENSO, die El Niños, führen u. a. zu Dürren in Südostasien und Australien; sie verursachen starke Niederschläge über weiten Teilen Südamerikas und rufen signifikante Klimanomalien über Nordamerika und während besonders starker El Niños sogar über Europa hervor. ENSO wirkt sich aber nicht nur auf das Globalklima aus, sondern es beeinflusst auch die Ökosysteme im asiatisch-pazifischen Raum und die Volkswirtschaften verschiedener Staaten, wie z. B. Australien und Peru. Auch die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration ändert sich kurzfristig als Folge von ENSO-Extremen. Die Simulation und Vorhersage von ENSO und anderer natürlicher Klimaschwankungen wie beispielsweise die Nordatlantische Oszillation (NAO) ist ein willkommener Test für die Güte von Klimamodellen.

## Die Eiszeitzyklen

Klimaveränderungen auf der Zeitskala von vielen Jahrtausenden (siehe Abbildung 6), wie etwa das Entstehen und Vergehen von Eiszeiten, sind u. a. in Änderungen der Erdbahn um die Sonne begründet, wie es Milankovitch in den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts vorgeschlagen hat. Er benutzte die Newton'schen Gesetze der Himmelsmechanik, um seine Theorie zu entwickeln. Die Variationen der Erdbahnparameter führen zu regionalen und zum Teil auch globalen Veränderungen der solaren Einstrahlung am Oberrand der Erdatmosphäre, die daraus resultierenden langperiodischen Klimaschwankungen sind daher extern angeregt. Die Milankovitch-Theo-



rie wurde lange nicht akzeptiert, ist heute aber weitgehend anerkannt.

Drei Phänomene sind in diesem Zusammenhang relevant. Erstens verändert sich die Erdbahn um die Sonne innerhalb von ca. 100 000 Jahren von einer Ellipse zu fast einem Kreis und wieder hin zu einer Ellipse (Exzentrizität). Diese Periode von 100 000 Jahren ist in paläoklimatischen Rekonstruktionen am deutlichsten zu erkennen, was man z. B. in der Rekonstruktion des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehalts und der Temperatur erkennt (Abbildung 6). Die globale über das Jahr gemittelte solare Einstrahlung ändert sich dabei um bis zu  $0,7 \text{ W/m}^2$ . Zweitens ändert sich die Neigung der Erdachse mit einer Periode von ca. 41 000 Jahren (Nutation). Sie variiert in etwa zwischen  $22$  und  $24,5^\circ$ . Heute beträgt die Neigung der Erdachse etwa  $23,5^\circ$ . Die Änderungen in der Neigung der Erdachse beeinflussen den Jahresgang der am Oberrand der Atmosphäre einfallenden solaren Strahlung. In hohen Breiten kann dies im Jahresmittel bis zu  $17 \text{ W/m}^2$  ausmachen. Drittens, die Erde ist keine perfekte Kugel und besitzt einen »Bauch« am Äquator, was dazu führt, dass die Erde »taumelt« und die Orientierung der Erdachse einen Kreis im Raum beschreibt (Präzession). Dieser Effekt mit einer Periode von ca. 22 000 Jahren bestimmt die Jahreszeit, in der wir der Sonne am nächsten sind. Zur Zeit sind wir auf der Nordhalbkugel im Winter der Sonne am nächsten, während wir im Sommer von ihr am weitesten entfernt sind. Vor 11 000 Jahren hingegen waren die Verhältnisse genau umgekehrt. Im Jahresmittel ergibt sich keine Nettoänderung der Einstrahlung, die Stärke des Jahresgangs ändert sich jedoch.

Die drei von Milankovitch vorgeschlagenen Zyklen mit Perioden von 100 000, 41 000 und 22 000 Jahren kann man in der Tat in paläoklimatischen Rekonstruktionen beispielsweise der Temperatur wiederfinden. Dies gilt als wichtiger Beweis für die Gültigkeit der Milankovitch-Theorie. Es sollte aber erwähnt werden, dass es in der Regel weitere Prozesse sind, die anfängliche relativ kleine Störungen in der

solaren Einstrahlung zu massiven Klimaänderungen machen. So ist die Exzentrizität mit einer Änderung der Einstrahlung im globalen Mittel von nur ca.  $0,7 \text{ W/m}^2$  verbunden, es werden aber sehr starke Klimaänderungen mit einer Periode von 100 000 Jahren beobachtet. Die Änderung der Erdbahnparameter allein können daher nicht für die Entstehung von Eiszeitzyklen verantwortlich gemacht werden. Sie sind zwar die Pulsgeber, andere Prozesse, wie z. B. Veränderungen in den biogeochemischen Kreisläufen und eine damit verbundene Änderung der Konzentration der atmosphärischen Treibhausgase, wirken verstärkend. Niedrige  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen wie auch ein geringer Methangehalt während der Eiszeiten unterstützen die Abkühlung durch einen reduzierten Treibhauseffekt. So war der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre während der letzten Eiszeit vor ca. 20 000 Jahren deutlich niedriger als heute (siehe Abbildung 6). Eine aus der Abkühlung resultierende höhere Eis- bzw. Schneebedeckung wird außerdem über verstärkte Reflexion von Sonnenstrahlung in den Weltraum zur weiteren Abkühlung beitragen. Diese Rückkopplung wird als Eis-Albedo-Rückkopplung bezeichnet. Eine weitere positive Rückkopplung, die Wasserdampfrückkopplung, wurde bereits im Zusammenhang mit dem anthropogenen Treibhauseffekt beschrieben. Es gibt aber natürlich auch eine Fülle von negativen Rückkopplungen, die dämpfend wirken, und dafür sorgen, dass das Klimasystem nicht aus den Fugen gerät. Realistische **Klimamodelle** müssen diese Vielzahl von positiven und negativen Rückkopplungen berücksichtigen. Modelle, die nur einige wenige Rückkopplungen enthalten, werden der komplexen Natur der Klimavariabilität nicht gerecht.

Bei der Generierung natürlicher Klimaschwankungen auf Zeitskalen bis zu Jahrhunderten spielt vor allem die großskalige Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre eine wichtige Rolle, d. h. es handelt sich vor allem um intern erzeugte Veränderungen. Auf längeren Zeitskalen von Jahrtausenden sind es vor allem externe Einflüsse. Verlässliche Klimamodelle, die für die Simulation und Er-

kennung des anthropogenen Treibhauseffekts Anwendung finden, müssen daher insbesondere in der Lage sein, die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre korrekt darzustellen und die aus ihr resultierenden Klimaschwankungen realistisch zu simulieren.

Darüber hinaus müssen die Modelle auch die extern angeregten Klimaschwankungen beschreiben können, wenn man die anomalen Antriebe, z. B. eine veränderte Sonneneinstrahlung, vorschreibt. Heutige Klimamodelle sind in der Lage, die natürliche Klimavariabilität zu simulieren. Dies gilt sowohl für die internen als auch für die externen Schwankungen. So kann man z. B. das Phänomen der »grünen Sahara« mit Klimamodellen nachvollziehen. Vor etwa 6000 Jahren besaß die Sahara noch eine relativ reichhaltige Vegetation, sie wurde dann aber fast spontan zu einer Wüste. Der Umschwung erfolgte durch eine allmähliche Veränderung der solaren Einstrahlung in Zusammenhang mit der Präzession, was zu einer Abschwächung der sommerlichen Einstrahlung auf der Nordhalbkugel und des westafrikanischen Monsunregens führte. Bei Vorgabe der Veränderungen im solaren Antrieb ist es möglich, den Umschwung der Sahara zu einer Wüste mit Klimamodellen realitätsnah zu simulieren. Dabei wirken vegetationsdynamische Prozesse als positive Rückkopplung. In ähnlicher Art und Weise ist es möglich, das Klima des letzten Jahrtausends zu simulieren und zu quantifizieren, welche Prozesse welchen Anteil zu den beobachteten Veränderungen beigetragen haben.

## Vorhersagbarkeit des Klimas

Seit der fundamentalen Arbeit von Lorenz (Mitbegründer der Chaostheorie) aus dem Jahre 1963 wissen wir, dass die theoretische Grenze für Wettervorhersagen bei etwa zwei Wochen liegt (**Lorenz-Modell**). Dies resultiert aus dem chaotischen Charakter der Atmosphäre, der dazu führt, dass noch so kleine Fehler in den Anfangsbedingungen rasch anwachsen und sich die Güte von Wettervorhersagen inner-

S. 62

halb einiger Tage schnell vermindert. Da die Wettervorhersage mathematisch gesehen ein Anfangswertproblem darstellt und wir den Anfangszustand niemals exakt bestimmen können, werden wir diese theoretische Grenze der Wettervorhersagbarkeit von etwa zwei Wochen auch in der Zukunft nicht entscheidend verlängern können.

Jenseits dieser theoretischen Grenze der Wettervorhersagbarkeit gibt es aber dennoch Vorhersagbarkeit in der Atmosphäre, die man als jahreszeitliche oder saisonale Vorhersagbarkeit bezeichnet. Bei der Jahreszeitenvorhersage geht es im Gegensatz zur Wettervorhersage nicht darum, einzelne Wetterelemente, wie z. B. die Zugbahn eines Tiefdruckgebiets, vorherzusagen, sondern darum, das über einen bestimmten Zeitraum gemittelte Wetter, das Klima, vorherzusagen. Dies kann z. B. die Oberflächentemperatur oder der Niederschlag gemittelt über eine bestimmte Region und eine Jahreszeit sein. Die saisonale Vorhersagbarkeit hat ihren Ursprung in langsamen Veränderungen der Randbedingungen, wie beispielsweise Anomalien der Meeresoberflächentemperatur oder der Meereisausdehnung, die ihrerseits z. B. durch Veränderungen der Meeresströmungen, etwa des **Golfstroms**, hervorgerufen werden können. Derartige Anomalien sind in der Lage, einen Einfluss auf die Statistik des Wetters auszuüben, und das Klima ist dann vorhersagbar, wenn die Anomalien in den Randbedingungen selbst vorhersagbar sind. Chaotische Systeme wie die Atmosphäre sind also unter bestimmten Bedingungen auch auf Zeitskalen von Jahreszeiten oder möglicherweise Jahren bzw. Jahrzehnten vorhersagbar. Dies ist auch die Basis für Simulationen zum anthropogenen Klimawandel, bei denen die Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre (eine weitere Randbedingung) die entscheidende Rolle spielen. Bei Vorhersagen zum globalen Wandel versucht man also nicht das Wetter selbst, sondern die Statistik des Wetters bei Veränderung bestimmter Randbedingungen vorherzusagen.

S. 81



Es wird immer wieder die Frage gestellt, inwieweit chaotische Systeme wie das Klima auf menschliche Einflüsse reagieren und ob sie überhaupt berechnet werden können (**Lorenz-Modell**). Am besten vergleicht man den Einfluss des Menschen auf das Klima mit einem gezinkten Würfel. Das Zinken besteht darin, dass wir die Temperatur der Erde infolge des Ausstoßes bestimmter klimarelevanter Gase, wie beispielsweise das Kohlendioxid, erhöhen. Dies führt zu mehr Wetterextremen, so wie der gezinkte Würfel mehr Sechsen hervorbringt. Wir können aber nicht sagen, wann die nächste Sechse kommt, denn die Reihenfolge der Zahlen bleibt zufällig. Ähnlich verhält es sich mit den Wetterextremen: Wir können zwar ihre Statistik berechnen, z. B. dass sie sich infolge der globalen Erwärmung häufen werden, wir wissen aber nicht, wann genau die Wetterextreme eintreten.

Das Beispiel des gezinkten Würfels verdeutlicht auch, dass die Tatsache, ein bestimmtes Ereignis schon einmal beobachtet zu haben, keinerlei Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Würfels zulässt: Der Würfel hat auch vor dem Zinken schon Sechsen geliefert. Auf das Wetter übertragen: Die Tatsache, dass man beispielsweise schon einmal eine schwere Überschwemmung oder eine lang anhaltende Trockenperiode beobachtet hat, erlaubt keinen Rückschluss auf eine Veränderung der Statistik des Wetters. In der Tat zeigen Beobachtungen der letzten hundert Jahre eine weltweite Häufung extremer Wetterereignisse, wie von den Klimamodellen vorhergesagt. Und es ist genau diese Häufung extremer Wetterereignisse, die man der globalen Erwärmung zuordnen kann. Die Analogie zum gezinkten Würfel verdeutlicht darüber hinaus, dass es prinzipiell nicht möglich ist, einzelne Wetterextreme, wie die Elbeblut des Jahres 2002, der globalen Erwärmung zuzuschreiben, genauso wenig wie man eine bestimmte Sechse dem Zinken des Würfels zuordnen kann. Man muss immer die Statistik der Ereignisse betrachten, wie etwa die Anzahl von Wetterextremen über einen längeren Zeitraum, wenn man den Zusammenhang zwischen Wetterextremen und der globalen Erwärmung beleuchten möchte.

## DAS KLIMA DES 20. UND 21. JAHRHUNDERTS

### Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Die Frage, ob der Mensch das Klima verändert, wir das Klima also zinken, ist schon längst von der internationalen Klimaforschung beantwortet. Der Klimawandel ist in vollem Gange, und seine Anzeichen sind unverkennbar. Eine entscheidende Rolle bei der Bewertung und Kommunikation der wissenschaftlichen Ergebnisse kommt dem Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen, dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zu. Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen wurde 1988 gemeinsam von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und dem Umwelt-Programm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet. Sein Aufgabengebiet beinhaltet zum einen die Beschreibung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes hinsichtlich des globalen Klimawandels und zum anderen die Beratung der internationalen Politik.

Seit 1990 hat das IPCC eine Reihe von Berichten erarbeitet, die zu Standard-Nachschlagewerken geworden sind und von politischen Entscheidungsträgern, Wissenschaftlern und anderen Experten häufig genutzt werden. An dem letzten Bericht des IPCC aus dem Jahre 2001 haben über 600 der weltweit führenden Klimawissenschaftler mitgearbeitet. Noch einmal ca. 400 Wissenschaftler waren mit der Begutachtung des Berichts betraut. Bereits im Bericht des Jahres 1995 war zu lesen, dass es einen erkennbaren Einfluss des Menschen auf das Klima gibt. In dem Bericht des Jahres 2001 ist zu lesen: »Eine wachsende Zahl von Beobachtungen ergibt ein kollektives Bild einer sich erwärmenden Welt und anderer Änderungen im Klimasystem.« Es herrscht offensichtlich ein großer Konsens in der internationalen



Klimaforschung darüber, dass sich unser Klima verändert und dass der Mensch dafür mitverantwortlich ist. Im Folgenden werden einige wichtige Beobachtungen beschrieben, die mit zu diesem Konsens geführt haben.

## Was kann man heute schon an Veränderungen sehen?

Wie oben beschrieben, beobachten wir einen starken Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen, vor allem des  $\text{CO}_2$ , in der Atmosphäre. Dieser Anstieg verstärkt den Treibhauseffekt und führt zu einer globalen Erwärmung an der Erdoberfläche und in den unteren Luftschichten. Es drängt sich daher die Frage auf, was man schon heute an Klimaänderung beobachten kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Klima infolge seiner **Trägheit** auf äußere Anregungen immer mit einer Zeitverzögerung von einigen Jahrzehnten reagiert. Wir können also nicht davon ausgehen, heute schon die volle zu erwartende Reaktion des Klimasystems auf unser Handeln zu beobachten. Dennoch ist bereits eine starke Erderwärmung nachweisbar, sowohl global (siehe Abbildung 8) als auch bezogen auf die Nordhalbkugel (siehe Abbildung 9). Der Anstieg der Globaltemperatur im 20. Jahrhundert betrug  $0,6^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Dabei war die Erwärmung über den Kontinenten deutlich stärker als die über den Ozeanen. In Deutschland betrug die Erwärmung in den letzten hundert Jahren ca. ein Grad, d. h. es gibt einen charakteristischen Land-See-Kontrast in der Erwärmung. Selbstverständlich ist in den Analysen der Messungen auch berücksichtigt worden, dass sich die Messmethoden im Laufe der Zeit verändert haben und es beispielsweise einen Stadteffekt gibt, durch den sich Ballungsgebiete besonders stark erwärmen. Die Zahl von  $0,6^\circ\text{C}$  für die Änderung der globalen Mitteltemperatur ist daher als bereinigte Zahl zu betrachten, bei der die bekannten systematischen Fehler herauskorrigiert sind.

S. 68

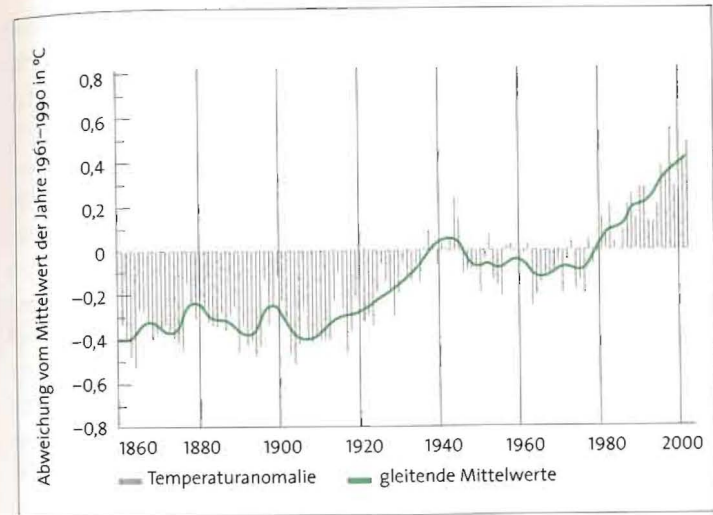


Abbildung 8: Die global gemittelte Temperatur seit 1860 als Abweichung vom Mittelwert der Jahre 1961–1990 (nach IPCC 2001a).

Temperatur-Rekonstruktionen der Nordhalbkugel der letzten 1000 Jahre zeigen ebenfalls einen offensichtlichen Erwärmungstrend in den letzten 100 Jahren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Temperaturen vor 1900 vor allem aus indirekten Verfahren (wie z. B. der Analyse von Eisbohrkernen, Baumringen oder Korallen) abgeleitet wurden, was zu einer recht großen Unsicherheit in der Bestimmung der Temperatur führt (dargestellt als Schattierung in der Abbildung 9). Selbst wenn man aber die maximale Unsicherheit zu Grunde legt, war das Jahrzehnt 1990–1999 das wärmste in den letzten 1000 Jahren. Zusammen mit weiteren statistischen und auf Modellen basierenden Analysen (**Fingerabdruckmethode**) kann man heute bereits sagen, dass der beobachtete Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf den Menschen zurückgeht. Es hat zwar in der Vergangenheit immer wieder Klimaschwan-

S. 69

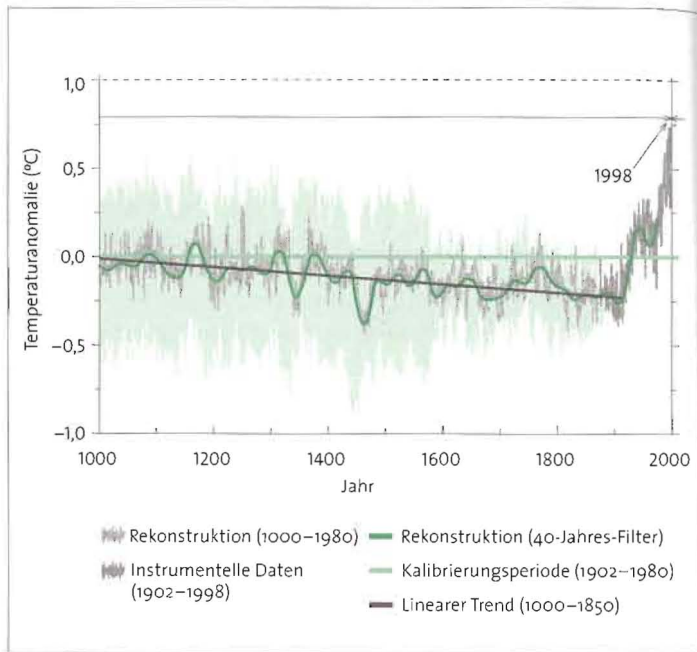


Abbildung 9: Die Temperatur der Nordhalbkugel der letzten 1000 Jahre dargestellt als Abweichung vom Mittelwert der Jahre 1902–1980 (nach IPCC 2001a).

kungen gegeben, die nicht auf menschliche Aktivität zurückgehen, wie z. B. die mittelalterliche Warmzeit oder die kleine Eiszeit. Diese waren im Vergleich zum Anstieg der Temperatur der letzten Jahrzehnte zumindest auf globaler Skala deutlich schwächer.

Neben der Temperatur gibt es aber noch mehr Belege dafür, dass sich unser Klima verändert. So hat sich beispielsweise sowohl die Eis- als auch die Schneebedeckung der Erde verringert. Die Schneebedeckung der Nordhalbkugel hat sich seit 1960 um ca. 10% verringert. Die Gebirgsgletscher haben sich außerhalb der polaren Regionen zurückgezogen und das Meereis der Nordhemisphäre ist deutlich

dünner geworden. Da die Erwärmung in den Alpen während des 20. Jahrhunderts besonders stark gewesen ist, haben dort einige Gletscher schon etwa 50% ihrer Masse während der letzten hundert Jahre verloren. Der Meeresspiegel ist im 20. Jahrhundert um ca. 10–20 cm angestiegen, zum Teil wegen der Gletscherschmelze und zum Teil, da sich der Wärmeinhalt der Ozeane deutlich erhöht hat. Die Häufigkeit von extremen Niederschlägen in den mittleren und hohen Breiten der Nordhalbkugel hat zugenommen. Es gibt aber auch Gebiete, insbesondere auf der Südhalbkugel, die keine nennenswerten Veränderungen aufweisen. Klimamodelle zeigen, dass dies aber zu erwarten ist, wegen des geringeren Landanteils und da sich der Südliche Ozean infolge von starker vertikaler Vermischung an der Oberfläche relativ wenig erwärmt. Insgesamt sind aber die Anzeichen des anthropogenen Klimawandels unverkennbar, was in den Berichten des IPCC im Detail nachzulesen ist.

## Wer ist schuld an den Veränderungen?

Es wird immer wieder die Frage nach der Rolle der Sonne für die Erderwärmung gestellt. Die mögliche Rolle der Schwankungen der Sonnenstrahlung auf das Klima wird seit langem in der Klimaforschung diskutiert. Die Sonneneinstrahlung unterliegt auch kurzfristigen Schwankungen auf der Zeitskala von Jahrzehnten, die auch

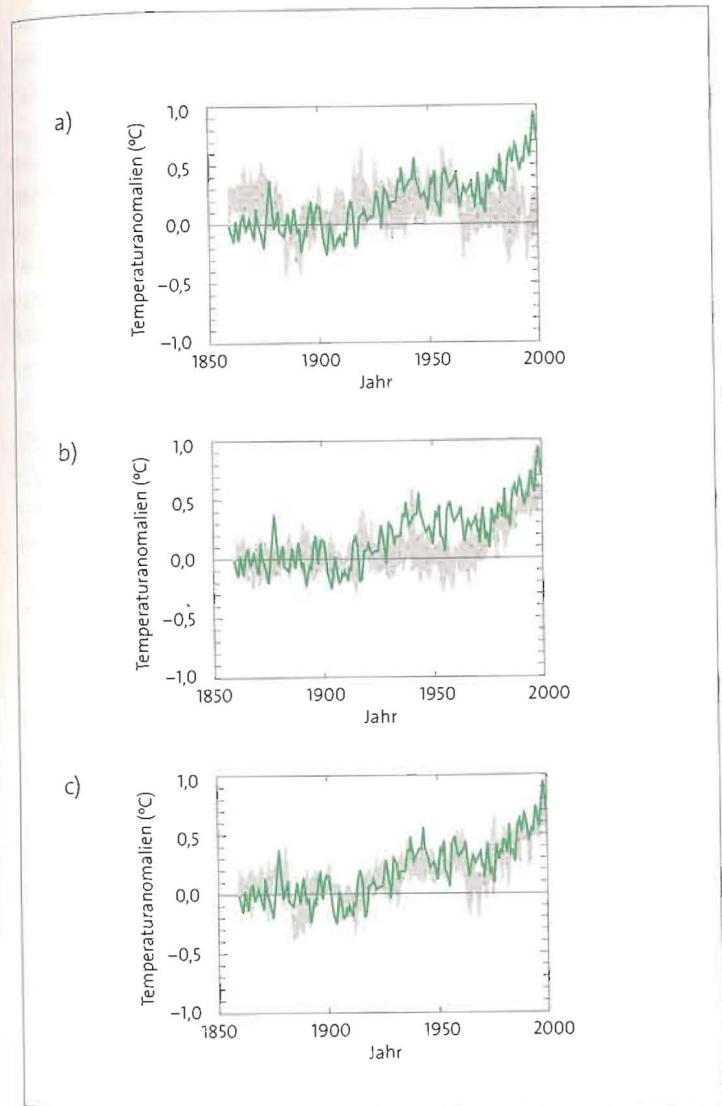
mit der Sonnenfleckenaktivität zusammenhängen. So bedeutet eine hohe Sonnenfleckenanzahl eine Zunahme der Sonneneinstrahlung, gleichzeitig verbunden mit einer leichten Verschiebung des Sonnenspektrums in den kurzwelligen (UV) Bereich. Es gibt dabei zwei bekannte Zyklen. Erstens den so genannten Schwalbe-Zyklus, mit einer Periode von 11 Jahren und einer direkt gemessenen Amplitude von ca. 0,1%, und zweitens den so genannten Gleissberg-Zyklus, mit einer Periode von ca. 80 Jahren und einer geschätzten Amplitude von ca. 0,2–0,3% der gesamten Einstrahlung. Es können daher

Schwankungen des Angebots der Sonne von ca.  $0,6 \text{ W/m}^2$  auftreten (zum Vergleich: der zusätzliche Treibhauseffekt durch erhöhte Konzentration von Kohlendioxid, Methan, Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Distickstoffoxid beträgt zur Zeit ca.  $2,4 \text{ W/m}^2$ ). In den letzten 100 Jahren stieg die Solarkonstante im Schnitt an, nach Schätzungen liegt sie zur Zeit etwa  $0,25\%$  höher als vor 100 Jahren. Allerdings lag der Großteil des Anstiegs der Solarkonstante in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, während sie seit 1940 langsam wieder abnimmt.

Es wird auch immer wieder ein Einfluss der kosmischen Strahlung auf das Klima postuliert. Durch Ionisierung soll die Bildung von Aerosolen begünstigt und damit die Wolkenbildung stimuliert werden, was dann wiederum die Temperatur der Erde beeinflussen soll. Es gibt bis heute aber keinen wissenschaftlichen Beleg für diese Hypothese, weder mit Hilfe von nachprüfbar statistischen Verfahren noch mit Hilfe von Berechnungen mit komplexen Klimamodellen. Der Einfluss der kosmischen Strahlung wird daher in keinem der weltweit anerkannten Klimamodelle berücksichtigt.

Wie stark beeinflussen jetzt die solaren Schwankungen und andere natürliche Faktoren, wie beispielsweise eine geänderte Vulkanaktivität, das Klima? Und wie stark ist der menschliche Einfluss auf das Klima? Um diese Fragen zu beantworten, wurden drei verschiedene Simulationen mit einem komplexen Klimamodell durchgeführt, die in der Abbildung 10 dargestellt sind. In der ersten Simulation wurden nur natürliche Faktoren berücksichtigt, in der zweiten nur anthropogene und in der dritten sowohl natürliche wie auch anthropogene. Die Simulationen wurden im Ensemble-Modus gerechnet, d.h. es wurden verschiedene Simulationen mit unterschiedlichen Anfangs-

Abbildung 10: Simulation der globalen Mitteltemperatur der Erde unter Berücksichtigung nur natürlicher (a), nur anthropogener (b) und unter Berücksichtigung natürlicher und anthropogener Faktoren (c) (nach IPCC 2001a). Die beobachtete global gemittelte Temperatur ist in den drei Abbildungen als Linie, die Simulationen als Bänder dargestellt.





bedingungen durchgeführt. Dies ermöglicht eine Abschätzung der Unsicherheit in den Modellergebnissen aufgrund des chaotischen Charakters des Klimas. Die drei Simulationen sind daher als Bänder und nicht als einzelne Linien dargestellt.

Sie zeigen, dass durch die natürlichen Faktoren, insbesondere den Anstieg in der Sonnenintensität, zwar ein Teil der beobachteten Erwärmung erklärt werden kann, allerdings mit etwa 0,2 Grad Celsius nur ungefähr ein Drittel. Die Sonnenvariabilität allein kann also nicht für den beobachteten Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre von ca. 0,6 Grad Celsius verantwortlich sein. Insbesondere kann durch die natürlichen Faktoren die starke Erwärmung der letzten Jahrzehnte nicht erklärt werden, sondern nur ein gewisser Temperaturanstieg in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Dies war auch zu erwarten, da die solare Strahlung vor allem bis etwa 1940 angestiegen ist. Nur die Simulation, in der beide Faktoren, natürliche wie auch anthropogene, berücksichtigt wurden, liefert eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Der überwiegende Anteil an der Erderwärmung insbesondere in den letzten Jahrzehnten ist daher offensichtlich vom Menschen verursacht.

Darüber hinaus führt nach Berechnungen mit Klimamodellen der anthropogene Treibhauseffekt zusammen mit dem Einfluss der anthropogenen »Sulfataerosole« (dieses sind Schwebstoffe, die ebenfalls vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen, aber in erster Linie kühlend wirken) zu einem charakteristischen räumlichen Erwärmungsmuster (**Fingerabdruck**), das man in den Beobachtungen wiederfindet und das sich deutlich von dem Muster natürlicher Antriebe (z. B. durch die Sonne) unterscheidet. Das Gleiche gilt für die zeitliche Entwicklung der Erwärmung. So würde z. B. eine durch die Sonne induzierte Erwärmung im Sommer und tagsüber am stärksten sein, tatsächlich beobachtet man die stärkste Temperaturerhöhung aber im Winter und nachts, so wie von Klimamodellen vorhergesagt. Es ist also die gesamte raumzeitliche Struk-

S. 69

tur der beobachteten Erwärmung, die auf den Menschen als Hauptverursacher der Erderwärmung des 20. Jahrhunderts deutet.

## Was bringt die Zukunft?

Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und andere menschliche Aktivitäten erhöhen sich die Konzentrationen atmosphärischer Treibhausgase, z. B. des Kohlendioxids oder des Methans, aber auch die anderer Spurenstoffe, die in Partikelform (z. B. als Sulfataerosole) einen Teil des Sonnenlichtes reflektieren und damit dem anthropogenen Treibhauseffekt entgegenwirken. Die zukünftigen Folgen für das Klima der Erde können mit Hilfe von Computersimulationen abgeschätzt werden. Dazu werden globale Klimamodelle gerechnet, welche die Wechselwirkung zwischen den physikalischen Prozessen in Atmosphäre, Ozean, Meereis und Landoberflächen quantitativ beschreiben. Als Eingabeparameter benötigt das Modell u. a. die Konzentrationen der wichtigsten langlebigen Treibhausgase, während die Konzentrationen kurzlebiger Aerosole, die eng mit internen Prozessen wie Wolken- und Niederschlagsbildung verbunden sind, im Allgemeinen innerhalb des Klimamodells aus den vorgegebenen Emissionen berechnet werden.

Beispielsweise wurde mit einem am Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelten Modell das Klima von 1860 bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts simuliert. Dabei wurden die wichtigsten Treibhausgase und Sulfat-Aerosole berücksichtigt, inklusive deren Einfluss auf die Wolkenbildung, der so genannte indirekte Aerosoleffekt. Für die Vergangenheit (1860 bis heute) wurden die beobachteten Konzentrationen bzw. Emissionen vorgeschrieben, während für die Zukunft angenommen wurde, dass sich die heute beobachteten Trends unvermindert fortsetzen (IPCC Szenarium IS92a). In dieser Simulation wird bis heute eine globale Erwärmung seit Ende des 19. Jahrhunderts von etwa 0,7°C berechnet. Dieser Wert liegt innerhalb des

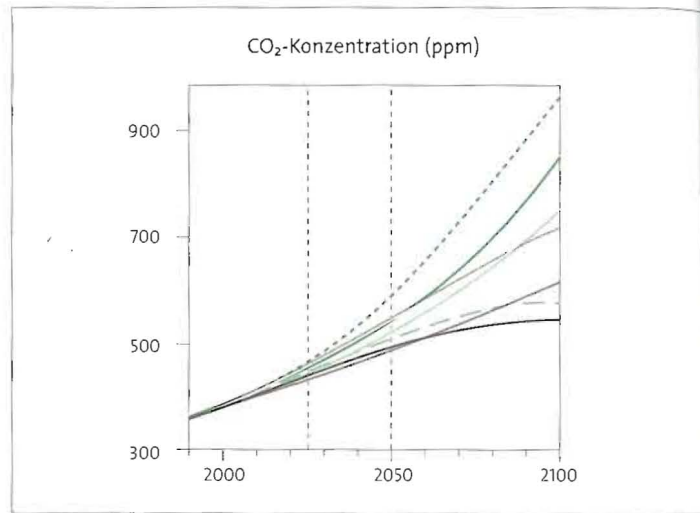


Abbildung 11: Szenarien (angenommene Entwicklung) der CO<sub>2</sub>-Konzentration für die Periode 1990–2100 (nach IPCC 2001a).

Bereichs verschiedener Abschätzungen aufgrund von Temperaturmessungen ( $0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ). Die globale Erwärmung bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts, d.h. die Differenz der Dekadenmittel (2040 bis 2049) minus (1990 bis 1999) liegt bei etwa  $0,9^{\circ}\text{C}$ . Die Erwärmung der Kontinente ist mit  $1,4^{\circ}\text{C}$  etwa doppelt so groß wie die der Ozeane. Bis zum Jahr 2100 kann die globale Erwärmung je nach angenommenem Szenarium bis zu  $4^{\circ}\text{C}$  betragen. Zusammen mit der heute bereits realisierten globalen Erwärmung von etwa  $0,7^{\circ}\text{C}$  entspräche dies in etwa dem Temperaturunterschied von der letzten Eiszeit bis heute.

Die Ergebnisse der Klimamodelle hängen entscheidend ab vom jeweiligen »Szenarium«, d.h. von den Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, des Ver-

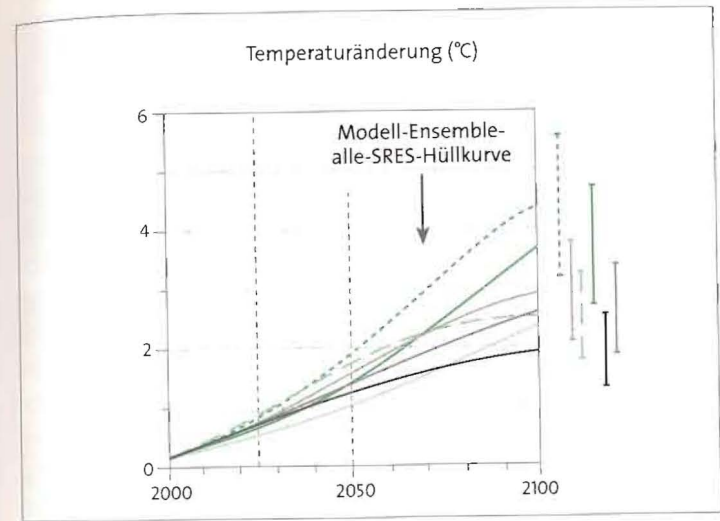


Abbildung 12: Die mit globalen Klimamodellen berechnete Entwicklung der Globaltemperatur für die Periode 2000–2100 (nach IPCC 2001a). Die vertikalen Balken (rechts) geben die Modellunsicherheit wieder.

brauchs fossiler Brennstoffe etc. (in Abbildung 11 sind die Szenarien für die CO<sub>2</sub>-Konzentration gezeigt, die u. a. als Antriebe für die Klimamodelle dienen). Verschiedene Klimamodelle liefern aber auch unterschiedliche Erwärmungen, wenn sie mit demselben Szenarium gerechnet werden. Das IPCC gibt für die Entwicklung der Globaltemperatur für die Zeitspanne 1990–2100 eine Bandbreite von  $1,4$ – $5,8^{\circ}\text{C}$  an (Abbildung 12). Diese relativ große Spanne wird zum einen durch die Unsicherheit in dem zukünftigen Spurengasausstoß und zum anderen durch die Modellunsicherheit hervorgerufen. Allerdings bleibt festzuhalten, dass wir wegen der Trägheit des Klimas selbst bei einer sehr starken Reduktion des Spurengasausstoßes bis zum Jahr 2100 auf jeden Fall mit einer weiteren Erwärmung von mindestens  $1^{\circ}\text{C}$  zu rechnen haben.

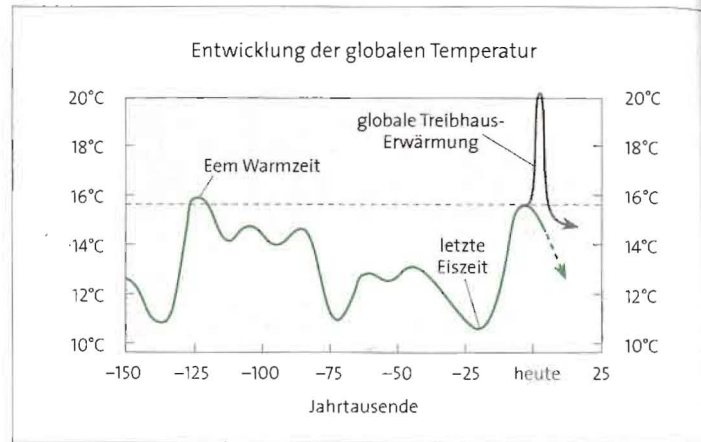


Abbildung 13: Die maximal mögliche Treibhaus-Erwärmung bis zum Jahr 2100 im Vergleich der Temperaturen der letzten 150.000 Jahre.

Im Extremfall würden wir uns also einer Erdmitteltemperatur von ca. 20°C im Jahr 2100 nähern. Wie aus der Abbildung 13 zu erkennen ist, wäre dies eine Temperatur, die deutlich über den für historische Warmzeiten typischen Temperaturen liegt. Die letzte große Warmzeit, die Eem-Warmzeit, in der sich die Erde vor ca. 125.000 Jahren befunden hat, war deutlich kälter. Eine Erdmitteltemperatur von ca. 20°C hat es nach heutigen Erkenntnissen seit mindestens einer Million Jahre nicht gegeben.

Klimamodelle können immer nur eine angenäherte Simulation des sehr komplexen realen Klimasystems liefern. Generell gilt, dass die Aussagekraft der Modelle umso geringer wird, je kleiner das betrachtete Gebiet ist. So können z. B. regionale Details innerhalb Deutschlands weniger genau erfasst werden als Unterschiede zwischen Nord- und Südeuropa. Der Hauptgrund liegt in der noch relativ groben Maschenweite der globalen Klimamodelle von einigen hundert Kilometern, die es nicht erlaubt, Gebirge wie z. B. die Alpen,

gut aufzulösen oder auch kleinräumige Prozesse, wie die Wolken- und Niederschlagsbildung, in allen Einzelheiten darzustellen. Hinzu kommt, dass die Modelle derzeit noch unvollständig sind. So bleiben mögliche Änderungen der Vegetation im zukünftigen Klima ebenso unberücksichtigt wie Änderungen in der Masse des Inlandeises. Als Folge der oben skizzierten Klimaänderungen könnte sich beispielsweise die Vegetation ändern und diese Änderung wiederum auf die Temperatur der Landoberfläche zurückwirken. Derartige vegetationsdynamische Rückkopplungen werden vermutlich in der nächsten Generation der Klimamodelle ebenso berücksichtigt werden wie die Wechselwirkung mit chemischen Prozessen in der Atmosphäre. Es sollte aber festgehalten werden, dass die Modelle die großskaligen und langfristigen Veränderungen des Klimas trotz der oben beschriebenen Unsicherheiten relativ zuverlässig berechnen können, wie oben anhand der Abbildung 10 gezeigt.

### Wie wird das Klima in Europa in der Mitte des 21. Jahrhunderts aussehen?

Das Modell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie wird jetzt im Hinblick auf die Veränderungen in Europa analysiert. Die globale Erwärmung hat eine Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfes zur Folge sowie einen verstärkten Wasserdampftransport von den Ozeanen zu den Kontinenten und damit eine Zunahme des Niederschlags über den Landgebieten. Regional sind die Niederschlagsänderungen jedoch sehr verschieden. Dabei fällt generell mehr Niederschlag in hohen Breiten und in Teilen der Tropen, während die regenärmeren Subtropen noch weiter austrocknen. Damit vergrößern sich die Unterschiede zwischen den feuchten und trockenen Klimaten auf der Erde. Diese Aussage gilt auch für das Klima in Europa (siehe Abbildung 14). Allerdings sind die Niederschlagstendenzen in den Winter- bzw. Sommermonaten sehr unterschiedlich. Während



können nur einen Hinweis geben, wie die zukünftige Entwicklung sein könnte. Noch genauere Berechnungen erhofft man sich von höher auflösenden Modellen. Angestrebt werden in den nächsten zwei Jahren Rechnungen mit globalen Klimamodellen, die typische Gitterweiten von 10 Kilometern verwenden.

### Wie stark steigt der Meeresspiegel?

Der Meeresspiegel unterliegt Schwankungen auf verschiedenen Zeitskalen. Neben kurzfristigen Schwankungen durch Wind oder Gezeiten treten auch längerfristige Veränderungen aufgrund geologischer und klimatologischer Prozesse auf. Letztere lassen sich wiederum in natürliche und vom Menschen verursachte Klimaänderungen einteilen. Die wesentlichen Faktoren der längerfristigen Veränderungen des Meeresspiegels werden im Folgenden einzeln beschrieben.

Erstens bewirkt die zusätzliche Erwärmung durch den anthropogenen Treibhauseffekt eine Ausdehnung der Wassersäule und führt zu einem Anstieg des Meeresspiegels. Eine Erwärmung der gesamten Wassersäule um ein Grad würde zum Beispiel einen Anstieg des Meeresspiegels um etwa 50 cm bewirken. Eine solche gleichmäßige Erwärmung der gesamten Wassersäule innerhalb kurzer Zeit ist jedoch unrealistisch. Weil sich der tiefe Ozean sehr viel langsamer als die Ozeanoberfläche erwärmt, verringert sich dadurch auch der Austausch mit dieser und verlangsamt insgesamt den Meeresspiegelanstieg. Die Zahl sollte deshalb nur als Hinweis auf die Größenordnung des Beitrages der »thermischen Ausdehnung« verstanden werden.

Zweitens können sich die großen Eisschilde verändern. Die Antarktis stellt den weltweit größten Speicher an Süßwasser außerhalb der Ozeane dar. Zur Zeit wird das Volumen auf etwa 27 Mio. Kubikkilometer geschätzt; vollständiges Abschmelzen würde den Meeresspiegel um mindestens 60 Meter erhöhen. Der zweitgrößte Speicher ist



Abbildung 17: Die Gebirgsgletscher in den Alpen bilden sich rasant zurück. Hier zu sehen am Beispiel zweier Aufnahmen des Gepatschferner von 1904 (oben) und 2000.