

FORUM FÜR VERANTWORTUNG



Mojib Latif

# BRINGEN WIR DAS KLIMA AUS DEM TAKT?

Hintergründe und Prognosen



Es besteht kein Zweifel: Der Klimawandel ist in vollem Gange und der Mensch beeinflusst das Klima in zunehmenden Maße. Das vorliegende Buch liefert eine solide wissenschaftliche Grundlage zum Stand der Klimadiskussion. Weder Horrorszenarien noch Verharmlosung sind angebracht, sondern eine möglichst objektive Beschreibung und Bewertung der Sachverhalte. Latif befasst sich mit den Grundlagen der Klimaphysik, er beschreibt den wissenschaftlichen Kenntnisstand hinsichtlich der Ursachen des globalen Klimawandels und was man heute schon an Klimaänderungen beobachten kann. Er geht auf die gängigen »Skeptikerargumente« ein und skizziert, wie unser zukünftiges Klima aussehen könnte, wenn sich die Menschheit nicht der Nachhaltigkeit verschreibt. Abschließend werden konkrete Handlungsoptionen vorgestellt.

*Mojib Latif*, Professor für Meteorologie an der Universität Kiel, ist einer der bekanntesten Meteorologen und Klimaexperten Deutschlands. Er hat zahlreiche Studien zum Klimawandel veröffentlicht. Für seine Fähigkeit, komplizierte Forschungsergebnisse verständlich zu erklären, wurde er u. a. mit dem Max-Planck-Preis für öffentliche Wissenschaft ausgezeichnet.

*Unsere Adressen im Internet: [www.fischerverlage.de](http://www.fischerverlage.de)  
[www.hochschule.fischerverlage.de](http://www.hochschule.fischerverlage.de)*

**Mojib Latif**

**BRINGEN WIR  
DAS KLIMA  
AUS DEM TAKT?**

**Hintergründe und Prognosen**

Herausgegeben von  
Klaus Wiegandt

Fischer Taschenbuch Verlag



4. Auflage: Mai 2007

Originalausgabe

Veröffentlicht im Fischer Taschenbuch Verlag,  
einem Unternehmen der S. Fischer Verlag GmbH,  
Frankfurt am Main, Januar 2007

© 2007 Fischer Taschenbuch Verlag in der  
S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main  
Gesamtherstellung: Clausen & Bosse, Leck  
Printed in Germany  
ISBN 978-3-596-17276-4

---

## Inhalt

Vorwort des Herausgebers	
Handeln – aus Einsicht und Verantwortung	9

Vorwort	21
---------	----

### Wissenschaftliche Grundlagen

1	Das Klima und das Erdsystem	25
1.1	Wetter und Klima	25
1.2	Die Ozeane	29
1.3	Das Meereis	35
1.4	Das Inlandeis	39
1.5	Die Vegetation	44
2	Der Treibhauseffekt	49
2.1	Die Zusammensetzung der Atmosphäre	49
2.2	Der natürliche Treibhauseffekt	53
2.3	Der anthropogene Treibhauseffekt	58
2.4	Die globale Kohlenstoffbilanz	61
2.5	Die Ozonproblematik	67
3	Klimavariabilität und -vorhersage	75
3.1	Warum schwankt das Klima?	75
3.2	El Niño/Southern Oscillation	76
3.3	Die Nordatlantische Oszillation	81
3.4	Einfluss von Vulkanen	91

3.5 Die Eiszeitzyklen	97
3.6 Abrupte Klimaänderungen	100
3.7 Vorhersagbarkeit des Klimas	103
4 Klimamodellierung	107
4.1 Klimamodelle	107
4.2 Wolken und Niederschlag	109
4.3 Die Rolle von Kondensstreifen	113
4.4 Das Lorenz-Modell	116
4.5 Was ist der Golfstrom und wie verhält er sich in der Zukunft?	124

## Das Klima des 20. und 21. Jahrhunderts

5 Der menschliche Einfluss auf das Klima	135
5.1 Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	135
5.2 Was kann man heute schon an Veränderungen sehen?	136
5.3 Wer ist schuld an den Veränderungen?	142
5.4 Der Fingerabdruck des Menschen	146
6 Klimaänderungsszenarien für die Zukunft	152
6.1 Die Trägheit des Klimas	152
6.2 Was bringt die Zukunft?	154
6.3 Das Klima in Europa in der Mitte des 21. Jahrhunderts	158
6.4 Wie stark steigt der Meeresspiegel?	162
6.5 Die Versauerung der Ozeane	167

## Strategien für die Zukunft

7 Die öffentliche Diskussion	179
7.1 Die Rolle der Medien	179
7.2 Die Skeptiker	184

---

8	Was muss geschehen?	207
8.1	Das Kioto-Protokoll	207
8.2	Treibhausgasemissionen	210
8.3	Handlungsoptionen	213
8.4	Wie gehen wir mit dem Klimaproblem um?	220

## Anhang

Glossar	241
Literaturhinweise	252





---

Vorwort des Herausgebers

## Handeln – aus Einsicht und Verantwortung

»Wir waren im Begriff, Götter zu werden, mächtige Wesen, die eine zweite Welt erschaffen konnten, wobei uns die Natur nur die Bausteine für unsere neue Schöpfung zu liefern brauchte.«

Dieser mahnende Satz des Psychoanalytikers und Sozialphilosophen Erich Fromm findet sich in *Haben oder Sein – die seelischen Grundlagen einer neuen Gesellschaft* (1976). Das Zitat drückt treffend aus, in welches Dilemma wir durch unsere wissenschaftlich-technische Orientierung geraten sind.

Aus dem ursprünglichen Vorhaben, sich *der* Natur zu unterwerfen, um sie nutzen zu können (»Wissen ist Macht«), erwuchs die Möglichkeit, *die* Natur zu unterwerfen, um sie auszubeuten. Wir sind vom frühen Weg des Erfolges mit vielen Fortschritten abgekommen und befinden uns auf einem Irrweg der Gefährdung mit unübersehbaren Risiken. Die größte Gefahr geht dabei von dem unerschütterlichen Glauben der überwiegenden Mehrheit der Politiker und Wirtschaftsführer an ein unbegrenztes Wirtschaftswachstum aus, das im Zusammenspiel mit grenzenlosen technologischen Innovationen Antworten auf alle Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft geben werde.

Schon seit Jahrzehnten werden die Menschen aus Kreisen der Wissenschaft vor diesem Kollisionskurs mit der Natur gewarnt. Bereits 1983 gründeten die Vereinten Nationen eine Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, die sich 1987

mit dem so genannten Brundtland-Bericht zu Wort meldete. Unter dem Titel »Our Common Future« wurde ein Konzept vorgestellt, das die Menschen vor Katastrophen bewahren will und zu einem verantwortbaren Leben zurückfinden lassen soll. Gemeint ist das Konzept einer »langfristig umweltverträglichen Ressourcennutzung« – in der deutschen Sprache als Nachhaltigkeit bezeichnet. Nachhaltigkeit meint – im Sinne des Brundtland-Berichts – »eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstandard zu wählen«.

Leider ist dieses Leitbild für ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltiges Handeln trotz zahlreicher Bemühungen noch nicht zu der Realität geworden, zu der es werden kann, ja werden muss. Dies liegt meines Erachtens darin begründet, dass die Zivilgesellschaften bisher nicht ausreichend informiert und mobilisiert wurden.

### Forum für Verantwortung

Vor diesem Hintergrund und mit Blick auf zunehmend warnende Stimmen und wissenschaftliche Ergebnisse habe ich mich entschlossen, mit meiner Stiftung gesellschaftliche Verantwortung zu übernehmen. Ich möchte zur Verbreitung und Vertiefung des öffentlichen Diskurses über die unabdingbar notwendige nachhaltige Entwicklung beitragen. Mein Anliegen ist es, mit dieser Initiative einer großen Zahl von Menschen Sach- und Orientierungswissen zum Thema Nachhaltigkeit zu vermitteln sowie alternative Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Denn das Leitbild »nachhaltige Entwicklung« allein reicht nicht aus, um die derzeitigen Lebens- und Wirtschaftsweisen zu verändern. Es bietet zwar eine Orientierungshilfe, muss jedoch in der Gesellschaft konkret ausgehandelt und dann in Handlungsmuster umgesetzt werden. Eine demokratische Gesellschaft, die sich ernsthaft in Richtung Zukunftsfähigkeit umorientieren will, ist auf kritische, kreative, diskussions- und handlungsfähige Individuen als gesellschaftliche Akteure angewiesen. Daher ist lebenslanges Lernen, vom Kindesalter bis ins hohe Alter, an unterschiedlichen Lernorten und unter Einbezug verschiedener Lernformen (formelles und informelles Lernen), eine unerlässliche Voraussetzung für die Realisierung einer nachhaltigen gesellschaftlichen Entwicklung. Die praktische Umsetzung ökologischer, ökonomischer und sozialer Ziele einer wirtschaftspolitischen Nachhaltigkeitsstrategie verlangt nach reflexions- und innovationsfähigen Menschen, die in der Lage sind, im Strukturwandel Potenziale zu erkennen und diese für die Gesellschaft nutzen zu lernen.

Es reicht für den Einzelnen nicht aus, lediglich »betroffen« zu sein. Vielmehr ist es notwendig, die wissenschaftlichen Hintergründe und Zusammenhänge zu verstehen, um sie für sich verfügbar zu machen und mit anderen in einer zielführenden Diskussion vertiefen zu können. Nur so entsteht Urteilsfähigkeit, und Urteilsfähigkeit ist die Voraussetzung für verantwortungsvolles Handeln.

Die unablässige Bedingung hierfür ist eine zugleich sachgerechte und verständliche Aufbereitung sowohl der Fakten als auch der Denkmodelle, in deren Rahmen sich mögliche Handlungsalternativen aufzeigen lassen und an denen sich jeder orientieren und sein persönliches Verhalten ausrichten kann.

Um diesem Ziel näher zu kommen, habe ich ausgewiesene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gebeten, in der

Reihe »Forum für Verantwortung« zu zwölf wichtigen Themen aus dem Bereich der nachhaltigen Entwicklung den Stand der Forschung und die möglichen Optionen allgemeinverständlich darzustellen. Die ersten vier Bände zu folgenden Themen sind erschienen:

- *Was verträgt unsere Erde noch? Wege in die Nachhaltigkeit* (Jill Jäger)
- *Kann unsere Erde die Menschen noch ernähren? Bevölkerungsexplosion – Umwelt – Gentechnik* (Klaus Hahlbrock)
- *Nutzen wir die Erde richtig? Die Leistungen der Natur und die Arbeit des Menschen* (Friedrich Schmidt-Bleek)
- *Bringen wir das Klima aus dem Takt? Hintergründe und Prognosen* (Mojib Lauf)

Vier Folgebände sind in Vorbereitung und werden Mitte 2007 erscheinen. Sie behandeln die Themen »Ressource Wasser« (Wolfram Mauser), »Energien des 21. Jahrhunderts« (Hermann-Josef Wagner), »Entwicklung der Weltbevölkerung« (Rainer Münz und Albert F. Reiterer) und »Die Bedeutung der Ozeane für das Leben« (Katherine Richardson und Stefan Rahmstorf).

Die letzten vier Bände der Reihe werden Ende 2007 erscheinen. Sie stellen Fragen nach dem möglichen Umbau der Wirtschaft (Bernd Meyer), nach der Bedrohung durch Infektionskrankheiten (Stefan H. E. Kaufmann), nach der Gefährdung der Artenvielfalt (Josef H. Reichholf) und nach einem möglichen Weg zu einer neuen Weltordnung im Zeichen der Nachhaltigkeit (Harald Müller).

Zwölf Bände – es wird niemanden überraschen, wenn im Hinblick auf die Bedeutung von wissenschaftlichen Methoden oder die Interpretationsbreite aktueller Messdaten unter-

schiedliche Auffassungen vertreten werden. Unabhängig davon sind sich aber alle an diesem Projekt Beteiligten darüber einig, dass es keine Alternative zu einem Weg aller Gesellschaften in die Nachhaltigkeit gibt.

## Öffentlicher Diskurs

Was verleiht mir den Mut zu diesem Projekt und was die Zuversicht, mit ihm die deutschsprachigen Zivilgesellschaften zu erreichen und vielleicht einen Anstoß zu bewirken?

Zum einen sehe ich, dass die Menschen durch die Häufung und das Ausmaß der Naturkatastrophen der letzten Jahre sensibler für Fragen unseres Umgangs mit der Erde geworden sind. Zum anderen gibt es im deutschsprachigen Raum bisher nur wenige allgemeinverständliche Veröffentlichungen wie *Die neuen Grenzen des Wachstums* (Donella und Dennis Meadows), *Erdpolitik* (Ernst-Ulrich von Weizsäcker), *Balance oder Zerstörung* (Franz Josef Radermacher), *Fair Future* (Wuppertal Institut) und *Kollaps* (Jared Diamond). Insbesondere liegen keine Schriften vor, die zusammenhängend das breite Spektrum einer umfassend nachhaltigen Entwicklung abdecken.

Das vierte Kolloquium meiner Stiftung, das im März 2005 in der Europäischen Akademie Otzenhausen (Saarland) zu dem Thema »Die Zukunft der Erde – was verträgt unser Planet noch?« stattfand, zeigte deutlich, wie nachdenklich eine sachgerechte und allgemeinverständliche Darstellung der Thematik die große Mehrheit der Teilnehmer machte.

Darüber hinaus stimmt mich persönlich zuversichtlich, dass die mir eng verbundene ASKO EUROPA-STIFTUNG alle zwölf Bände vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt,

Energie didaktisieren lässt, um qualifizierten Lehrstoff für langfristige Bildungsprogramme zum Thema Nachhaltigkeit sowohl im Rahmen der Stiftungsarbeit als auch im Rahmen der Bildungsangebote der Europäischen Akademie Otzenhausen zu erhalten. Das Thema Nachhaltigkeit wird in den nächsten Jahren zu dem zentralen Thema der ASKO EUROPA-STIFTUNG und der Europäischen Akademie Otzenhausen.

Schließlich gibt es ermutigende Zeichen in unserer Zivilgesellschaft, dass die Bedeutung der Nachhaltigkeit erkannt und auf breiter Basis diskutiert wird. So zum Beispiel auf dem 96. Deutschen Katholikentag 2006 in Saarbrücken unter dem Motto »Gerechtigkeit vor Gottes Angesicht«. Die Bedeutung einer zukunftsfähigen Entwicklung wird inzwischen durch mehrere Institutionen der Wirtschaft und der Politik auch in Deutschland anerkannt und gefordert, beispielsweise durch den Rat für Nachhaltige Entwicklung, die Bund-Länder-Kommission, durch Stiftungen, Nicht-Regierungs-Organisationen und Kirchen.

Auf globaler Ebene mehren sich die Aktivitäten, die den Menschen die Bedeutung und die Notwendigkeit einer nachhaltigen Entwicklung ins Bewusstsein rufen wollen: Ich möchte an dieser Stelle unter anderem auf den »Marrakesch-Prozess« (eine Initiative der UN zur Förderung nachhaltigen Produzierens und Konsumierens), auf die UN-Weltdekade »Bildung für nachhaltige Entwicklung« 2005-2014 sowie auf den Film des ehemaligen US Vizepräsidenten Al Gore *An Inconvenient Truth* (2006) verweisen.

## Wege in die Nachhaltigkeit

Eine wesentliche Aufgabe unserer auf zwölf Bände angelegten Reihe bestand für die Autorinnen und Autoren darin, in dem jeweils beschriebenen Bereich die geeigneten Schritte zu benennen, die in eine nachhaltige Entwicklung führen können. Dabei müssen wir uns immer vergegenwärtigen, dass der erfolgreiche Übergang zu einer derartigen ökonomischen, ökologischen und sozialen Entwicklung auf unserem Planeten nicht sofort gelingen kann, sondern viele Jahrzehnte dauern wird. Es gibt heute noch keine Patentrezepte für den langfristig erfolgreichsten Weg. Sehr viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und noch mehr innovationsfreudige Unternehmerinnen und Unternehmer sowie Managerinnen und Manager werden weltweit ihre Kreativität und Dynamik zur Lösung der großen Herausforderungen aufbieten müssen. Dennoch sind bereits heute erste klare Ziele erkennbar, die wir erreichen müssen, um eine sich abzeichnende Katastrophe abzuwenden. Dabei können weltweit Milliarden Konsumenten mit ihren täglichen Entscheidungen beim Einkauf helfen, der Wirtschaft den Übergang in eine nachhaltige Entwicklung zu erleichtern und ganz erheblich zu beschleunigen – wenn die politischen Rahmenbedingungen dafür geschaffen sind. Global gesehen haben zudem Milliarden von Bürgern die Möglichkeit, in demokratischer Art und Weise über ihre Parlamente die politischen »Leitplanken« zu setzen.

Die wichtigste Erkenntnis, die von Wissenschaft, Politik und Wirtschaft gegenwärtig geteilt wird, lautet, dass unser ressourcenschweres westliches Wohlstandsmodell (heute gültig für eine Milliarde Menschen) nicht auf weitere fünf oder bis zum Jahr 2050 sogar auf acht Milliarden Menschen übertragbar ist. Das würde alle biophysikalischen Grenzen unseres

Systems Erde sprengen. Diese Erkenntnis ist unbestritten. Strittig sind jedoch die Konsequenzen, die daraus zu ziehen sind.

Wenn wir ernsthafte Konflikte zwischen den Völkern vermeiden wollen, müssen die Industrieländer ihren Ressourcenverbrauch stärker reduzieren als die Entwicklungs- und Schwellenländer ihren Verbrauch erhöhen. In Zukunft müssen sich alle Länder auf gleichem Ressourcenverbrauchsniveau treffen. Nur so lässt sich der notwendige ökologische Spielraum schaffen, um den Entwicklungs- und Schwellenländern einen angemessenen Wohlstand zu sichern.

Um in diesem langfristigen Anpassungsprozess einen dramatischen Wohlstandsverlust des Westens zu vermeiden, muss der Übergang von einer ressourcenschweren zu einer ressourcenleichten und ökologischen Marktwirtschaft zügig in Angriff genommen werden.

Die Europäische Union als stärkste Wirtschaftskraft der Welt bringt alle Voraussetzungen mit, in diesem Innovationsprozess die Führungsrolle zu übernehmen. Sie kann einen entscheidenden Beitrag leisten, Entwicklungsspielräume für die Schwellen- und Entwicklungsländer im Sinn der Nachhaltigkeit zu schaffen. Gleichzeitig bieten sich der europäischen Wirtschaft auf Jahrzehnte Felder für qualitatives Wachstum mit zusätzlichen Arbeitsplätzen. Wichtig wäre in diesem Zusammenhang auch die Rückgewinnung von Tausenden von begabten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die Europa nicht nur aus materiellen Gründen, sondern oft auch wegen fehlender Arbeitsmöglichkeiten oder unsicheren Bedingungen verlassen haben.

Auf der anderen Seite müssen die Schwellen- und Entwicklungsländer sich verpflichten, ihre Bevölkerungsentwicklung in überschaubarer Zeit in den Griff zu bekommen. Mit stär-



kerer Unterstützung der Industrienationen muss das von der Weltbevölkerungskonferenz der UNO 1994 in Kairo verabschiedete 20-Jahres-Aktionsprogramm umgesetzt werden.

Wenn es der Menschheit nicht gelingt, die Ressourcen- und Energieeffizienz drastisch zu steigern und die Bevölkerungsentwicklung nachhaltig einzudämmen – man denke nur an die Prognose der UNO, nach der die Bevölkerungsentwicklung erst bei elf bis zwölf Milliarden Menschen am Ende dieses Jahrhunderts zum Stillstand kommt –, dann laufen wir ganz konkret Gefahr, Ökodiktaturen auszubilden. In den Worten von Ernst Ulrich von Weizsäcker: »Die Versuchung für den Staat wird groß sein, die begrenzten Ressourcen zu rationieren, das Wirtschaftsgeschehen im Detail zu lenken und von oben festzulegen, was Bürger um der Umwelt willen tun und lassen müssen. Experten für ›Lebensqualität‹ könnten von oben definieren, was für Bedürfnisse befriedigt werden dürfen« (*Erdpolitik*, 1989).

### Es ist an der Zeit

Es ist an der Zeit, dass wir zu einer grundsätzlichen, kritischen Bestandsaufnahme in unseren Köpfen bereit sind. Wir – die Zivilgesellschaften – müssen entscheiden, welche Zukunft wir wollen. Fortschritt und Lebensqualität sind nicht allein abhängig vom jährlichen Zuwachs des Pro-Kopf-Einkommens. Zur Befriedigung unserer Bedürfnisse brauchen wir auch keineswegs unaufhaltsam wachsende Gütermengen. Die kurzfristigen Zielsetzungen in unserer Wirtschaft wie Gewinnmaximierung und Kapitalakkumulierung sind eines der Haupthindernisse für eine nachhaltige Entwicklung. Wir sollten unsere Wirtschaft wieder stärker dezentralisieren und den Welthan-

del im Hinblick auf die mit ihm verbundene Energieverschwendung gezielt zurückfahren. Wenn Ressourcen und Energie die »wahren« Preise widerspiegeln, wird der weltweite Prozess der Rationalisierung und Freisetzung von Arbeitskräften sich umkehren, weil der Kostendruck sich auf die Bereiche Material und Energie verlagert.

Der Weg in die Nachhaltigkeit erfordert gewaltige technologische Innovationen. Aber nicht alles, was technologisch machbar ist, muss auch verwirklicht werden. Die totale Ökonomisierung unserer gesamten Lebensbereiche ist nicht erstrebenswert. Die Verwirklichung von Gerechtigkeit und Fairness für alle Menschen auf unserer Erde ist nicht nur aus moralisch-ethischen Prinzipien erforderlich, sondern auch der wichtigste Beitrag zur langfristigen Friedenssicherung. Daher ist es auch unvermeidlich, das politische Verhältnis zwischen Staaten und Völkern der Erde auf eine neue Basis zu stellen, in der sich alle, nicht nur die Mächtigsten, wieder finden können. Ohne einvernehmliche Grundsätze »globalen Regierens« lässt sich Nachhaltigkeit in keinem einzigen der in dieser Reihe diskutierten Themenbereiche verwirklichen.

Und letztendlich müssen wir die Frage stellen, ob wir Menschen das Recht haben, uns so stark zu vermehren, dass wir zum Ende dieses Jahrhunderts womöglich eine Bevölkerung von 11 bis 12 Milliarden Menschen erreichen, jeden Quadratzentimeter unserer Erde in Beschlag nehmen und den Lebensraum und die Lebensmöglichkeiten aller übrigen Arten immer mehr einengen und zerstören.

Unsere Zukunft ist nicht determiniert. Wir selbst gestalten sie durch unser Handeln und Tun: Wir können so weitermachen wie bisher, doch dann begeben wir uns schon Mitte dieses Jahrhunderts in die biophysikalische Zwangsjacke der Natur mit möglicherweise katastrophalen politischen Ver-

Wicklungen. Wir haben aber auch die Chance, eine gerechtere und lebenswerte Zukunft für uns und die zukünftigen Generationen zu gestalten. Dies erfordert das Engagement aller Menschen auf unserem Planeten.

### Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt den Autorinnen und Autoren dieser zwölfbändigen Reihe, die sich neben ihrer hauptberuflichen Tätigkeit der Mühe unterzogen haben, nicht für wissenschaftliche Kreise, sondern für eine interessierte Zivilgesellschaft das Thema Nachhaltigkeit allgemeinverständlich aufzubereiten. Für meine Hartnäckigkeit, an dieser Vorgabe weitestgehend festzuhalten, bitte ich an dieser Stelle nochmals um Nachsicht. Dankbar bin ich für die vielfältigen und anregenden Diskussionen über Wege in die Nachhaltigkeit.

Bei der umfangreichen Koordinationsarbeit hat mich von Anfang an ganz maßgeblich Ernst Peter Fischer unterstützt – dafür meinen ganz herzlichen Dank, ebenso Wolfram Huncke, der mich in Sachen Öffentlichkeitsarbeit beraten hat. Für die umfangreichen organisatorischen Arbeiten möchte ich mich ganz herzlich bei Annette Maas bedanken, ebenso bei Ulrike Holler vom S. Fischer Verlag für die nicht einfache Lektoratsarbeit.

Auch den finanziellen Förderern dieses Großprojektes gebührt mein Dank: allen voran der ASKO EUROPA-STIFTUNG (Saarbrücken) und meiner Familie sowie der Stiftung Europrofession (Saarbrücken), Erwin V. Conradi, Wolfgang Hirsch, Wolf-Dietrich und Sabine Loose.

Seeheim-Jugenheim  
Sommer 2006

Stiftung Forum für Verantwortung  
Klaus Wiegandt



---

## Vorwort

Der Mensch beeinflusst in zunehmendem Maße das Klima. Dieser von uns angestoßene globale Klimawandel hat seine Ursache darin, dass wir durch unsere vielfältigen Aktivitäten bestimmte, das Klima beeinflussende, Spurengase, wie beispielsweise Kohlendioxid, Methan oder Lachgas, in die Atmosphäre entlassen. Dabei spielen vor allem der Energiesektor, die Landwirtschaft und die Industrie als Emittenten eine herausragende Rolle. Hinzu kommt die Vernichtung der Wälder. Die Anreicherung dieser so genannten Treibhausgase in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung führt zu einer globalen Erwärmung, welche weit reichende Veränderungen im System Erde nach sich zieht. Dies ist der Kern des Klimaproblems. Dabei ist der Zusammenhang zwischen dem Gehalt von Spurengasen in der Atmosphäre und dem Weltklima schon seit über 100 Jahren bekannt.

Das Klimaproblem steht nicht allein, vielmehr muss man es auch im Zusammenhang mit den anderen großen Problemen der Menschheit sehen. So ist beispielsweise das Klimaproblem untrennbar mit der Bevölkerungsentwicklung oder mit der Energiefrage verbunden. Die Verfügbarkeit von Wasser hängt ganz entscheidend vom Klima ab, wie auch die Artenvielfalt. Die Klimaproblematik hat aber offensichtlich auch sozioökonomische Aspekte, und reicht weit in die Gesellschaft, in die Wirtschaft und in die Politik hinein. Insofern habe ich keine Sekunde gezögert, mich an der Buchreihe des Forums für Ver-

antwortung als Autor zu beteiligen. Sie befasst sich mit etwa einem Dutzend zentraler Zukunftsthemen, die in vielfältiger Art und Weise miteinander verwoben sind. Der übergeordnete Gedanke ist das Prinzip der Nachhaltigkeit. Nur wenn sich die nationalstaatliche und die Weltpolitik dem Gedanken der Nachhaltigkeit verpflichten, können die enormen Herausforderungen, vor denen die Menschheit steht, in unserer globalisierten Welt gelöst werden. Hinsichtlich des Klimaproblems ist langfristig insbesondere die verstärkte Nutzung der erneuerbaren Energien zu nennen, da eine weitere Energieversorgung unter Nutzung der fossilen Energien in den kommenden Jahrzehnten zu dramatischen Klimaänderungen führen wird. Der komplette Umbau zu einer kohlenstofffreien Weltwirtschaft kann wegen der großen Trägheit des Klimas allmählich erfolgen, innerhalb dieses Jahrhunderts, ohne große wirtschaftliche Verwerfungen zu hinterlassen. Wir haben es also noch in der Hand, unser Klima auf einem halbwegs akzeptablen Niveau zu stabilisieren. Ein Anliegen des Autors ist es, diese Möglichkeit in die Zivilgesellschaft zu kommunizieren.

Ich möchte dem Forum für Verantwortung, insbesondere Herrn Klaus Wiegandt, danken, der dieses Buchprojekt vorgeschlagen und großzügig unterstützt hat. Weiterhin gilt mein Dank meinen Autorenkolleginnen und -kollegen für die sehr inspirierenden Diskussionen auf den Autorentreffen, sowie meinen Kolleginnen und Kollegen am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften in Kiel und am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Meiner Frau Elisabeth danke ich für ihre grenzenlose Geduld, als ich in meiner Freizeit an dem Buch gearbeitet habe.

Kiel, den 7. Juli 2006

---

## Wissenschaftliche Grundlagen

---

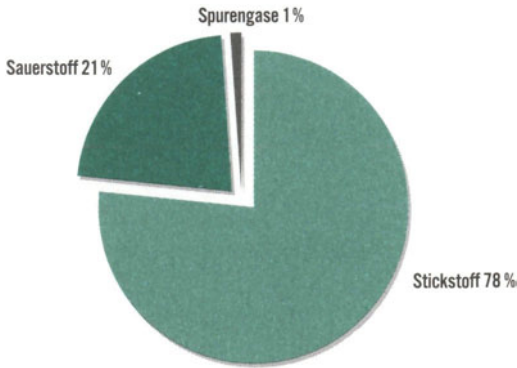
## 2 Der Treibhauseffekt

### 2.1 Die Zusammensetzung der Atmosphäre

Die optimalen Lebensbedingungen auf der Erde verdanken wir u. a. der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre, die sich von der Zusammensetzung 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 etwa 99 % haben (Abb. 4). 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 ( $H_2O$ ), das Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und Ozon ( $O_3$ ). So hat beispielsweise das Kohlendioxid zurzeit nur einen Anteil von etwa 0,038 % (380 ppm, ppm = parts per million), es ist aber für unser derzeitiges und künftiges Klima von großer Bedeutung.

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 (Abb. 5, Tab. 1). Dies ist der Kern des Klimaproblems. So stiegen die Konzentration von Kohlendioxid ( $CO_2$ ), von Methan





**Abb. 4** Die Zusammensetzung der Atmosphäre. Besonders wichtig im Hinblick auf das Klima sind die Spurengase, die nur etwa ein Prozent Anteil an der Atmosphäre haben.

( $\text{CH}_4$ ) und von Distickstoffoxid (Lachgas,  $\text{N}_2\text{O}$ ) massiv gegenüber ihren vorindustriellen Werten an. Die Gründe sind vielfältig. Sie liegen im starken Anstieg der Verbrennung fossiler Energieträger (Erdöl, Erdgas, Kohle) ebenso wie in der Ausweitung der industriellen Produktion, in Änderungen bei der Landnutzung oder bei der Ausweitung der Viehwirtschaft. Dabei spielt auch die Bevölkerungsexplosion eine wichtige Rolle. Zum Teil gelangen völlig neue Stoffe wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) in die Atmosphäre, die in der Natur nicht vorkommen, sondern ausschließlich durch den Menschen erzeugt werden. Viele der durch die Menschen

**Abb. 5** 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).

## Globale Konzentration von drei gut durchmischten Treibhausgasen in der Atmosphäre

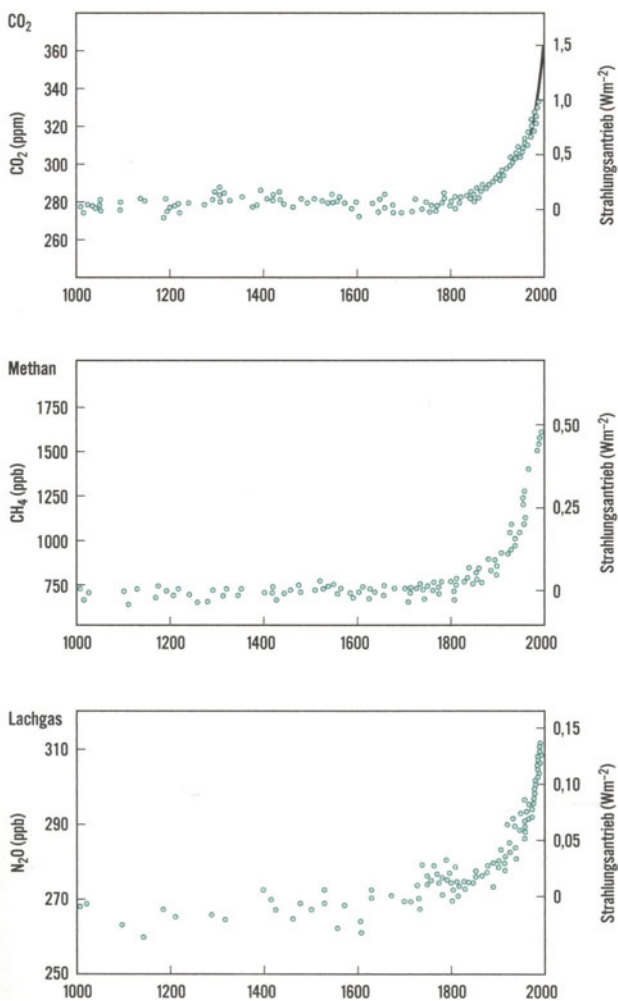


Abb. 5

in die Atmosphäre emittierten Spurengase sind sehr langlebig, sodass sie das Potenzial besitzen, das Klima Jahrhunderte lang zu beeinflussen. Zusammen mit der Trägheit des Klimas, das nur langsam auf Störungen reagiert, führt dies zu einem Langzeitproblem, das noch sehr viele nachfolgende Generationen beschäftigen wird.

Diese Spurengase, 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 (im nicht sichtbaren, langwelligen Bereich) ausgehende Strahlung. Dies ist, vereinfacht gesagt, die Natur des »Treibhauseffekts«. Die dabei beteiligten Gase werden allgemein als »Treibhausgase« bezeichnet.

	CO <sub>2</sub> Kohlen- dioxid	CH <sub>4</sub> Methan	N <sub>2</sub> O Distick- stoff- oxid	FCKW-11 Freon-11	HFC-23 Fluoro- form	CF <sub>4</sub> Trifluor- methan
Vorindustrieller Wert (ungefähre Werte)	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 Konzentrationsänderung pro Jahr in den 90ern	1,5 ppm	70 ppb	0,8 ppb	-1,4 ppt	0,55 ppt	1 ppt
Atmosphärische Lebensdauer in Jahren	ca. 100 (5-200)	12	114	45	260	> 50000

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

Die vom Menschen in die Atmosphäre emittierten Treibhausgase haben, wie oben schon erwähnt, 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 Jahre 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 Menschen 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 um wenige Prozent, würde die Schuldenlast ansteigen lassen. Ein nur geringfügiges Zurückfahren des Ausstoßes der Treibhausgase durch den Menschen hätte einen entsprechend kleinen Effekt, die Konzentrationen der meisten Treibhausgase würden trotzdem weiter ansteigen und damit ihre Klimawirkung.

## 2.2 Der natürliche Treibhauseffekt

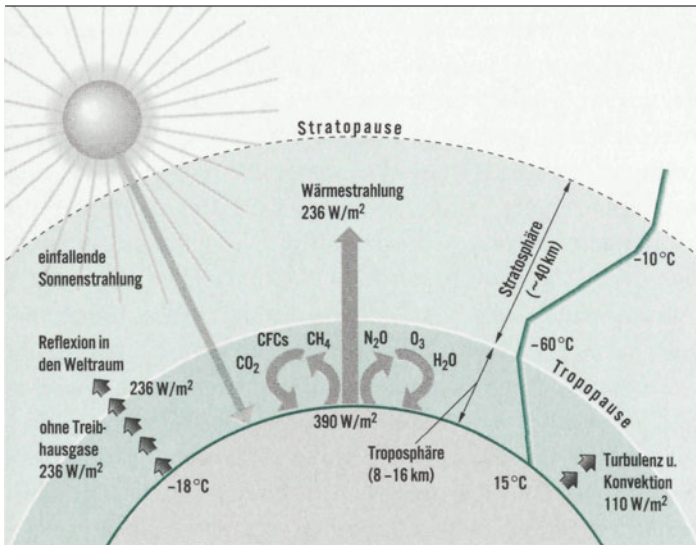
Wenn über das Klimaproblem gesprochen wird, fällt oft das Stichwort Treibhauseffekt – eine natürliche Eigenschaft der Erdatmosphäre. Es ist dieses Phänomen, das uns die optimalen Lebensbedingungen auf der Erde garantiert. Bekanntlich sendet Materie elektromagnetische Strahlung aller Wellenlängen in Form von Photonen aus (Emission), und zwar umso 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 (zwischen etwa 0,2 und 5  $\mu\text{m}$ ). 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. Es sind daher vor allem die Spurengase, die einen großen Einfluss auf das irdische Klima ausüben.

Bei einer Erde ohne Atmosphäre wäre die Oberflächentemperatur ausschließlich durch die Bilanz zwischen eingestrahelter Sonnenenergie und der von der Oberfläche abgestrahlten Wärmestrahlung festgelegt. Bei gleichem Rückstreuvermögen des Planeten wie heute würde diese Oberflächentemperatur im globalen Mittel etwa  $-18^\circ\text{C}$  betragen, sie beträgt heute

jedoch ca.  $+15^{\circ}\text{C}$  (s. Abb. 6). Selbst eine Atmosphäre aus reinem Sauerstoff und Stickstoff, die ja die Hauptkomponenten unserer Atmosphäre bilden, würde daran nichts Wesentliches ändern: Unser Planet wäre eine Eiswüste und Leben, so wie wir es kennen, wäre vermutlich nicht entstanden.



Der Treibhauseffekt

**Abb. 6** Schematische Darstellung des Strahlungshaushaltes der Atmosphäre und des natürlichen Treibhauseffekts

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 Energie-

einstrahlung, 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 genauso 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 erhöhten von der Erdoberfläche ausgehenden Wärmestrahlungsmenge wieder ausgeglichen. Hierfür 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 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 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 Distick-

stoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) mit je etwa 3 %. Die Existenz der Spurengase ist daher trotz ihrer geringen Konzentration einer der entscheidenden Faktoren, die unser Klima bestimmen. Man hört oft, dass der menschliche Anteil am Treibhauseffekt nur etwa 2 % beträgt, woraus dann oft der Schluss gezogen wird, dass der Einfluss des Menschen auf das Klima klein ist und daher vernachlässigt werden kann. 2 % bedeuten aber bei einem Treibhauseffekt von über  $30^\circ$  etwa  $0,6^\circ\text{C}$ . Dies entspricht in etwa dem Anteil an der Erwärmung der letzten hundert Jahre, der entsprechend der Klimamodellsimulationen auf das Konto des Menschen geht. Dieses so genannte Skeptiker-Argument bestätigt daher die Resultate der Klimaforschung. Derlei Zahlenspiele sollte man also immer kritisch hinterfragen und auch bis zum Ende durchrechnen.

Die Spurengase führen also insgesamt dazu, dass Wärme in der unteren Atmosphäre gefangen ist. Die Atmosphäre ist in gewisser Weise nicht transparent für Wärmestrahlung, aber weitgehend durchlässig für die solare Strahlung. Wegen der Analogie mit den Vorgängen in einem Treibhaus, dessen Glasverkleidung ebenfalls die Sonne gut durchlässt, die Wärme aber nicht, ist das hier beschriebene Phänomen auch als »natürlicher Treibhauseffekt« bekannt. Die dafür in der Atmosphäre verantwortlichen Gase werden daher häufig als Treibhausgase bezeichnet. Die Treibhausgase übernehmen also in gewisser Weise die Rolle des Glases in einem Treibhaus. Bei der Interpretation verschiedener Klimavorgänge ist aber 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 die im Glashaus eines Gärtners.



## 2.3 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 sich verstärkenden (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 an dieser Stelle nicht im Detail betrachtet (s. Kap. 4.3). Die Abb. 7 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, wie oben bereits erwähnt, 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 etwa 50 % die Nutzung fossiler Brennstoffe. Aus der Chemieproduktion stammen knapp 20 % des gesamten weltweiten Ausstoßes von Treibhausgasen. Hier handelt es sich vor allem um die FCKWs. Eine weitere wichtige Quelle der global emittier-

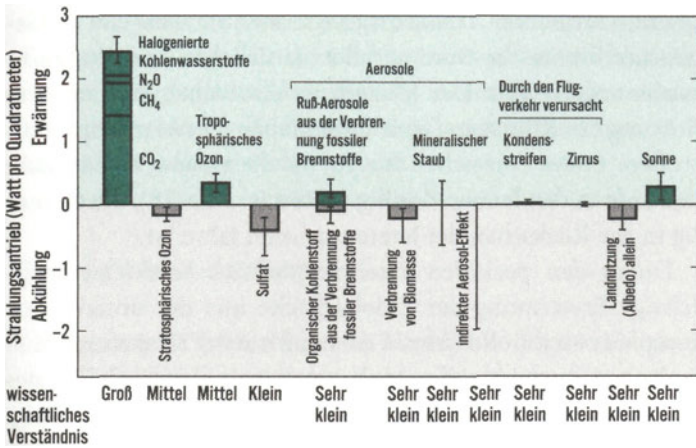


Abb. 7 Der mittlere globale Strahlungsantrieb des Klimasystems im Jahr 2000, im Vergleich zu 1750. Die Unsicherheit ist jeweils durch die Balken angegeben. Bei dem indirekten Aerosoleffekt handelt es sich um den Effekt der Aerosole auf die Wolkenbildung (nach IPCC 2001a).

ten Treibhausgasen ist die zunehmend intensiver betriebene Landwirtschaft mit 15 % der Emissionen. Die Vernichtung der Wälder macht weitere 15 % aus. Der aus diesem von uns Menschen verursachte Anstieg der Treibhausgasen 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 Treibhausgasen. Die Summe aller Faktoren, inklusive des Sonneneffektes, ist positiv, wobei der Effekt der anthropogenen Treibhausgasen 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, eine massive Störung des Klimas in Form einer globalen Erwärmung anzustoßen. Erstes Anzeichen hierfür ist die rasante Erwärmung der Erde in den letzten dreißig Jahren (s. Abb. 18), die einmalig in der Rückschau der letzten tausend Jahre ist.

Durch den positiven Strahlungsantrieb wird eine langfristige Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre angestoßen, deren Ausmaß mit der Konzentrationsänderung ansteigt, aber auch stark von der Reaktion des Wasserkreislaufs (Wasserdampf, Bewölkung, Niederschlag, Verdunstung, Schneebedeckung, Meereisausdehnung) 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, sodass dadurch die anfängliche Erwärmung durch den erhöhten Wasserdampfgehalt weiter verstärkt wird. Wir sprechen von einer »positiven Rückkopplung«, d. h. einem verstärkenden Prozess. Die Wasserdampfrückkopplung 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 Meereis-

ausdehnung, der Schneebedeckung und des Meeresspiegels sowie zu anderen Wetterextremen, d. h. zu einem globalen Klimawandel. 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.

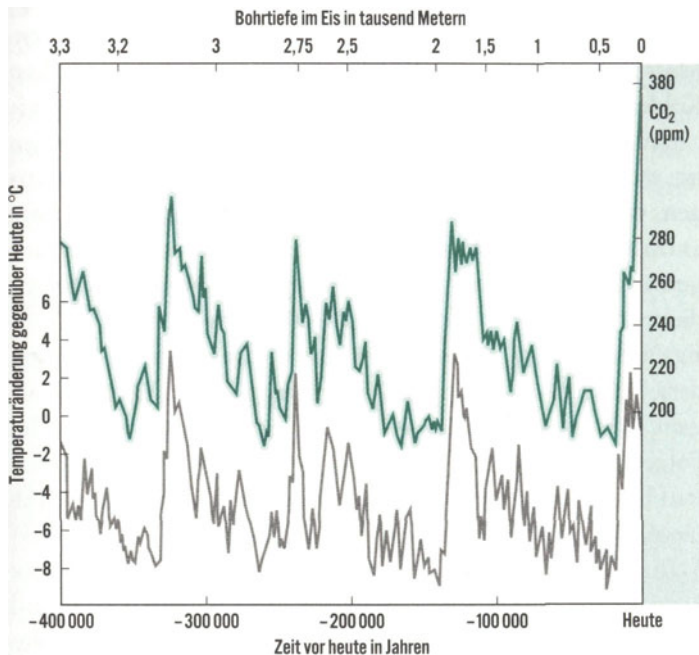
## 2.4 Die globale Kohlenstoffbilanz

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  $\text{CO}_2$ -Ausstoß ist daher eng an den weltweiten Energieverbrauch gekoppelt, da die Energiegewinnung vor allem auf der Verfeuerung fossiler Brennstoffe basiert. Etwa drei Viertel der  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$ -Ausstoß den Spitzenplatz ein. Mit der Beschleunigung des wirtschaftlichen Wachstums wird jedoch der Anteil der Entwicklungsländer, insbesondere der Chinas und Indiens, in den nächsten Jahrzehnten schnell zunehmen.

Die Konzentration von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre hat sich seit

Beginn der industriellen Revolution rasant erhöht. Lag der  $\text{CO}_2$ -Gehalt um 1800 noch bei ca. 280 ppm, so liegt er heute schon bei ca. 380 ppm. Dass der Mensch für diesen Anstieg verantwortlich ist, ist unstrittig. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass der  $\text{CO}_2$ -Gehalt heute schon so hoch ist wie seit Jahrhunderttausenden 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 Sauerstoffisotopenmessungen, abgeleitet. Man erkennt in der Abbildung 8 eine erstaunliche Parallelität der Verläufe von  $\text{CO}_2$ -Gehalt und Temperatur in den letzten 400000 Jahren, 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 über eine Änderung der Stärke des Treibhauseffekts 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 Abb. 8 auch, dass der  $\text{CO}_2$ -Gehalt zwar immer Schwankungen unterlegen ist, sich die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in den letzten 400000 Jahren aber typischerweise zwischen ca. 200 und 300 ppm bewegt hat. Neuere Untersuchungen zeigen, dass die heutige  $\text{CO}_2$ -Konzentration von



**Abb. 8** Schwankungen der Konzentration des Kohlendioxid und der Temperatur der letzten ca. 400 000 Jahre

380 ppm sogar im Hinblick auf die letzten 650 000 Jahre einmalig ist. Während der letzten Eiszeit vor etwa 20 000 Jahren lag der  $\text{CO}_2$ -Gehalt bei etwas unterhalb von 200 ppm, während der letzten großen Warmzeit, der Eem-Warmzeit, vor ca. 125 000 Jahren bei ca. 300 ppm. Wir befinden uns also heute in einem Bereich, der einmalig für die Menschheit ist und offenbar weit außerhalb der natürlichen Schwankungsbreite liegt. Es ist von daher schon äußerst unwahrscheinlich, dass der beobachtete  $\text{CO}_2$ -Anstieg auf natürliche Ursachen zurückzu-

führen ist. Darüber hinaus kann man mit modernen Messmethoden sicher den Menschen als Verursacher entlarven. Messungen des Kohlenstoff-Isotops  $^{14}\text{C}$  erlauben, zwischen Kohlendioxid aus natürlichen (biogenen) Quellen und solchem, das durch Verbrennung fossiler Brennstoffe entstanden ist, zu unterscheiden. Durchgeführte  $^{14}\text{C}$ -Messungen bestätigen, dass der Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre anthropogenen Ursprungs ist und nicht etwa auf Freisetzungen aus den Ozeanen zurückzuführen ist. Weiterhin zeigen die instrumentellen Kohlendioxid-Messungen, die gleichzeitig in der Atmosphäre und im 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 durch den Menschen in die Atmosphäre emittierte  $\text{CO}_2$  von den Ozeanen und der Vegetation aufgenommen wird, während die andere Hälfte in der Atmosphäre 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 sich die natürlichen Kohlenstoffflüsse, obwohl deutlich größer, weitgehend ausgleichen, z. B. gelangt vom Ozean normalerweise so viel  $\text{CO}_2$  in

die Atmosphäre, wie er selbst wieder aufnimmt (Abb. 9). Das Gleiche 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.

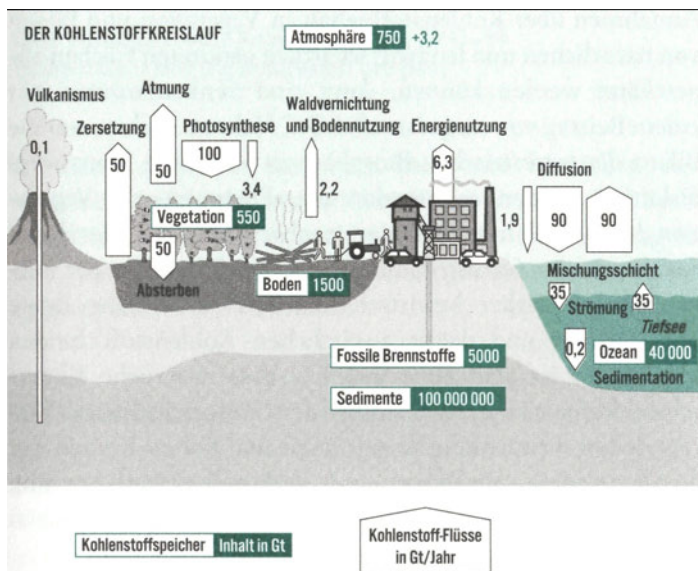


Abb. 9 Der globale Kohlenstoffkreislauf

Tab. 2 stellt die globale Bilanz des atmosphärischen  $\text{CO}_2$  für den Zeitraum 1990–1999 dar, wie sie aus instrumentellen Messungen ermittelt wurde. Entsprechend standen den weltweiten Emissionen aus dem Verbrauch von fossilen Brenn-



Stoffen (6,3 GtC/ Jahr; 1 GtC =  $10^{15}$  g C oder 1 Pg C) eine Zunahme in der Atmosphäre von 3,2 GtC/Jahr und eine Aufnahme durch den Ozean von ca. 1,9 GtC/Jahr gegenüber. Damit ergibt sich eine Nettoaufnahme der terrestrischen Biosphäre von 1,2 GtC/Jahr. Berücksichtigt man jedoch zudem die Emissionen aus Änderungen der Landnutzung (2,2 GtC/Jahr), beispielsweise 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/Jahr zu suchen, um die Bilanz der terrestrischen Biosphäre zu schließen. Kontrovers diskutiert werden insbesondere die »Düngung« der Vegetation durch die Zunahme des atmosphärischen  $\text{CO}_2$  oder durch anthropogenen Stickstoffeintrag, aber auch durch 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  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$  komplett zu entfernen, woraus sich der Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration seit Beginn der Industrialisierung erklärt. Die Untersuchungen der anderen relevanten Stoffkreisläufe (Methan- und Stickstoffkreislauf) liefern qualitativ ähnliche Ergebnisse, werden hier aber nicht

(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)	$3,4 \pm 1,1$

**Tab. 2** Atmosphärische Kohlenstoffbilanz 1990–99

Einheit: GtC/Jahr (Pg Kohlenstoff pro Jahr)

im Detail diskutiert. Insgesamt kann man feststellen, dass trotz der Unsicherheiten im Verständnis der globalen Stoffkreisläufe, die es immer noch gibt, der Mensch eindeutig für den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre verantwortlich zeichnet.

## 2.5 Die Ozonproblematik

Ein anderes Klimaproblem ist unter dem Namen »Ozonproblematik« oder »Ozonloch« bekannt. Ozon kommt vor allem in der Stratosphäre vor, das ist die Schicht in 10–50 km Höhe. Ozon (O<sub>3</sub>) filtert weitgehend die für Lebewesen schädliche UV Strahlung heraus, und das Leben konnte sich erst vom Meer aufs Land bewegen, nachdem sich die Ozonschicht gebildet hatte. Die Ozonschicht wird durch den Ausstoß der FCKWs durch uns Menschen geschädigt. Das stratosphärische Ozon ist von dem bodennahen Ozon zu unterscheiden. Letzteres entsteht während des Sommers oft in Ballungsgebieten durch photochemische Prozesse infolge des Ausstoßes von Stickoxi-

den und anderer so genannter Vorläufersubstanzen. Da Ozon ein Giftgas ist, werden Anstrengungen unternommen, die Bildung von bodennahem Ozon zu verringern. Die Katalysatorpflicht bei PKWs ist ein erster Schritt in diese Richtung. Genau genommen haben wir es also mit zwei verschiedenen Ozonproblemen zu tun.

Ozon wird in der Stratosphäre gebildet, indem molekularer Sauerstoff ( $O_2$ ) von ultravioletter Strahlung mit Wellenlängen unter 242 Nanometern (UV-B) in zwei O-Atome gespalten wird (Photolyse). Jedes dieser Sauerstoffatome kann sich wieder an ein  $O_2$ -Molekül anlagern, wobei Ozon ( $O_3$ ) entsteht.

Im Laufe der Zeit würde so der gesamte atmosphärische Sauerstoff in Ozon umgewandelt, wenn es nicht auch Abbau-mechanismen für Ozon geben würde, bei denen wieder Sauerstoff entsteht. Dies geschieht zum einen durch die Spaltung von Ozon durch sichtbares Licht mit einer Wellenlänge kleiner als 1200 Nanometer, zum anderen durch Stoßreaktionen mit Sauerstoffatomen. Lange Zeit ging man davon aus, dass diese Mechanismen das Schicksal des stratosphärischen Ozons vollständig beschreiben (Chapman-Zyklus). Heute wissen wir jedoch, dass eine dritte Kategorie von Reaktionen eine wichtige Rolle beim Ozonabbau spielt: katalytische Reaktionen des Ozons mit Molekülradikalen ( $HO_x$ ,  $NO_x$ ,  $ClO_x$ ,  $BrO_x$ ). Diese Reaktionen heißen katalytisch, weil das Radikal zunächst einige Ozonmoleküle zerstört und am Ende wieder unverändert als Radikal freigesetzt wird, und so dieselbe Reaktion mit neuen Ozonmolekülen erneut durchlaufen kann. Dies geschieht solange, bis das Radikal mit einem anderen Molekül als Ozon reagiert und dabei in eine stabile Verbindung eingebaut wird. Die Radikale sind z. T. natürlichen Ursprungs, vor allem aber stammen sie aus Emissionen der In-

dustrielländer. Bei den Chlorradikalen haben menschliche Emissionen (FCKW) einen Anteil von über 80 %.

Ozonbildung bzw. -zerstörung finden jeweils solange statt, bis je Zeiteinheit genauso viele Ozonmoleküle gebildet wie zerstört werden.

Die dann herrschende Ozonkonzentration befindet sich im »dynamischen Gleichgewicht«. Da die Ozonbildungs- und -abbaureaktionen in unterschiedlichen Höhen unterschiedlich schnell ablaufen, ist auch die Gleichgewichtskonzentration höhenabhängig. Das so entstehende vertikale Ozonprofil weist besonders hohe Ozonkonzentrationen in der Stratosphäre in etwa 15–30 km Höhe auf. Diese Schicht bezeichnet man daher als Ozonschicht. In ihr befinden sich etwa 75 % des atmosphärischen Ozons. Eine Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht wäre verhängnisvoll, da dann die UV-Strahlung praktisch ungehindert die Erdoberfläche erreichen könnte, was unabsehbare Folgen für das Leben hätte.

Unter dem Ozonloch versteht man die schnelle Abnahme der Ozonkonzentration in der Stratosphäre, die seit etwa 1980 jedes Jahr in zunehmendem Ausmaß über der Antarktis beobachtet worden ist.

Verantwortlich für den raschen und sehr effektiven Ozonabbau sind die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW), die nur durch den Menschen in die Atmosphäre gelangen. Das Ozonproblem ist im Wesentlichen als unabhängig vom anthropogenen Treibhauseffekt zu betrachten. Trotzdem werden diese beiden Problemkomplexe oft miteinander verwechselt. Dies liegt vermutlich an den FCKWs, die sowohl den anthropogenen Treibhauseffekt (mit)-verursachen als auch das stratosphärische Ozon zerstören.

Wichtig für den Ozonabbau sind die katalytischen Reaktionen der ozonzerstörenden Radikale, wobei besonders die

chlorhaltigen Radikale zu nennen sind. Damit es zum beobachteten schnellen Abbau von Ozon kommt, müssen deutlich mehr Radikale als normal im Bereich der Ozonschicht vorhanden sein. Diese »Anreicherung« der Stratosphäre mit Radikalen vollzieht sich in zwei Stufen: Im Winter entstehen aus chemisch inaktiven, katalysatorbindenden Substanzen (»Reservoirgase«) Verbindungen, die nur im Dunkeln stabil sind. Die Bildung dieser »Vorläufersubstanzen« erfolgt an der Oberfläche von stratosphärischen Partikeln – man spricht von heterogenen Reaktionen. Ein Beispiel ist die Reaktion von gasförmigem Chlornitrat ( $\text{ClONO}_2$ ) mit Chlorwasserstoff ( $\text{HCl}$ ) zu gasförmigem Chlorgas ( $\text{Cl}_2$ ) und Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ).  $\text{ClONO}_2$  und  $\text{HCl}$  sind in diesem Beispiel die Reservoirgase,  $\text{Cl}_2$  ist das Vorläufergas. Zu Beginn des Frühjahrs auf der Südhalbkugel (Oktober) werden die Vorläufersubstanzen durch den Einfall von Sonnenlicht gespalten, wobei sehr schnell große Mengen ozonzerstörender Radikale frei werden (z. B. entstehen aus Chlorgas ( $\text{Cl}_2$ ) zwei hochreaktive Chloratome ( $\text{Cl}$ )). Die katalytischen Abbaureaktionen zerstören nun sehr viel mehr Ozonmoleküle als neu gebildet werden können. Da gleichzeitig auch noch diejenigen Reaktionen verlangsamt ablaufen, welche die Radikale normalerweise wieder aus der Atmosphäre entfernen, verschiebt sich das Gleichgewicht zu sehr geringen Ozonkonzentrationen. Man beobachtet eine sehr starke Ausdünnung der Ozonschicht, das »Ozonloch«. Die Oberflächen, an denen die heterogenen Reaktionen zur Bildung der Vorläufersubstanzen ablaufen, werden hauptsächlich von so genannten polaren Stratosphärenwolken (PSC: *polar stratospheric clouds*) zur Verfügung gestellt. Diese Wolken bilden sich allerdings erst bei Temperaturen unterhalb von  $-78^\circ\text{C}$ . Solche Temperaturen werden in der Stratosphäre auch im Polarwinter nur erreicht, wenn die

Luft lange Zeit keine Sonnenstrahlung empfangen hat. Dazu muss sie sich über längere Zeit über dem Pol aufgehalten haben und darf sich nicht mit warmer Luft aus mittleren Breiten vermischt haben.

Dieser Luftaustausch wird im Polarwinter tatsächlich stark erschwert. Die nicht mehr von der Sonne beschienene Luft über dem Polargebiet ist deutlich kälter als die über den mittleren Breiten. Dieser Temperaturunterschied führt zu einer Luftströmung in Richtung Pol. Unter dem Einfluss der Erdrotation entsteht daraus eine riesige stratosphärische Zyklone, der Polarwirbel (*polar vortex*). Dieser Wirbel blockiert den Luftaustausch zwischen polaren und mittleren Breiten, d. h. die Luft, die einmal in den Wirbel gelangt ist, ist quasi über dem Polgebiet »gefangen«. Erst in diesem Wirbel hat die Luft genügend Zeit, um so weit abzukühlen, dass die Bildung von PSCs möglich ist. Somit ist auch die Bildung und Ansammlung der Vorläufersubstanzen aus den Reservoirgasen erst durch einen stabilen Wirbel in dem Umfang möglich, der für einen drastischen Ozonabbau nötig ist. Der Polarwirbel löst sich im Frühjahr durch die allmähliche Erwärmung der polaren Stratosphäre und die damit verbundene Änderung der Luftströmungen wieder auf.

Das Ozonloch ist ein Phänomen, das bisher nur über der Antarktis aufgetreten ist. Dort wird ab Frühlingsbeginn (Mitte September) eine rasche Abnahme des Gesamtzongehalts auf weniger als die Hälfte des normalen Wertes beobachtet. Ursache sind, wie oben beschrieben, chemische Reaktionen, die das Ozon in bestimmten Höhenbereichen der Stratosphäre teilweise völlig zerstören. Die Ozonwerte bleiben dann etwa sechs bis acht Wochen auf niedrigem Niveau, danach beginnt der Ozongehalt wieder zu steigen und erreicht fast wieder das Vorjahresniveau. Über der Arktis sind in der Vergan-

genheit zwar bereits ähnliche Ozonverluste beobachtet worden, jedoch waren diese bisher nicht von langer Dauer (maximal einige Tage). Auch war ihre Ausdehnung bei weitem nicht so groß wie über der Antarktis, sodass hierbei noch nicht von einem Ozonloch gesprochen werden sollte. Der Grund für diesen Unterschied zwischen den beiden Polgebieten liegt im Wesentlichen in der unterschiedlichen Geographie (Land-  
Meer-Verteilung, Gebirge) und den daraus resultierenden instabileren meteorologischen Verhältnissen auf der Nordhalbkugel. Diese führen dazu, dass die Bedingungen für das Auftreten eines Ozonlochs, vor allem eines äußerst stabilen Polarwirbels mit sehr niedrigen Temperaturen unter  $-78^{\circ}\text{C}$  zwischen 15 und 25 km Höhe, über der Arktis viel seltener sind und kürzer anhalten als über der Antarktis.

Auch ohne die besonderen Bedingungen innerhalb eines Polarwirbels wird außerhalb der hohen Breiten verstärkt stratosphärisches Ozon abgebaut. Dies geschieht ebenfalls über heterogene Reaktionen, und zwar an der Oberfläche von Schwefelsäuretröpfchen. Auch wenn dieser Vorgang nicht so spektakulär ist wie das Ozonloch über der Antarktis, so trägt er doch wesentlich neben der Gasphasenchemie zum globalen Ozonabbau bei. Bei der Betrachtung der Ozonschicht in mittleren Breiten spielen daneben auch dynamische Prozesse eine Rolle. Die ozonarme Luft über den Polargebieten wird nach der Auflösung des Polarwirbels in niedrigere Breiten transportiert. Diese »Umverteilung« von Luft mit »normalem« und geringem Ozongehalt zerstört zwar selbst kein Ozon, reduziert aber die Dichte der Ozonschicht in den mittleren Breiten. Beide Prozesse, die lokale Ozonzerstörung wie auch die Austauschvorgänge, führen zu einer langsamen, aber über die Jahre stetigen Ausdünnung der Ozonschicht in mittleren Breiten, je nach Höhe um 2 bis 7 % pro Dekade. Diese Aus-

dünnung der globalen Ozonschicht birgt die eigentlichen Gefahren für die Biosphäre, da diese auch in Gegenden auftritt, wo die Sonneneinstrahlung deutlich intensiver ist als über den Polgebieten.

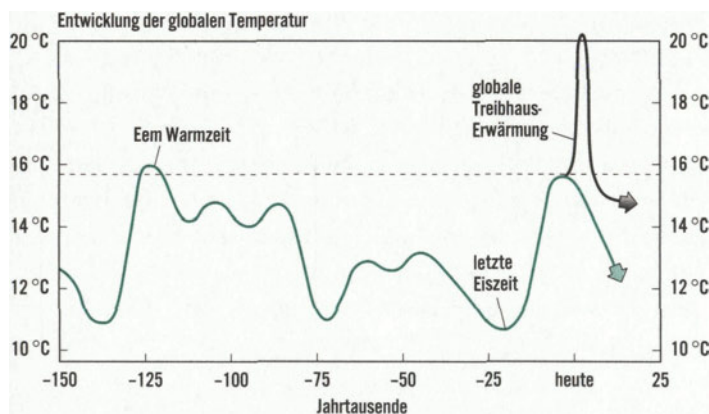
Der zusätzliche, vom Menschen verursachte Treibhauseffekt bewirkt zum einen eine Abkühlung der Stratosphäre. Eine wichtige Rolle bei der Ozonzerstörung spielen, wie wir gesehen haben, die polaren Stratosphärenwolken. Da sich diese Wolken allerdings erst bei Temperaturen unterhalb von  $-78^{\circ}\text{C}$  bilden und derartig niedrige Temperaturen nur über dem Südpol während der Polarnacht und bei Ausbildung einer austauscharmen, sehr stabilen Wettersituation (Polarwirbel) erreicht werden, findet man das Ozonloch zurzeit nur über der Antarktis. Infolge des anthropogenen Treibhauseffekts werden sich zwar die unteren Luftschichten erwärmen, die Stratosphäre hingegen abkühlen. Dies birgt die Gefahr, dass die Bedingungen für das Entstehen von PSCs günstiger werden, wodurch die Ozonzerstörung noch weiter begünstigt wird. Die durch das Montrealer Protokoll auf der weltpolitischen Ebene eingeleitete mögliche Erholung der Ozonschicht kann dadurch verzögert werden.

Zum anderen kann der anthropogene Treibhauseffekt eine Änderung der stratosphärischen Luftzirkulation verursachen, insbesondere eine Verstärkung des winterlichen Polarwirbels der Nordhemisphäre. Beides, die stratosphärische Abkühlung wie auch die Änderung der Zirkulation, führt dazu, dass die Unterschiede zwischen den beiden Polgebieten verringert werden. Die Wahrscheinlichkeit für die Bildung eines Ozonlochs auch über der Arktis und Nordeuropa steigt dadurch deutlich an. Fortschreitender Klimawandel kann noch eine weitere Folge für die Ozonschicht über Europa haben: Es ist bekannt, dass troposphärische Hochdruckgebiete die Tropo-



pause, die Grenzfläche zwischen Troposphäre und Stratosphäre, und die darüber liegende Stratosphäre inklusive der Ozonschicht anheben. Aufgrund der Höhenabhängigkeit von Ozonbildung und -abbau ist in größeren Höhen der Abbau etwas stärker, sodass die Ozonschicht über jedem Hochdruckgebiet etwas dünner ist. Verschiedene Klima-Modellrechnungen prognostizieren nun höheren Luftdruck über Westeuropa, was im Jahresmittel eine weitere Ausdünnung der Ozonschicht bedeuten würde. Eine endgültige wissenschaftliche Bewertung dieser Problematik steht allerdings noch aus. Dazu müssten traditionelle Klimamodelle mit aufwändigen Chemiemodellen gekoppelt werden. Erste derartige gekoppelte Modelle, welche die komplexen Wechselwirkungen zwischen physikalischen und chemischen Prozessen simulieren, werden derzeit entwickelt.

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 Jahren nicht gegeben. Darüber hinaus entspräche eine Erwärmung von etwa 5 °C dem Temperaturunterschied zwischen der letzten Eiszeit vor 20 000 Jahren und heute. Allerdings würde sich im Gegensatz hierzu die Treibhauserwärmung in nur hundert Jahren entwickeln. Eine derart rapide globale Klimaänderung hat es in der Geschichte der Menschheit noch nicht gegeben.



**Abb. 25** Die maximal mögliche Treibhauserwärmung bis zum Jahr 2100 im Vergleich der Temperaturen der letzten 150 000 Jahre

Klimamodelle können immer nur eine angenäherte Beschreibung des sehr komplexen realen Klimasystems liefern. Generell gilt, dass die Aussagekraft der Modelle umso geringer wird, je kleiner das betrachtete Gebiet ist. So können beispielsweise 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 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 meistens 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 Abb. 20 gezeigt.

### 6.3 Das Klima in Europa in der Mitte des 21. Jahrhunderts

Ein Modell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie wird nun im Hinblick auf die Veränderungen über Europa analysiert. Die Ergebnisse sind charakteristisch für viele Klimamodelle. Die globale Erwärmung hat eine Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfs zur Folge sowie einen verstärkten Wasserdampftransport von den Ozeanen zu den Kontinenten und damit eine Zunahme des Niederschlags über den Landge-

bieten. 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. Allerdings sind die Niederschlagstendenzen in den Winter- bzw. Sommermonaten sehr unterschiedlich. Während der Sommerniederschlag fast überall in Europa abnimmt, wird im Winter ein ausgeprägtes Nord-Süd-Gefälle vorhergesagt mit einer Abnahme im niederschlagsarmen Südeuropa und einer Zunahme im niederschlagsreichen Mittel- und Nordeuropa. Diese Zunahme hängt zusammen mit intensiverter winterlicher Sturmaktivität über dem Nordostatlantik und verstärkten Westwinden, die feuchte Luft vom Atlantik heranzuführen. Auffällig sind eine Häufung von Starkniederschlägen und damit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen. Dies gilt zum Teil sogar für den Mittelmeerraum, in dem die mittlere Niederschlagsmenge abnimmt. Ursache ist vermutlich der höhere Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, der bei extremen Wetterereignissen höhere Niederschlagsmengen ermöglicht als im heutigen Klima. Regionale und jahreszeitliche Unterschiede sind auch in den simulierten Temperaturänderungen erkennbar. Während im Sommer die größte Erwärmung bis zur Mitte dieses Jahrhunderts von bis zu 2,5°C in Spanien simuliert wird, sind die Erwärmungen im Winter besonders groß (bis zu 5°C) in Regionen wie dem nördlichen Skandinavien oder Russland, in denen als Folge der Erwärmung weniger Schnee fällt. Diese Tendenzen sind auch im Jahresmittel in abgeschwächter Form erkennbar. Insgesamt wird es in unseren Breiten typischerweise ca. 30 Tage pro Jahr weniger mit Frost geben, während

sich die Anzahl der Hitzetage pro Jahr mit Maximaltemperaturen von mehr als 30°C ebenfalls um ca. 30 erhöht.

Eine der wichtigen Fragen im Hinblick auf den Klimawandel ist, ob Hochwasser in Europa häufiger auftreten wird. Es gibt verschiedene Ursachen, die Hochwasser in Flüssen zu- oder abnehmen lassen: erstens Eingriffe in die Fließgeschwindigkeit der Flüsse und deren Zuläufe, wie etwa Flussbegradigungen, Dammbau, Bewässerungssysteme oder Änderungen in der Bodennutzung des Flusseinzugsgebietes (beispielsweise Abholzung von Wäldern). Diese Faktoren sind von Fluss zu Fluss verschieden und für die Zukunft schwer abschätzbar.

Zweitens werden Häufigkeit und Schwere von Hochwassern entscheidend von einer Klimaänderung bestimmt. Insbesondere extreme Niederschlagsereignisse sind dabei von Bedeutung. Durch den Anstieg der Treibhausgase kommt es nach Aussage aller Modelle neben einer mittleren Erwärmung zu einer Intensivierung des Wasserkreislaufes und damit global gemittelt zu mehr Niederschlag. Was das für einzelne Regionen bedeuten könnte, soll jetzt anhand zweier Rechnungen mit einem globalen Modell der Atmosphäre gezeigt werden. Zunächst wurde das heutige Klima für den Zeitraum 1970–1999 simuliert, indem beobachtete Konzentrationen der Treibhausgase verwendet wurden. Danach wurde das zukünftige Klima für den Zeitraum 2060–2089 simuliert, wobei Abschätzungen für zukünftige Treibhausgaskonzentrationen entsprechend dem Szenarium IS92a des IPCC hochgerechnet wurden. Es handelt sich hierbei um so genannte Zeitscheibenexperimente, bei denen man ein relativ hoch auflösendes Modell (ca. 100 km Auflösung) mit den Bedingungen, die mit einem grob auflösenden Modell (ca. 300 km Auflösung) simuliert wurden, antreibt. Dabei wird das grob auflösende Modell kontinuierlich für den Zeitraum 1860–2100 gerechnet, wie im

vorigen Kapitel beschrieben. Die resultierenden Meeresoberflächentemperaturen und Meereisbedeckungen der interessierenden Zeitscheiben (1970–1999 und 2060–2089) werden dann als Antrieb für das hoch auflösende Modell verwendet. Auf diese Weise kann man eine höhere regionale Genauigkeit erzielen, ohne dass man das kostspielige hoch auflösende Modell für die ganze Zeit rechnet.

In Nord- und Mitteleuropa steigt die Anzahl der Tage mit Niederschlägen über 20 mm/Tag deutlich, d. h. extrem starke Niederschläge nehmen zu. Ein Vergleich mit der Simulation des heutigen Klimas zeigt, dass in bestimmten Gebieten sogar eine Verdoppelung der Tage mit Starkniederschlägen auftritt (beispielsweise an der norwegischen Küste). Diese Tendenz kann man heute schon an der Station Hohenpeißenberg im Alpenvorland beobachten, an der sich die Anzahl der Starkniederschläge in den letzten hundert Jahren in etwa verdoppelt hat.

Um den Einfluss der geänderten Niederschläge auf die Flüsse zu untersuchen, wurden die eben vorgestellten Ergebnisse in ein Modell des lateralen Abflusses für Landflächen eingegeben, wobei Eingriffe des Menschen – z. B. durch Dammbau oder Begradigungen von Flüssen – vernachlässigt wurden, um den reinen Klimaeffekt zu bestimmen. In allen Regionen, in denen sowohl der mittlere Niederschlag als auch extreme Niederschlagsereignisse zunehmen, werden starke Hochwasser häufiger. Dies gilt besonders für Nordeuropa und Teile Mitteleuropas, also auch für uns in Deutschland.

Zudem werden vom Modell auch länger anhaltende sommerliche Trockenperioden für große Teile Europas simuliert. Die Extreme werden daher im Sommer in beide Richtungen zunehmen: längere Trockenperioden und mehr Starkniederschläge. Diese Abschätzungen aus Modellrechnungen 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 km verwenden. Regionale Klimamodelle, die etwa für Europa gerechnet werden und entsprechend hohe Auflösungen besitzen, bestätigen die Rechnungen mit den globalen Modellen insofern, als dass wir in der Tat im Sommer einerseits mit längeren Trockenperioden, andererseits aber auch mit mehr extremen Niederschlägen zu rechnen haben.

#### 6.4 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 Erwärmung des Meerwassers durch den anthropogenen Treibhauseffekt eine Ausdehnung der Wassersäule und führt so zu einem Anstieg des Meeresspiegels. Eine Erwärmung der gesamten Wassersäule um  $1^{\circ}\text{C}$  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