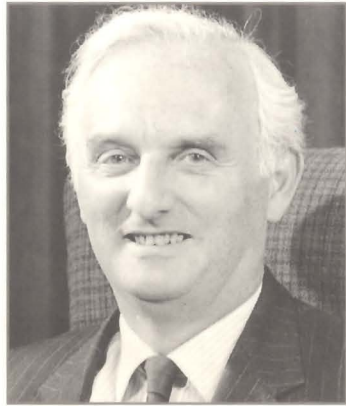


In der wissenschaftlichen Gemeinschaft herrscht Einigkeit darüber, daß sich die Erde erwärmt. Erbittert wird aber über das Ausmaß gestritten. Dieses Buch ist geeignet, die Debatte zu versachlichen und zu beleben. Der Autor beschreibt die neuesten wissenschaftlichen Ergebnisse und die sich daraus ergebenden möglichen Folgen für das Erdklima. Die klare und ausgewogene Darstellung wird durch zahlreiche informative Karten und Graphiken unterstützt. Der Leser wird angeregt, über Fragen nachzudenken, die im Mittelpunkt der Umweltdiskussion stehen: Können wir unseren Lebensstil beibehalten? Welche Welt werden wir unseren Kindern hinterlassen? Sind wir fähig, von einem reinen Konsumverhalten zu einer schonenden Nutzung der Rohstoffe überzugehen?



Sir John Houghton ist im Vorsitz der Arbeitsgruppe des *Internationalen Regierungsausschusses zu Klimaveränderungen (IPCC)*, Vorsitzender der *Königlichen Kommission zur Umweltschmutzung in Großbritannien* und Mitglied des *Britischen Regierungsausschusses zur Nachhaltigen Entwicklung*. Von 1976 bis 1983 war er Professor für Atmosphärische Physik an der Universität Oxford. Von 1983 bis zu seinem Ausscheiden im Jahre 1992 leitete Sir John Houghton den Britischen Wetterdienst. Im Jahre 1972 wurde er in die Gesellschaft der *Königlichen Akademie der Naturwissenschaften (Royal Society)* von London aufgenommen; er erhielt Auszeichnungen der *Königlichen*

*Meteorologischen Gesellschaft* und der *Königlichen Astronomischen Gesellschaft* sowie Ehrendoktorwürden zahlreicher Universitäten. Er ist der Autor von „The Physics of Atmospheres“ (die 3. Auflage ist in Vorbereitung). Die englische Originalausgabe dieses Buches („Global Warming. The Complete Briefing“) erhielt 1994 den zweiten Platz des Sir Peter Kent Umweltschutzpreises.

ISBN N 3-540-61844-9



9 783540 618447

John Houghton

# Globale Erwärmung

Fakten, Gefahren

und Lösungswege



---

John Houghton

# Globale Erwärmung

Fakten, Gefahren und Lösungswege

Mit 81 Abbildungen und 15 Tabellen

**Springer**

*Berlin  
Heidelberg  
New York  
Barcelona  
Budapest  
Hongkong  
London  
Mailand  
Paris  
Santa Clara  
Singapur  
Tokio*



Springer

Sir JOHN HOUGHTON, CBE FRS  
Royal Commission on Environmental Pollution  
Church House  
Great Smith Street  
London SW1P 3BZ  
United Kingdom

Übersetzung: Büro Stasch (GBR)  
Stasch, Häringer, Peschka  
Robert-Koch-Str. 14, D-95447 Bayreuth

Titel der englischen Originalausgabe:  
Global Warming - The Complete Briefing  
© 1994 Lion Publishing, Oxford, United Kingdom  
Text copyright © 1994 Sir John Houghton

ISBN 3-540-61844-9 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme  
Houghton, John: Globale Erwärmung: Fakten, Gefahren und Lösungswege;  
mit 15 Tabellen/John Houghton. [Übers.: Büro Stasch]. –  
Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hongkong; London;  
Mailand; Paris; Santa Clara; Singapur; Tokio: Springer, 1997  
Einheitssacht. Global warming <dt.>  
ISBN 3-540-61844-9

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funkübertragung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997  
Printed in Germany

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

Umschlaggestaltung: Bayerl & Ost, Frankfurt  
Umschlagabbildung: © David Rickerd, The Image Bank  
Druck: Mercedes-Druck, Berlin  
Buchbinder: Lüderitz & Bauer, Berlin

SPIN 10521553 32/3135 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

## Vorwort

Der Klimawandel und die globale Erwärmung stehen weit oben auf der politischen Tagesordnung. Jedem von uns stellen sich folgende drängende Fragen: Verändern menschliche Aktivitäten das Klima? Gibt es eine globale Erwärmung? Wie groß werden die Veränderungen womöglich sein? Wird es schlimmere und häufigere Katastrophen geben? Können wir uns an den klimatischen Wandel anpassen oder die Art unseres Handelns so verändern, daß dieser Wandel verlangsamt oder sogar verhindert werden kann?

Da das Klimasystem der Erde äußerst komplex ist, menschliche Verhaltensweisen und Reaktionen auf dessen Wandel selbst jedoch noch komplexer sind, besteht die gewaltige Herausforderung für die Wissenschaftler der Erde darin, Antworten auf diese Fragen zu finden. Wie bei vielen anderen wissenschaftlichen Problemen gibt es momentan nur Teilantworten, aber unsere Kenntnisse wachsen schnell, und die Wissenschaftler widmen sich diesen Problemen mit erhöhter Aufmerksamkeit und Anstrengung.

Drei wesentliche Umweltprobleme sind im Bewußtsein der Menschen oft miteinander verbunden: die globale Erwärmung, der Ozonabbau (das Ozonloch) und der saure Regen. Obwohl es wissenschaftliche Querverbindungen zwischen diesen drei Komplexen gibt (die ozonzerstörenden chemischen Substanzen und die Partikel, die bei der Entstehung des sauren Regens eine Rolle spielen, tragen auch zur globalen Erwärmung bei), handelt es sich doch um drei verschiedene Probleme. Ihr hervorstechendes gemeinsames Merkmal ist das enorme Ausmaß. Im Fall des sauren Regens können die Schwefeldioxidemissionen eines Landes die Wälder und Seen eines anderen Landes, das in Windrichtung liegt, erheblich schädigen. Globale Erwärmung und Ozonabbau sind Beispiele für Umweltprobleme globalen Ausmaßes – eine Verschmutzung, bei der das Verhalten eines Menschen oder eines Landes alle anderen Menschen und Länder betreffen kann. Erst in den letzten 30 Jahren etwa haben die menschlichen Aktivitäten eine Form und ein solch großes Ausmaß angenommen, daß deren Auswirkungen weltweit zu beobachten sind. Und da diese Probleme globaler Natur sind, müssen alle Länder an ihrer Lösung beteiligt werden.

Als zentrale zwischenstaatliche Organisation, um die Problematik der globalen Erwärmung anzugehen, wurde 1988 das Zwischenstaatliche Gremium über den Klimawandel (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) gegründet. Auf seiner ersten Zusammenkunft im November 1988 in Genf forderte das IPCC zunächst einen wissenschaftlichen Bericht, der alle bereits bekannten wissenschaftlichen Fakten zur globalen Erwärmung zusammentragen und sichern sollte. Es schien dringend erforderlich, der Politik eine solide wissenschaftliche Grundlage zu liefern, mittels derer die notwendigen Maßnahmen entwickelt werden konnten.

Dieser erste wissenschaftliche Bericht wurde Ende Mai 1990 veröffentlicht. Am Montag, den 17. Mai, lieferte ich der damaligen britischen Premierministerin Margaret Thatcher und Mitgliedern ihres Kabinetts in der Downing Street einen Vorbericht. Ich war darauf gefaßt, daß es während meiner Darstellung zu vielen Unterbrechungen und Fragen kommen würde. Doch die etwa 30 Kabinettsmitglieder und höhere Beamte, die sich im historischen Kabinettszimmer versammelt hatten, hörten mir schweigend zu. Sie waren an dem Zwischenbericht äußerst interessiert, und die Fragen und Diskussionen im Anschluß verdeutlichten, wie groß ihre Besorgnis über die Umweltprobleme dieser Welt war.

Seitdem ist das Interesse vieler politischer Führer gestiegen – dies wird durch deren Teilnahme an zwei wichtigen Weltkonferenzen zur globalen Erwärmung verdeutlicht: an der zweiten Weltklimakonferenz in Genf 1990 und an der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (*United Nations Conference on Environment and Development*, UNCED) 1992 in Rio de Janeiro. Die Konferenz von Rio mit über 25 000 Teilnehmern an der Haupt- und den vielen Nebenveranstaltungen war die größte Konferenz, die jemals stattfand. Nie zuvor hatten sich bei einer einzigen Konferenz so viele Regierungsoberhäupter und politische Führer versammelt. Aus diesem Grund wird sie auch als „Erdgipfel“ bezeichnet.

Ein großer Teil der ständigen Einschätzung des Klimawandels konzentriert sich beim IPCC und in seinen drei Arbeitsgruppen, die sich mit der Wissenschaft, den Auswirkungen sowie den Reaktionsmöglichkeiten befassen. Der erste IPCC-Report von 1990 bildete den Auslöser für jene internationalen Verhandlungen, die die Agenda der UNCED-Konferenz in Rio de Janeiro vorbereiteten; diese Beurteilung des IPCC gab der UN-Rahmenkonvention über den Klimawandel, die in Rio von über 160 Ländern unterzeichnet wurde, wesentliche Impulse. Als Vorsitzender bzw. zweiter Vorsitzender der Wissenschaftsarbeitsgruppe war es mir vergönnt, mit vielen hundert wissenschaftlichen Kollegen aus verschiedenen Ländern eng zusammenzuarbeiten, die bereitwillig mit ihrer Zeit und ihren Kenntnissen zur Arbeit des IPCC beitrugen.

In diesem Buch beziehe ich mich im wesentlichen auf die Berichte aller drei IPCC-Arbeitsgruppen aus den Jahren 1990 und 1992. Des Weiteren beziehe ich mich, um die Möglichkeiten zukünftigen Handelns zu erörtern, auf die Inhalte der Klimakonvention. Ich glaube, daß alles, was ich hier darlege, mit den Berichten des IPCC sowie der Klimakonvention übereinstimmt. Dennoch muß ich betonen, daß die Auswahl des Materials sowie alle von mir vorgetragenen Ansichten natürlich meine eigene Meinung darstellen und auf keinen Fall als offizielle Einschätzungen des IPCC aufgefaßt werden dürfen.

Im Lauf der Vorbereitung der beiden IPCC-Berichte gab es heftige wissenschaftliche Debatten darüber, was und wieviel man überhaupt zum möglichen Klimawandel im nächsten Jahrhundert sagen könne. Einige Forscher gaben anfangs zu bedenken, daß die Unsicherheiten so groß seien, daß sich die Wissenschaftler von jeder Form der Abschätzung oder Vorhersage der Zukunft fernhalten sollten. Allerdings wurde bald deutlich, daß die Wissenschaft die Verantwortung hat, die aussagekräftigsten Daten über das mögliche Ausmaß des Klimawandels im Zusammenhang mit klaren Aussagen zu den Einschätzungen sowie zu ihren Unsicherheitsfaktoren zu veröffentlichen. Ähnlich wie bei Wettervorhersagen werden ihre Ergebnisse zwar nicht exakt sein, aber ein hilfreiches Werkzeug darstellen.

Es wurden bereits viele Bücher über die globale Erwärmung publiziert. Dieses Buch unterscheidet sich von vielen anderen dadurch, daß ich versucht habe, das Wissen über die globale Erwärmung, ihre Folgen und die möglichen Vorgehensweisen in einer Weise darzustellen, die auch dem interessierten Laien verständlich sein dürfte. Auch wenn viele Zahlen in diesem Buch auftauchen – die Quantifizierung der Probleme ist meiner Meinung nach eine wichtige Aufgabe –, so finden sich darin doch keine mathematischen Gleichungen. Ich habe außerdem im fortlaufenden Text nur ein Minimum an Fachwörtern verwendet. Verschiedene technische Erläuterungen, die für den wissenschaftlich ausgebildeten Leser von Interesse sein könnten, finden sich in einigen Kästen. Die anderen Kästen enthalten weiteres Material zu speziellen Themen.

Dankbar bin ich allen, die mir spezielle Unterlagen für dieses Buch zur Verfügung gestellt und aufbereitet haben, sowie jenen, die das Buch gelesen und in hilfreicher Weise Kritik geübt haben. Danken möchte ich den Mitarbeitern des IPCC: Bert Bolin, dem IPCC-Vorsitzenden, Gylvan Meira Filho, meinem stellvertretenden Vorsitzenden der IPCC-Arbeitsgruppe Wissenschaft, Robert Watson, dem stellvertretenden Vorsitzenden der IPCC-Arbeitsgruppe über Auswirkungen und Reaktionsstrategien sowie Bruce Callender, Chris Folland, Niel Harris, Katherine Maskell, John Mitchell, Martin Parry, Peter Rowntree, Catherine Senior und Tom Wigley. Außerdem möchte ich meinen Dank aussprechen an Myles Allen, David Carson, Jonathan Gregory, Donald Hay, David Fisk, Kathryn Francis, Michael Jefferson, Geoffrey Lean und John Twidell. Die Mannschaft von Lion Publishing, Rebecca Winter, Nicholas Rous und Sarah Hall, hat in sehr hilfreicher Weise dazu beigetragen, das Buch für die Publikation einzurichten und insbesondere dafür Sorge zu tragen, daß es für das Auge angenehm und gut lesbar ist. Schließlich schulde ich meiner Frau Sheila besonderen Dank, die mich stets ermutigt hat, dieses Buch zu schreiben, und deren Unterstützung und Hilfe während der ganzen Zeit seiner Entstehung nicht nachgelassen haben.

---

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |                            |    |
|----------|---|----------------------------|----|
| <b>1</b> | <b>Globale Erwärmung und Klimawandel</b>                    | 1                          |    |
| 1.1      | Verändert sich das Klima?                                   | 1                          |    |
| 1.2      | Die 80er Jahre: ein bemerkenswertes Jahrzehnt               | 4                          |    |
| 1.3      | Das El Niño-Phänomen  | 6                          |    |
| 1.4      | Die Wirkung vulkanischer Eruptionen auf Temperaturextreme   | 7                          |    |
| 1.5      | Sind wir dem Wandel ungeschützt ausgeliefert?               | 8                          |    |
| 1.6      | Das Problem der globalen Erwärmung                          | 9                          |    |
| 1.7      | Die Unsicherheit der Vorhersagen und der Handlungsbedarf    | 10                         |    |
| ✓        | <b>2</b>  | <b>Der Treibhauseffekt</b> | 13 |
| 2.1      | Warum die Erde warm bleibt                                  | 13                         |    |
| 2.2      | Der Treibhauseffekt   | 14                         |    |
| 2.3      | Mars und Venus  | 19                         |    |
| 2.4      | Der „ungebremste“ Treibhauseffekt                           | 20                         |    |
| 2.5      | Der anthropogene Treibhauseffekt                            | 21                         |    |
| ✓        | <b>3</b>  | <b>Die Treibhausgase</b>   | 25 |
| 3.1      | Welches sind die wichtigsten Treibhausgase?                 | 25                         |    |
| 3.2      | CO <sub>2</sub> und der Kohlenstoffkreislauf                | 26                         |    |
| 3.3      | Andere Treibhausgase  | 36                         |    |
| 3.3.1    | Methan (CH <sub>4</sub> )                                   | 36                         |    |
| 3.3.2    | Distickstoffoxid (N <sub>2</sub> O)                         | 38                         |    |
| 3.3.3    | Fluorchlorkohlenstoffe (FCK) und Ozon (O <sub>3</sub> )     | 38                         |    |
| 3.3.4    | Gase mit einer indirekten Treibhauswirkung                  | 41                         |    |
| 3.4      | Aerosolpartikel in der Atmosphäre                           | 41                         |    |
| 3.5      | Strahlungsantrieb durch Änderung der Treibhausgasemissionen | 42                         |    |
| <b>4</b> | <b>Klimageschichte</b>                                      | 45                         |    |
| 4.1      | Die letzten 100 Jahre                                       | 45                         |    |
| 4.2      | Die letzten 1000 Jahre                                      | 49                         |    |
| 4.3      | Die letzten 1000000 Jahre                                   | 50                         |    |
| 4.4      | Wie stabil war das Klima in der Vergangenheit?              | 55                         |    |
| <b>5</b> | <b>Klimamodelle</b>   | 59                         |    |
| 5.1      | Wettermodelle   | 59                         |    |
| 5.2      | Saisonale Vorhersagen                                       | 67                         |    |
| 5.3      | Das Klimasystem   | 71                         |    |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.4      | Rückkopplungen im Klimasystem   | 72         |
| 5.5      | Modelle für Klimaprognosen  | 76         |
| 5.6      | Validierung des Modells   | 81         |
| 5.7      | Einige Ergebnisse von Modellen  | 83         |
| 5.8      | Verhält sich das Klima chaotisch?   | 85         |
| 5.9      | Die Zukunft von Klimamodellen   | 85         |
| <b>6</b> | <b>Klimawandel im Fall des Business-as-usual-Szenario</b>                   | <b>89</b>  |
| 6.1      | Modellprognosen   | 89         |
| 6.2      | Vorhersagen der Weltmitteltemperatur  | 90         |
| 6.3      | Vergleich mit Messungen   | 91         |
| 6.4      | Regionaler Klimawandel  | 93         |
| 6.5      | Veränderungen bei extremen Witterungsereignissen                            | 96         |
| 6.6      | Weitere Faktoren, die sich auf den Klimawandel auswirken können             | 98         |
| <b>7</b> | <b>Die Auswirkungen des Klimawandels</b>                                    | <b>101</b> |
| 7.1      | Ein komplexes Geflecht von Veränderungen                                    | 101        |
| 7.2      | Wie stark wird der Meeresspiegel ansteigen?                                 | 102        |
| 7.3      | Die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs                                  | 105        |
| 7.4      | Die Auswirkungen auf die Trinkwasserressourcen                              | 109        |
| 7.5      | Die Auswirkungen auf die Landwirtschaft<br>und die Nahrungsmittelversorgung | 117        |
| 7.6      | Die Auswirkungen auf natürliche Ökosysteme                                  | 121        |
| 7.7      | Die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit                             | 125        |
| 7.8      | Kostenkalkulation der Auswirkungen  | 126        |
| 7.9      | Die Auswirkungen der globalen Erwärmung im Überblick                        | 128        |
| <b>8</b> | <b>Weshalb sollten wir besorgt sein?</b>                                    | <b>133</b> |
| 8.1      | Die Erde im Gleichgewicht   | 133        |
| 8.2      | Die Ausbeutung der Erde   | 134        |
| 8.3      | Zurück zur Natur  | 135        |
| 8.4      | Der technokratische Standpunkt  | 135        |
| 8.5      | Die zukünftigen Generationen  | 136        |
| 8.6      | Die Einheit der Erde  | 137        |
| 8.7      | Die Treuhänder der Erde   | 141        |
| 8.8      | Die Gärtner der Erde  | 143        |
| 8.9      | Eine Partnerschaft mit Gott   | 144        |
| <b>9</b> | <b>Die Beurteilung der Unsicherheitsfaktoren</b>                            | <b>147</b> |
| 9.1      | Die wissenschaftliche Unsicherheit  | 147        |
| 9.2      | Die IPCC-Schätzung  | 149        |
| 9.3      | Die Eingrenzung der Unsicherheit  | 151        |
| 9.4      | Nachhaltige Entwicklung   | 153        |
| 9.5      | Warum nicht abwarten und zusehen?   | 155        |
| 9.6      | Das Vorsorgeprinzip   | 156        |
| 9.7      | Einige globale wirtschaftliche Aspekte                                      | 158        |

|                  |  |            |
|------------------|--|------------|
| <b>10</b>        | <b>Maßnahmen zur Verlangsamung und Stabilisierung des Klimawandels</b> | <b>163</b> |
| 10.1             | Die Klimakonvention  | 163        |
| 10.2             | Die Stabilisierung der Emissionen                                      | 165        |
| 10.3             | Das Montreal-Protokoll   | 166        |
| 10.4             | Wälder   | 166        |
| 10.5             | Reduzierung der Methanemissionen                                       | 169        |
| 10.6             | Die Stabilisierung der CO <sub>2</sub> -Konzentration                  | 170        |
| 10.7             | Zusammenfassung der erforderlichen Maßnahmen                           | 172        |
| <b>11</b>        | <b>Energieversorgung und Transportwesen der Zukunft</b>                | <b>175</b> |
| 11.1             | Weltenergiebedarf und -versorgung                                      | 175        |
| 11.2             | Zukünftige Energiebelange  | 178        |
| 11.3             | Energieeinsparungen und -effizienz                                     | 182        |
| 11.4             | Regenerative Energien  | 188        |
| 11.4.1           | Wasserkraft  | 190        |
| 11.4.2           | Biomasse als Energieträger   | 191        |
| 11.4.3           | Windkraft  | 193        |
| 11.4.4           | Sonnenenergie  | 195        |
| 11.4.5           | Andere regenerative Energiequellen                                     | 199        |
| 11.5             | Die Finanzierung der Nutzung regenerativer Energien                    | 200        |
| 11.6             | Technologien für die langfristige Entwicklung                          | 202        |
| 11.7             | Kernenergie  | 203        |
| 11.8             | Zusammenfassung  | 204        |
| <b>12</b>        | <b>Das globale Dorf</b>  | <b>207</b> |
| 12.1             | Die Herausforderungen des Klimawandels                                 | 207        |
| 12.2             | Nicht das einzige globale Problem                                      | 209        |
| 12.3             | Das Ziel einer Treuhandschaft für die Umwelt                           | 211        |
| <b>Literatur</b> |  | <b>213</b> |
| <b>Glossar</b>   |  | <b>217</b> |
| <b>Index</b>     |  | <b>223</b> |

# 1 Globale Erwärmung und Klimawandel

**D**er Begriff „globale Erwärmung“ wurde erst in jüngerer Zeit geläufig, als Umweltthemen in die Schlagzeilen kamen. Er provozierte unterschiedlichste Stellungen, von solchen, die den Weltuntergang heraufbeschwören, bis hin zu solchen, die das Ganze als Unsinn abtun. Ziel dieses Buches ist es, den gegenwärtigen wissenschaftlichen Kenntnisstand über die globale Erwärmung verständlich und nachvollziehbar darzustellen, damit wir aufgrund der Fakten sachkundige Entscheidungen treffen können.

---

## 1.1

### Verändert sich das Klima?

Im Jahr 2060 werden meine Enkel fast 70 sein; wie wird ihre Welt wohl aussehen? Wie wird sie sich tatsächlich während der 70 Jahre ihrer normalen Lebensspanne entwickeln? In den vergangenen sieben Jahrzehnten sind viele Dinge geschehen, die 1920 noch niemand hätte vorhersehen können. Das Tempo der Veränderungen läßt in den nächsten 70 Jahren sogar noch mehr Neuerungen erwarten. Ziemlich sicher ist nur, daß die Welt noch überfüllter und noch vernetzter sein wird. Inwieweit wird das wachsende Ausmaß menschlicher Aktivitäten die Umwelt beeinträchtigen? Und vor allem: Wird die Welt wärmer sein? Wie wird sich wohl ihr Klima verändern?

Aber bevor wir die zukünftige Klimaentwicklung untersuchen: Was kann über die Klimaveränderungen der Vergangenheit ausgesagt werden? In den weiter zurückliegenden Zeiten hat es sehr große Veränderungen gegeben. Die letzte der *Kaltzeiten* neigte sich vor etwa 20 000 Jahren langsam ihrem Ende zu. Gegenwärtig befinden wir uns in einer Periode, die man *Interglazial* nennt. Kapitel 4 wird diese weit in der Vergangenheit liegenden Zeiten genauer betrachten. Hat es aber auch im sehr viel kürzeren Zeitraum unserer lebendigen Erinnerung – während der letzten Jahrzehnte – Veränderungen gegeben?

Die alltäglichen Veränderungen des *Wetters* finden zu jeder Zeit statt; sie sind ein wesentlicher Bestandteil unseres Lebens. Als *Witterung* bezeichnet man den mittleren Charakter des Wetterablaufes in einem Zeitraum von einigen Tagen bis zu einer Jahreszeit. Das *Klima* einer Region hingegen wird bestimmt als dessen über einen längeren Zeitraum gemittelttes Wetter bzw. Witterung. Diese Spanne kann einige Monate, eine Jahreszeit, gewöhnlich aber mehrere Jahre ausmachen. Auch Klimaabweichungen sind uns sehr vertraut. Wir beschreiben den Sommer als naß oder trocken und den Winter als mild, kalt oder stürmisch. Auf den Britischen Inseln gleicht, wie in vielen anderen Teilen der Welt, keine Jahreszeit derjenigen des letzten Jahres, ja sogar keiner je-

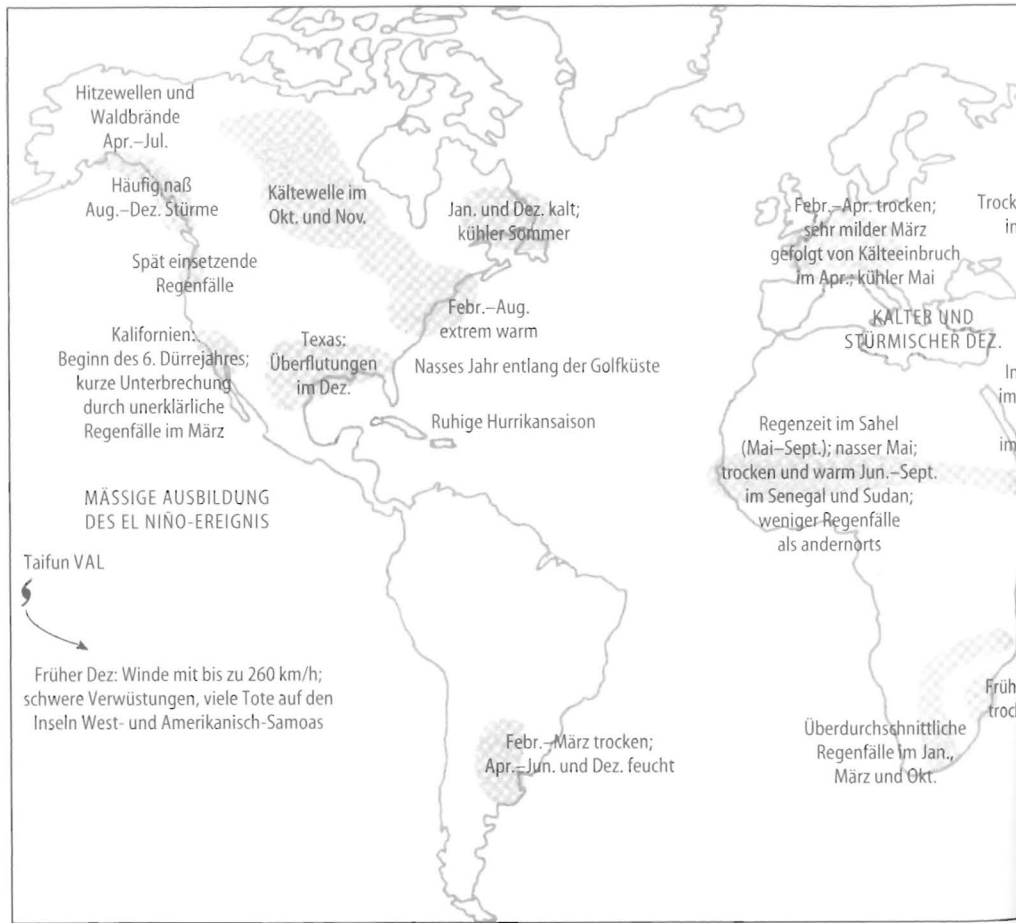


Abb. 1.1. Besondere Witterungsanomalien und -ereignisse im Jahr 1991; verzeichnet durch das *Climate Analysis Centre* der USA<sup>1</sup>

mals zuvor dagewesenen und wird sich auch in nächster Zeit im Detail nicht genau so wiederholen. Die meisten dieser Schwankungen nehmen wir als selbstverständlich hin; sie machen unser Leben in vielerlei Hinsicht interessanter. Jene, von denen wir besondere Notiz nehmen, sind die Extremsituationen und Katastrophen (z. B. zeigt Abb. 1.1 die bedeutendsten Witterungsereignisse und Katastrophen des Jahres 1991). Ein Großteil der weltweit schlimmsten Katastrophen ist tatsächlich wetter- oder klimabedingt. Tabelle 1.1 listet sie in der Reihenfolge ihrer Schwere auf, wobei hier die Dürren fehlen, deren Auswirkungen nur verzögert eintreten, die aber wahrscheinlich die schwerwiegendsten Katastrophen überhaupt darstellen.



Tabelle 1.1. Naturkatastrophen 1947–1980 in Reihenfolge ihrer Schwere<sup>2</sup>

| Art der Katastrophe                                | Tote   |
|--|--------|
| 1. Tropische Wirbelstürme, Hurrikane, Taifune      | 499000 |
| 2. Erdbeben  | 450000 |
| 3. Überschwemmungen (andere als mit 1. verbundene) | 194000 |
| 4. Tornados und Gewitter                           | 29000  |
| 5. Schneestürme                                    | 10000  |
| 6. Vulkane   | 9000   |
| 7. Hitzewellen                                     | 7000   |
| 8. Lawinen   | 5000   |
| 9. Erdbeben  | 5000   |
| 10. Flutwellen (Tsunamis)                          | 5000   |



## 1.2

## Die 80er Jahre: ein bemerkenswertes Jahrzehnt

Die 80er Jahre dieses Jahrhunderts sind ungewöhnlich warm gewesen. Dieses Jahrzehnt war weltweit betrachtet das wärmste, seit man vor etwas mehr als 100 Jahren mit genauen Wetteraufzeichnungen begann. Dieser Trend setzte sich auch in den 90er Jahren fort. Bezogen auf die globale Durchschnittstemperatur war 1990\* das wärmste Jahr seit Bestehen der Aufzeichnungen; sieben der acht wärmsten Jahre lagen in den 80er und frühen 90er Jahren.

Dieser Zeitraum war auch wegen der Häufigkeit und Stärke seiner Wetter- und Witterungserscheinungen ungewöhnlich (wie ungewöhnlich, werden wir später noch betrachten). So wurden z.B. in Westeuropa Phasen mit überdurchschnittlich starken Winden registriert. Während der frühen Morgenstunden des 16. Oktobers 1987 wurden in Südostengland und im Raum London über 15 Mio. Bäume durch Windbruch gefällt. Der Sturm traf auch Nordfrankreich, Belgien und die Niederlande mit ungeheurer Intensität. Er erwies sich als der schlimmste Sturm, der seit 1703 in diesem Gebiet wütete. Winde mit ähnlichen Sturmstärken, die ein größeres Gebiet Westeuropas betrafen, wüteten mehrfach im Januar und Februar 1990.

Diese in Europa auftretenden Stürme erscheinen jedoch harmlos im Vergleich mit den viel stärkeren und zerstörerischen Stürmen, die im gleichen Zeitraum andere Teile der Welt heimsuchten. Etwa 80 Hurrikane und Taifune – andere Bezeichnungen für tropische Wirbelstürme – bilden sich jedes Jahr über den tropischen Meeren, und sie sind uns so vertraut, daß wir ihnen sogar Namen geben. Der Hurrikan Gilbert, der 1988 Jamaika und die mexikanische Küste verwüstete, sowie der Hurrikan Andrew, der 1992 in Florida und anderen Regionen der südlichen USA großen Schaden anrichtete, sind jüngste Beispiele dafür. Tiefliegende Gebiete, wie etwa Bangladesch, sind durch Sturmfluten, die in Verbindung mit tropischen Wirbelstürmen auftreten, besonders bedroht. Das Zusammentreffen von äußerst niedrigem Luftdruck, extrem starkem Wind und hohen Gezeiten verursacht Sturmfluten, die weit in das Binnenland vordringen können. Während einer der schlimmsten Katastrophen dieses Jahrhunderts ertranken 1970 in Bangladesch über 250 000 Menschen. Im Jahr 1991 durchlitten die Bewohner dieses Landes einen weiteren Sturm solchen Ausmaßes; schwächere Sturmfluten treten dort regelmäßig auf.

Die in jüngster Zeit zunehmenden Sturmstärken wurden auch vom Versicherungswesen registriert, das von den Katastrophen schwer getroffen wurde. Bis Mitte der 80er Jahre ging man allgemein davon aus, daß durch Versicherungen abgedeckte Sturmschäden die Grenze von 1 Mrd. \$ wenn überhaupt, dann nur in den USA überschreiten könnten. Doch die Stürme, die im Oktober 1987 in Westeuropa auftraten, läuteten eine Serie von Sturmkatastrophen ein, die Verluste von 10 Mrd. \$ alltäglich erscheinen ließen. Der Hurrikan Andrew z.B. zog Versicherungsverluste von schätzungsweise 16 Mrd. \$ nach sich. Die Schätzungen in Tabelle 1.2 illustrieren, wie die Zahl und das Ausmaß solcher Katastrophen in den letzten drei Jahrzehnten zugenommen haben.

\* [Diesen Rekord hält mittlerweile nach Angaben der Meteorologischen Organisation der Vereinten Nationen (WMO) das Jahr 1995 (Anm. d. Übers.).]

Tabelle 1.2. Verluste durch große Sturmkatastrophen von 1960–1992 (hauptsächlich in Nordamerika und Europa; bezogen auf das Preisniveau von 1992), geschätzt von einer das Versicherungswesen beratenden Forschungsgruppe<sup>1</sup>

|  | Dekade 10 Jahre |         |         |         |
|--|-----------------|---------|---------|---------|
|  | 1960–69         | 1970–79 | 1980–89 | 1983–92 |
| Anzahl der Sturmkatastrophen             | 8               | 14      | 29      | 31      |
| Wirtschaftliche Verluste                 | 23              | 34      | 38      | 88      |
| Durch Versicherungen abgedeckte Verluste | 5               | 8       | 19      | 52      |

Die wirtschaftlichen Verluste sind seit den 60er Jahren um das Vierfache gestiegen, während sich die Versicherungsverluste nahezu verzehnfacht haben. Obwohl ein Teil dieser Zunahme von der in diesem Zeitraum gerade in den besonders gefährdeten Gebieten gestiegenen Bevölkerungszahl herrührt, scheint doch ein großer Anteil auf die in den späten 80er und frühen 90er Jahren erhöhte Sturmhäufigkeit zurückzuführen zu sein.

Stürme sind keineswegs die einzigen Wetter- und Witterungsextreme, die Katastrophen verursachen. Noch verheerender können sich für das Leben der Menschen und ihren Besitz Überschwemmungen, die durch besonders intensive oder anhaltende Regenfälle verursacht werden, oder Dürreperioden infolge langfristig verminderter Nie-

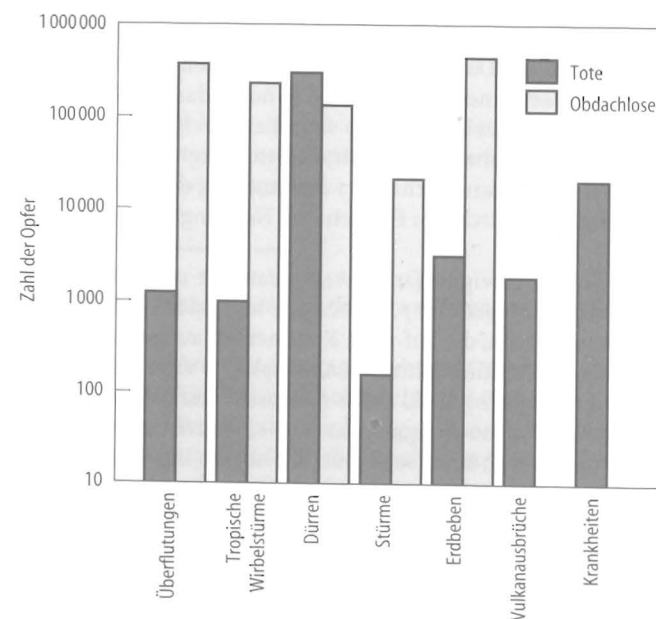


Abb. 1.2. Registrierte Katastrophen in Afrika von 1980–89; Werte geschätzt durch die Organisation für Afrikanische Einheit (Organization for African Unity, OAU)<sup>4</sup>

derschläge (oder deren gänzlich Ausbleiben) auswirken. Solche Ereignisse treten in vielen Teilen der Welt, besonders aber in den Tropen und Subtropen, häufig auf. Einige drastische Beispiele dafür gab es während des letzten Jahrzehnts. Im Jahr 1988 wurden in Bangladesch die höchsten jemals beobachteten Hochwasserstände registriert; 80% des gesamten Landes waren davon betroffen. Das Gebiet um den Jangtsekiang in China erlebte 1991 eine katastrophale Überschwemmung. 1993 erreichte das Hochwasser des Mississippi und des Missouri in den USA einen nie zuvor beobachteten Hochstand und überflutete ein Gebiet von etwa der Größe eines der Großen Seen\*\*. Weite Gebiete im Norden und Süden Afrikas und Australiens litten unter Dürren in Ausmaßen und über Zeiträume hinweg, die größer waren als alles, woran sich die Menschen erinnern konnten. Aufgrund der größeren Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen und Dürren lasten diese Katastrophen oft am schwersten auf denen, die in der Welt am wehrlosesten sind und die solche Ereignisse am wenigsten verkraften können. Abbildung 1.2 zeigt, daß die klimabedingten Katastrophen auf dem afrikanischen Kontinent dort mehr als die Hälfte aller Katastrophen ausmachen und vermittelt einen Eindruck vom Ausmaß der Probleme.

### 1.3

#### Das El Niño-Phänomen

Die Niederschlagsverteilung, die in den Tropen und Subtropen zu Überschwemmungen und Dürren führt, wird von der Oberflächentemperatur der Ozeane rund um die Welt stark beeinflusst. Dies gilt besonders für die Verteilung der Oberflächentemperaturen im Pazifik vor der Küste Südamerikas (siehe Kap. 5). Etwa alle 3–5 Jahre bildet sich ein großes Gebiet mit überdurchschnittlich warmer Wassertemperatur und bleibt für ein Jahr oder auch länger bestehen. Da die Bildung dieser Phänomene gewöhnlich um die Weihnachtszeit herum einsetzt, nennt man sie „El Niño“ („das Kind“). In den Ländern entlang der südamerikanischen Pazifikküste sind diese Ereignisse seit Jahrhunderten gut bekannt, da sie katastrophale Folgen für die Fischfangindustrie haben. Das warme Oberflächenwasser der Ozeane verhindert den Aufstieg des kälteren und nährstoffreicheren Tiefenwassers, wodurch den Fischen ihre Nahrungsgrundlage entzogen wird.

Ein besonders intensives El Niño-Ereignis fand 1982/83 statt; die ungewöhnlichen Maxima der Oberflächentemperatur lagen um 7°C über den normalen Mittelwerten. Viele Dürren und Überschwemmungen, die auf allen Kontinenten auftraten, wurden mit diesem El Niño-Ereignis in Verbindung gebracht (Abb. 1.3). Wie viele andere Wetter- und Klimaphänomene auch, variieren die El Niños meist sehr stark in ihrem Charakter. So schwächte sich z. B. das El Niño-Ereignis, das 1990 einsetzte und zu Beginn des Jahres 1992 am ausgeprägtesten war, Mitte 1992 plötzlich ab, um im Frühjahr 1993 wieder an Stärke zu gewinnen. Die außergewöhnlichen Überschwemmungen im Zentrum der Vereinigten Staaten sowie in den Anden und die Dürren in Afrika und Australien hängen vermutlich mit diesem ungewöhnlich in die Länge gezogenen El Niño-Ereignis zusammen. Computersimulationen der Art, wie sie später in Kap. 5 beschrieben werden, liefern die wissenschaftlichen Grundlagen über die Verbindun-

\*\* [Dies entspricht ungefähr der Fläche Niedersachsens (Anm. d. Übers.).]



Abb. 1.3. Gebiete, die von Dürren und Überschwemmungen in Verbindung mit dem El Niño-Ereignis von 1982/83 betroffen waren<sup>5</sup>

gen zwischen El Niño- und extremen Wetterereignissen; sie geben auch Anlaß zur Hoffnung, daß es uns eines Tages möglich sein könnte, derartige Katastrophen zufriedenstellend vorherzusagen.

### 1.4

#### Die Wirkung vulkanischer Eruptionen auf Temperaturextreme

Vulkane stoßen enorme Mengen Staub und Gase bis in die obere Atmosphäre aus. Das schließt auch große Mengen Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) ein, das über photochemische Reaktionen unter Beteiligung der Energie des Sonnenlichts in Schwefelsäure und Sulfataerosole umgewandelt wird. Gewöhnlich verweilen diese Aerosole über einen Zeitraum von mehreren Jahren in der Stratosphäre (dem Bereich der Atmosphäre oberhalb von 10 km Höhe), bevor sie in die untere Atmosphäre absinken und durch Niederschläge rasch ausgewaschen werden. Während dieser Zeit verteilen sie sich über den ganzen Erdball und fangen einen Teil der Sonnenstrahlung ab, was zu einer Abkühlung der unteren Atmosphäre führt.

Einer der größten Vulkanausbrüche dieses Jahrhunderts war der des Pinatubo auf den Philippinen am 12. Juni 1991. Im Verlauf dieser Eruption wurden etwa 20 Mio. t

Schwefeldioxid zusammen mit gewaltigen Staubmengen in die Stratosphäre geschleudert. Dieser stratosphärische Staub verursachte über viele Monate hinweg auf der ganzen Welt spektakuläre Sonnenuntergänge. Die Menge der Sonnenstrahlung, die die untere Atmosphäre erreichte, nahm dabei um etwa 2 % ab. In den zwei darauf folgenden Jahren wurden um ca. 0,25 °C niedrigere globale Mitteltemperaturen festgestellt. Es gibt sogar Hinweise darauf, daß einige der ungewöhnlich kalten Winter im Nahen Osten und die milden Winter in Westeuropa mit der Wirkung des vulkanischen Staubes zu tun haben.

## 1.5

### Sind wir dem Wandel ungeschützt ausgeliefert?

Das Auftreten dieser extremen Witterungsereignisse und klimatischen Katastrophen hat uns allen vor Augen geführt, wie wichtig das Klima für unser Leben ist; und dies brachte viele Länder der Welt dazu, sich ihrer Gefährdung durch klimatische Veränderungen bewußt zu werden – einer Gefährdung, die durch die rapide steigende Nachfrage nach Ressourcen noch erhöht wird.

Wir müssen uns jedoch die Frage stellen, wie außergewöhnlich diese Ereignisse sind. Weisen sie auf vom Menschen verursachte Klimaveränderungen hin? Liefern sie Beweise für eine globale Erwärmung, die durch das Verbrennen fossiler Energieträger und die damit verbundene Erhöhung der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid (im folgenden immer: CO<sub>2</sub>) und anderen Treibhausgasen verursacht wird?

An dieser Stelle muß zur Vorsicht gemahnt werden. Die Bandbreite normaler natürlicher Klimaschwankungen ist groß. Extreme Witterungen sind nichts Neues. Ständig werden irgendwelche Klimarekorde gebrochen. Ein Monat, der ohne einen irgendwo gebrochenen Rekord verginge, würde wohl selbst so etwas wie einen Rekord darstellen! Veränderungen des Klimas, die einen wirklich langfristigen Trend anzeigen, können nur nach vielen Jahren erkannt werden.

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre hat während der letzten zwei Jahrhunderte, und ganz besonders während der vergangenen 50 Jahre, zugenommen. Um klimatische Veränderungen auszumachen, die sich auf dieses CO<sub>2</sub> zurückführen lassen, müssen wir nach Entwicklungen der globalen Erwärmung suchen, die sich über wesentlich längere Zeiträume verfolgen lassen. Diese Zeiträume sind lang im Vergleich zum Erinnerungsvermögen einer Generation wie auch zu der Zeitspanne, für die exakte Wetteraufzeichnungen vorliegen. Obwohl festgestellt werden kann, daß z. B. das Gebiet des Nordatlantiks in den 80er und frühen 90er Jahren stürmischer als in den vorherigen zwei Jahrzehnten gewesen ist, ist es nicht einfach zu klären, ob diese Jahre im Vergleich mit anderen Abschnitten der letzten hundert Jahre eine so große Ausnahme darstellen. Noch größer sind die Schwierigkeiten in vielen anderen Teilen der Welt, wenn man dort detaillierte Klimatrends ausmachen will, weil ausreichende Aufzeichnungen fehlen; hinzu kommt, daß Entwicklungen im Auftreten seltener Ereignisse sehr schwer zu erkennen sind.

Die weltweit generell kalte Periode während der 60er und frühen 70er Jahre unseres Jahrhunderts ließ Spekulationen aufkommen, daß wir am Beginn einer neuen Kaltzeit stünden. In den frühen 70er Jahren wurde eine britische Fernsehreihe mit dem Titel „Die Eiszeit kommt“ produziert und auch weithin ausgestrahlt – doch der kalte

Trend fand ein frühzeitiges Ende. Wir dürfen uns von unserem relativ kurzen Gedächtnis nicht in die Irre führen lassen.

Wichtig sind zunächst kontinuierliche und gewissenhafte Vergleiche zwischen der praktischen Beobachtung des Klimas, dessen Veränderungen und dem, was wir nach unseren wissenschaftlichen Erkenntnissen zu erwarten haben. Im Lauf der letzten Jahre, während der das Auftauchen extremer Wettersituationen die Öffentlichkeit für Umweltthemen verstärkt sensibilisierte, sind sich auch die Wissenschaftler in ihrem Urteil über den Einfluß des Menschen auf das Klima etwas sicherer geworden. In den folgenden Kapiteln wird die Frage, welche Klimaveränderungen wir zu erwarten haben und inwieweit diese Veränderungen mit den jüngeren Klimaaufzeichnungen zusammenpassen, genauer erörtert. Dennoch sei bereits hier ein kurzer Abriß über die gegenwärtige wissenschaftliche Position zu diesem Problem gegeben.

## 1.6

### Das Problem der globalen Erwärmung

Die Industrie und andere Aktivitäten (z. B. Brandrodungen) setzen in zunehmendem Maße Gase, insbesondere CO<sub>2</sub>, in die Atmosphäre frei. Gegenwärtig gelangen mit diesen Emissionen jährlich über 7 Mrd. t Kohlenstoff in die Atmosphäre, von denen ein großer Teil voraussichtlich für einen Zeitraum von 100 Jahren oder länger dort verbleibt. Da CO<sub>2</sub> die von der Erdoberfläche abgestrahlte Wärme gut absorbiert, wirkt eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration wie eine die Erde einhüllende Decke und hält sie wärmer, als sie es normalerweise wäre. Mit zunehmender Temperatur steigt auch der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, wodurch sich die einhüllende Wirkung erhöht und es noch wärmer wird. Für diejenigen von uns, die in kälteren Klimaregionen leben, mag das reizvoll klingen. Wie dem auch sei, die Zunahme der globalen Temperatur wird auch zu weltweiten Klimaänderungen führen. Wären diese Veränderungen nur von geringem Ausmaß und vollzögen sie sich langsam genug, dann wären wir mit ziemlicher Sicherheit in der Lage, uns an sie anzupassen. Doch angesichts der raschen weltweiten Expansion der Industrie ist es unwahrscheinlich, daß der Wandel gering und langsam vonstatten gehen wird. Die Schätzung, die ich in späteren Kapiteln erläutern werde, geht dahin, daß sich die globale Mitteltemperatur alle 10 Jahre um 0,25 °C – bzw. um 2,5 °C in einem Jahrhundert – erhöhen wird, wenn Anstrengungen ausbleiben, um den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen einzudämmen.

Das scheint auf den ersten Blick kein sehr dramatischer Wert zu sein, besonders im Vergleich zu den Temperaturunterschieden zwischen Tag und Nacht oder von einem Tag zum anderen. Doch handelt es sich hierbei nicht um die Temperatur an einem bestimmten Ort, sondern um die global gemittelte Temperatur. Die vorhergesagte Rate von 2,5 °C innerhalb eines Jahrhunderts würde wahrscheinlich eine schnellere Veränderung der globalen Mitteltemperatur darstellen, als sie während der letzten 10 000 Jahre jemals zu beobachten war. Wenn wir uns vergegenwärtigen, daß der Unterschied der Weltmitteltemperatur zwischen den kältesten Abschnitten einer Kaltzeit und den warmen Perioden zwischen den Kaltzeiten (vgl. Abb. 4.4) nur 5 oder 6 °C ausmacht, dann wird verständlich, daß nur wenige Grad Celsius an diesem globalen Mittelwert erhebliche klimatische Veränderungen nach sich ziehen können.

Nicht alle klimatischen Veränderungen werden sich ungünstig auswirken. Während manche Gegenden der Welt von häufigeren oder schwereren Dürren und Überschwemmungen betroffen sein werden, werden andere Teile, z. B. die subarktischen Gebiete, möglicherweise bewohnbarer. Doch selbst dort werden die zu erwartenden Veränderungen Probleme verursachen: So können schwere Gebäudeschäden durch schmelzenden Permafrost auftreten, und es wird einige Zeit dauern, bis sich die Bäume der subarktischen Wälder wie auch die in Wäldern anderer Klimazonen an die neuen Klimaverhältnisse angepaßt haben.

Die Wissenschaft ist heute weitgehend davon überzeugt, daß menschliche Aktivitäten eine Erwärmung des Weltklimas und klimatische Veränderungen bewirken. Beträchtliche Unsicherheit besteht jedoch in der Frage, wie stark die Erwärmung ausfallen wird und welcher Art die veränderten klimatischen Verhältnisse in verschiedenen Teilen der Welt sein werden. Obwohl einige Hinweise gegeben werden können, vermag die Wissenschaft heute nicht genau zu sagen, welche Regionen am stärksten und in welcher Weise betroffen sein werden. Um die Zuverlässigkeit wissenschaftlicher Vorhersagen zu verbessern, müssen noch intensive Forschungen betrieben werden.

## 1.7

### Die Unsicherheit der Vorhersagen und der Handlungsbedarf

Bis die Vorhersagen soweit verbessert sind, daß man sie als verlässliche Basis für konkrete Maßnahmen verwenden kann, stehen Politiker und andere Entscheidungsträger vor der Notwendigkeit abzuwägen: zwischen wissenschaftlicher Unsicherheit und den Kosten möglicher Maßnahmen, die als Antwort auf die drohende Gefahr eines Klimawandels in Frage kommen. Einige Schritte, wie z. B. die Entwicklung von Energiesparprogrammen, lassen sich mit relativ geringen Kosten (oder sogar mit einer Nettokosteneinsparung) durchführen. Dazu gehören auch Pläne zur Reduzierung der Entwaldung und zur Wiederaufforstung. Andere Maßnahmen, wie etwa der grundlegende Umstieg auf regenerative Energiequellen (z. B. Biomasse, Wasser- und Windkraft sowie Sonnenenergie), werden sowohl in den Industrie- als auch in den Entwicklungsländern ihre Zeit brauchen. Aber auch hier kann ein Anfang gemacht werden. Es ist wichtig, jetzt bereits die notwendigen Pläne auszuarbeiten, um auf die einschneidenden Umstellungen, die mit großer Wahrscheinlichkeit durchzuführen sein werden, vorbereitet zu sein.

In den folgenden Kapiteln werde ich zunächst die wissenschaftlichen Aspekte der globalen Erwärmung erläutern, die Beweise dafür anführen und den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft in der Klimavorhersage darlegen. Anschließend werde ich darstellen, was wir über die wahrscheinlichen Auswirkungen des Klimawandels auf das menschliche Leben wissen – z. B. auf die Wasser- und Nahrungsmittelversorgung. Auf folgende Frage werde ich eingehen: Weshalb sollten wir uns um unsere Umwelt Sorgen machen? Welche Maßnahmen sollten angesichts wissenschaftlicher Unsicherheit in Angriff genommen werden? Darauf folgen Überlegungen zu den technischen Möglichkeiten der massiven Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und wie diese unsere Energiequellen und unseren Umgang mit Energie betreffen könnten, einschließlich der Belange des Transportsektors.

Zum Schluß möchte ich das Thema des „globalen Dorfes“ zur Sprache bringen. Soweit es die Umwelt betrifft, werden nationale Grenzen heute immer unbedeutender; die Umweltverschmutzung durch einen Staat kann sich mittlerweile auf die ganze Welt auswirken. Aus der Sicht unseres wissenschaftlichen Selbstverständnisses erscheint es klar, daß die Erwärmung der Erde eine globale Herausforderung darstellt, der auch globale Lösungen entgegengesetzt werden müssen.

### Anmerkungen

- <sup>1</sup> Aus World Climate News, Nr. 1, Juni 1992, World Meteorological Organization, Genf.
- <sup>2</sup> Nach Shah BV (1983) zitiert in World Meteorological Organization (1989) Natural disaster reduction: how meteorological services can help; WMO Nr. 722, Genf.
- <sup>3</sup> Aus Berz G, Conrad K (1993) Winds of change. The Review Juni 1993:32–35.
- <sup>4</sup> Aus WMO (1990) The role of the World Meteorological Organization in the international decade for natural disaster reduction, No. 745. World Meteorological Organization, Genf.
- <sup>5</sup> Verändert aus Canby TY (1984) El Niño's ill wind. Natio Geo Mag pp. 144–183.

## 2 Der Treibhauseffekt

**D**as grundlegende Prinzip der globalen Erwärmung erschließt sich uns durch die Betrachtung der von der Sonne abgestrahlten Energie, die die Erdoberfläche erwärmt, sowie der Wärmestrahlung, die die Erde und ihre Atmosphäre in das Weltall aussenden. Diese beiden Strahlungsflüsse müssen sich im Durchschnitt ausgleichen. Wird das Gleichgewicht gestört (z. B. durch einen Anstieg der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration), kann dies zu einer Temperaturerhöhung auf der Erdoberfläche führen.

### 2.1

#### Warum die Erde warm bleibt

Um die Prozesse, die die Erde und ihre Atmosphäre warm halten, zu erklären, werde ich zu Beginn ein stark vereinfachtes Modell unserer Erde verwenden. Nehmen wir an, wir könnten sämtliche Wolken aus der Atmosphäre entfernen, dann den Wasserdampf, das  $\text{CO}_2$  sowie alle anderen Spurengase und schließlich auch den Staub: Wir erhielten so eine Atmosphäre, die nur aus Stickstoff und Sauerstoff bestehen würde. Alles andere würden wir belassen, wie es ist. Was würde wohl unter diesen Bedingungen mit der Temperatur der Atmosphäre geschehen?

Mit Hilfe einer einfachen Strahlungsbilanz läßt sich diese Temperatur relativ einfach berechnen. Die Strahlungsenergie der Sonne, die auf eine außerhalb der Atmosphäre liegende Fläche von  $1 \text{ m}^2$  senkrecht einfällt, besitzt eine Leistung von etwa 1370 Watt (W) – das entspricht in etwa der Leistung, die eine normale Elektroheizung abstrahlt. Doch nur ein geringer Teil der Erdoberfläche ist direkt zur Sonne ausgerichtet: zumindest jeweils eine Hälfte der Erdoberfläche, nämlich die Nachtseite, ist von der Sonne abgewandt. So fällt im Schnitt auf  $1 \text{ m}^2$  Fläche außerhalb der Atmosphäre nur ein Viertel<sup>1</sup> des oben erwähnten Strahlungsflusses, also 343 W. Während diese Strahlung die Atmosphäre passiert, wird ein geringer Anteil von etwa 6% durch die atmosphärischen Moleküle ins All zurückgestrahlt. Weitere 10% werden von der Landoberfläche und den Ozeanen reflektiert. So bleiben durchschnittlich noch 84% bzw.  $288 \text{ W/m}^2$  übrig, die die Erdoberfläche erwärmen – die Leistung von drei starken Glühbirnen.

Um diese aufgenommene Energie auszugleichen, muß die Erde wiederum im Durchschnitt die gleiche Energiemenge in Form von Wärmestrahlung in den Weltraum abgeben (Abb. 2.1). Alle Körper emittieren Wärmestrahlung; ist ein Körper heiß genug, können wir dessen emittierte Strahlung sehen. Die Sonne mit einer Temperatur von ca.  $6000^\circ\text{C}$  erscheint weiß; ein elektrischer Heizstrahler mit vielleicht  $800^\circ\text{C}$  rot.

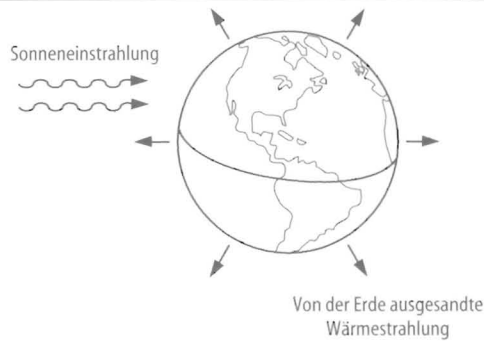


Abb. 2.1. Das Strahlungsgleichgewicht des Planeten Erde. Die eingehende Nettostrahlung der Sonne wird durch die emittierte Wärmestrahlung der Erde ausgeglichen

Kältere Körper emittieren eine Strahlung, die von unseren Augen nicht wahrgenommen werden kann und deren Wellenlängenspektrum jenseits des roten Endes des sichtbaren Lichtes liegt, nämlich im Infrarotbereich. In einer sternklaren Winter nacht können wir den auskühlenden Effekt der Verlustes dieser Strahlungsenergie, die von der Erdoberfläche in den Weltraum abgegeben wird, beobachten – es kommt dann oft zur Bildung von Nachtfrost.

Die Menge der von der Erdoberfläche abgegebenen Strahlung hängt direkt von deren Temperatur ab – je höher sie ist, desto mehr Strahlung wird abgegeben. Die emittierte Strahlungsmenge hängt auch davon ab, wie stark eine Oberfläche absorbiert; je größer die Absorption, desto größer die Abstrahlung. Der größte Teil der Oberfläche unseres Planeten, inklusive der Schnee- und Eisflächen, würde völlig schwarz erscheinen, wenn wir ihn im Infrarotbereich betrachten könnten. Das bedeutet, daß die meisten Flächen die auf sie einfallende Strahlung nahezu vollständig absorbieren. Die mittlere Temperatur der Erdoberfläche (bzw. der bodennahen Luftschicht), die nötig wäre, um die eingestrahlte Sonnenenergie durch die Abgabe von Wärmestrahlung auszugleichen, läßt sich berechnen.<sup>2</sup> Es ergibt sich eine Oberflächentemperatur von  $-6^{\circ}\text{C}$ .<sup>3</sup> Das bedeutet, es wäre wesentlich kälter, als es tatsächlich ist. In der Tat ergibt die Mittelung der weltweit gemessenen oberflächennahen Lufttemperaturen – über den Ozeanen wie über dem Land – eine Jahresdurchschnittstemperatur von etwa  $15^{\circ}\text{C}$ . Um diese Differenz zu erklären, müssen wir einige der Faktoren, die wir zu Beginn ausgeklammert haben, nun in die Rechnung einbeziehen.

## 2.2 Der Treibhauseffekt

Die Gase Stickstoff und Sauerstoff, die den Hauptanteil der Atmosphäre ausmachen (Tabelle 2.1 liefert Details der atmosphärischen Zusammensetzung), absorbieren und emittieren keine Wärmestrahlung. Hingegen absorbieren Wasserdampf,  $\text{CO}_2$  und einige andere Spurengase, die in der Atmosphäre in sehr viel geringeren Mengen enthalten sind (Tabelle 2.1), einen Teil der von der Erdoberfläche ausgesandten Wärmestrahlung und schränken damit die ungehinderte Abstrahlung ins All ein. Sie verursachen die Differenz von ungefähr  $21^{\circ}\text{C}$  zwischen der tatsächlichen durchschnittlichen oberflächennahen Temperatur der Erde von etwa  $15^{\circ}\text{C}$  und jenen  $-6^{\circ}\text{C}$ , die bei alleinigem

Tabelle 2.1. Die Zusammensetzung der Atmosphäre; die Hauptbestandteile ( $\text{N}_2$  und  $\text{O}_2$ ) und die Treibhausgase im Jahr 1993

| Gas  | Konzentration: Anteil in %* oder Teilen pro Million in Volumeneinheiten (ppmv) |
|--|--|
| Stickstoff ( $\text{N}_2$ )                  | 0,78*  |
| Sauerstoff ( $\text{O}_2$ )                  | 0,21*  |
| Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ )         | variabel (0–0,02)*   |
| Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )               | 356  |
| Methan ( $\text{CH}_4$ )                     | 1,8  |
| Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) | 0,3  |
| FCK und FCKW                                 | 0,001  |
| Ozon ( $\text{O}_3$ )                        | variabel (0–1000)  |

Vorkommen von Stickstoff und Sauerstoff theoretisch zu erwarten sind.<sup>4</sup> Diese Abschirmung wird als der *natürliche Treibhauseffekt*, die verantwortlichen Gase werden als *Treibhausgase* bezeichnet. Dieser Effekt wird als „natürlich“ angesehen, da die vorhandenen atmosphärischen Gase (außer den FCK und FCKW)\* schon lange vorhanden waren, bevor der Mensch die Bühne betrat. Später werde ich auf den *anthropogenen Treibhauseffekt* eingehen: den zusätzlichen Effekt, der durch jene Treibhausgase verursacht wird, die der Atmosphäre durch Aktivitäten des Menschen, wie die Verbrennung fossiler Energieträger oder Waldrodungen, zugeführt werden.

Man spricht vom „Treibhauseffekt“, da das Glas eines Treibhauses Eigenschaften aufweist, die jenen der Atmosphäre ähnlich sind (Abb. 2.2). Das sichtbare Licht der Sonne dringt nahezu ungehindert durch das Glas ins Innere des Treibhauses und wird von

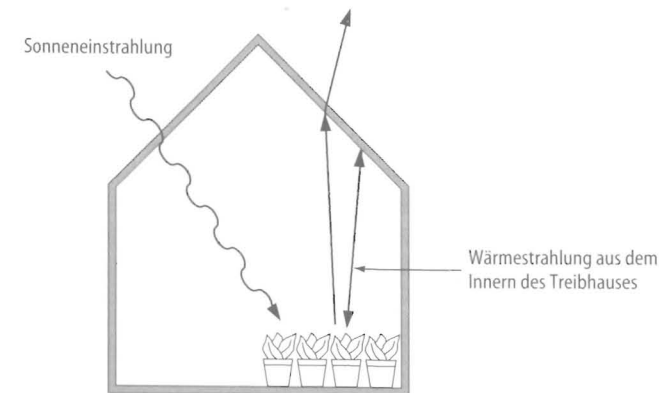


Abb. 2.2. Ein Treibhaus hat bezüglich der aufgenommenen Sonnenstrahlung und der emittierten Wärmestrahlung eine ähnliche Wirkung auf seine Innenluft wie Treibhausgase auf die Atmosphäre

\* [Die in Deutschland populäre unsystematische Sammelbezeichnung „FCKW“ schließt sowohl die vollständig substituierten, also keinen Wasserstoff mehr enthaltenden *Fluorchlorkohlenstoffe* (FCK, engl.: CFC) als auch die wasserstoffhaltigen *Fluorchlorkohlenwasserstoffe* (FCKW, engl.: HCFC) ein. Da sich diese Gruppen jedoch hinsichtlich ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften wie auch ihrer politischen Würdigung unterscheiden, werden in diesem Buch zur Unterscheidung dieser Gruppen die Abkürzungen „FCK“ und „FCKW“ verwendet (Anm. d. Übers.).]

den Pflanzen und der Erde absorbiert. Die von den Pflanzen und der Erde abgestrahlte Wärme wird jedoch teilweise vom Glas reflektiert. Das Glas wirkt folglich auf die Strahlung wie eine Decke, die dazu beiträgt, das Innere des Treibhauses warm zu halten.

Bevor ich fortfahre, halte ich es für notwendig, einige jener Forscher zu erwähnen, die die Erforschung des Treibhauseffektes begründeten.<sup>5</sup> Die Wärmewirkung der atmosphärischen Treibhausgase wurde zuerst im Jahr 1827 von dem französischen Wissenschaftler Jean-Baptiste Fourier, der vor allem wegen seiner Leistungen auf dem Gebiet der Mathematik bekannt ist, erkannt. Er war es auch, der auf die Ähnlichkeit zwischen den Vorgängen in der Atmosphäre und in einem Treibhaus hinwies, was dann zur Bezeichnung „Treibhauseffekt“ führte. Den nächsten Schritt machte ein britischer Wissenschaftler namens John Tyndall, der um 1860 die Absorption der Infrarotstrahlung durch CO<sub>2</sub> und Wasserdampf maß: Er vermutete, daß einer der Gründe für die Kaltzeiten ein verminderter Treibhauseffekt des CO<sub>2</sub> sein könnte. Schließlich war es ein schwedischer Chemiker, Svante Arrhenius, der 1896 die Wirkung einer gestiegenen Konzentration der Treibhausgase berechnete. Er schätzte, daß eine Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur von 5–6 °C verursachen würde – eine Schätzung, die gar nicht so weit von unserer heutigen Auffassung entfernt ist. Nahezu 50 Jahre später, etwa um 1940, war der in England arbeitende G.S. Callendar der erste, der die Erwärmung durch den infolge der Verbrennung fossiler Energieträger gestiegenen CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft berechnete.

Die erste Äußerung einer Besorgnis über einen möglichen Klimawandel durch erhöhte Treibhausgaskonzentrationen stammt aus dem Jahr 1957, als Roger Revelle und Hans Suess vom *Scripps Institute of Oceanography* in Kalifornien einen Artikel veröffentlichten, in dem sie darauf hinwiesen, daß die Menschheit mit der CO<sub>2</sub>-Anreicherung in der Atmosphäre gewissermaßen ein großmaßstäbliches geophysikalisches Experiment durchführt. Im gleichen Jahr begannen die regelmäßigen CO<sub>2</sub>-Messungen am Mauna Kea-Observatorium auf Hawaii. Der seitdem rapide anwachsende Verbrauch fossiler Brennstoffe führte zusammen mit dem gestiegenen Interesse an Umweltfragen dazu, daß das Thema der globalen Erwärmung im Lauf der 80er Jahre auf die politische Tagesordnung gesetzt wurde und damit wohl auch zur Unterzeichnung der Klimakonvention im Jahr 1992 beitrug – mehr dazu in den folgenden Kapiteln.

Doch nun zurück zur Erläuterung des Treibhauseffektes: Die Strahlung ist nicht der einzige Weg, über den Wärme innerhalb eines Treibhauses ausgetauscht wird. Wärme wird auch durch die im Inneren stattfindende Luftzirkulation transportiert. Einige der Luftbewegungen sind turbulenter Art und verteilen die Wärme. Eine andere Form der Wärmeübertragung findet statt, wenn weniger dichte, warme Luft aufsteigt und dichtere, kalte Luft absinkt – dieser Prozeß wird *Konvektion* genannt. Konvektive Elektroheizungen, die wir zu Hause benutzen, heizen einen Raum, indem sie in ihm die Konvektion anregen. Aufgrund konvektiver Vorgänge ist die Situation in einem Treibhaus viel komplizierter, da die Strahlung eben nicht der einzige Prozeß der Wärmeübertragung ist.

Die turbulente Durchmischung und die Konvektion finden, wenn auch in viel größerem Maßstab, auch in der Atmosphäre statt. Wenn wir den Treibhauseffekt einigermaßen verstehen wollen, müssen wir die Prozesse des konvektiven atmosphärischen Wärmetransports wie jene des Strahlungshaushaltes in unsere Berechnungen einbeziehen.

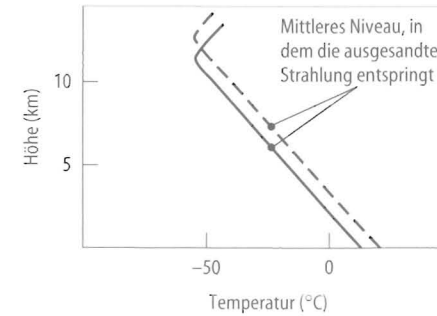


Abb. 2.3. Die Temperaturverteilung in einer konvektiven Atmosphäre (durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie zeigt, wie die Temperaturanstiege, würde die heute in der Atmosphäre vorhandene CO<sub>2</sub>-Menge erhöht (im Diagramm ist die Differenz zwischen den beiden Linien übertrieben dargestellt – z. B. beträgt der Temperaturanstieg für die doppelte CO<sub>2</sub>-Menge bei Abwesenheit anderer Effekte etwa 1,2 °C). Für beide Situationen werden auch die mittleren Niveaus gezeigt, aus denen die Wärmestrahlung entstrahlt, die die Atmosphäre verläßt (etwa 6 km Höhe, bei ungestörter Atmosphäre)

Innerhalb der Atmosphäre selbst (zumindest in jenem Bereich, von dem wir hier sprechen) ist der Prozeß der Konvektion tatsächlich der Hauptfaktor beim Wärmetransfer. Dabei erwärmt sich die Erdoberfläche durch die absorbierte Sonnenstrahlung. Die oberflächennahe Luft wird aufgeheizt und steigt aufgrund ihrer geringeren Dichte auf. Beim Aufstieg dehnt sich die Luft aus und kühlt dabei ab – ebenso, wie sich die Luft abkühlt, die dem Ventil eines Reifens entweicht. Für jedes aufgestiegene Luftpaket muß ein anderes absteigen, so daß die Luft ständig zirkuliert und sich die verschiedenen Luftbewegungen gegenseitig ausgleichen – ein Zustand konvektiven Gleichgewichtes. Die Temperatur der Atmosphäre fällt mit zunehmender Höhe mit einer Rate, die von diesen konvektiven Prozessen bestimmt wird; der Temperaturrückgang beträgt im Schnitt etwa 6 °C pro Höhenkilometer (Abb. 2.3).

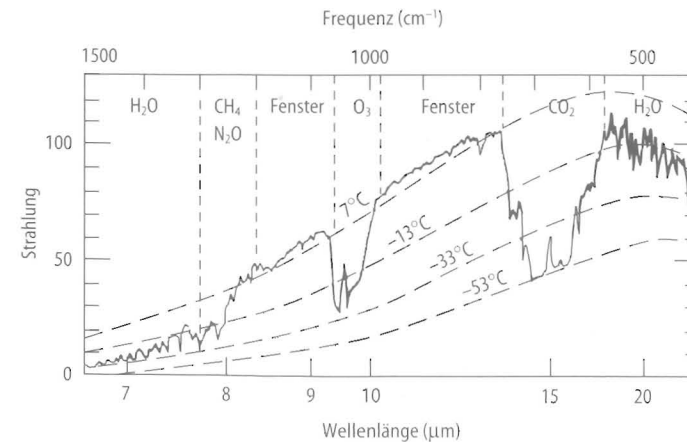


Abb. 2.4. Die Wärmestrahlung im Infrarotbereich (der sichtbare Teil des Spektrums liegt im Wellenlängenbereich zwischen 0,4 und 0,7 µm, abgestrahlt von der Erdoberfläche und der Atmosphäre, wie sie von einem Satellitensensor im Orbit außerhalb der Atmosphäre über dem Mittelmeer gemessen wurde. Gezeigt werden die Spektralbereiche, in denen verschiedene Gase einen Einfluß auf die Strahlung ausüben.<sup>6</sup> Zwischen den Wellenlängen von etwa 8 und 14 µm und außerhalb des Ozonbandes ist die Atmosphäre bei Fehlen einer Wolkenschicht nahezu völlig durchlässig; diese Spektralbereiche werden „atmosphärische Fenster“ genannt. Die Spektralkurve wird von den Strahlungskurven eines schwarzen Körpers bei 7 °C, -13 °C, -33 °C und -53 °C überlagert. Die Einheit der Strahlung ist Watt pro Quadratmeter pro Steradian und Wellenzahl

Wir können uns ein Bild vom Strahlungsumsatz in der Atmosphäre machen, wenn wir die von der Erdoberfläche und der Atmosphäre selbst abgegebene Wärmestrahlung betrachten, wie sie die Instrumente eines erdumkreisenden Satelliten registrieren (Abb. 2.4). In manchen Bereichen des Infrarotspektrums ist die Atmosphäre – bei Abwesenheit von Wolken – größtenteils so transparent wie im sichtbaren Teil des Spektrums. Könnten unsere Augen diese Wellenlängen wahrnehmen, wären wir in der Lage, die Sonne, die Sterne und den Mond über uns genauso wie im sichtbaren Spektrum durch die Atmosphäre hindurch zu betrachten. Im Bereich dieser Wellenlängen verläßt die gesamte von der Erdoberfläche abgegebene Strahlung die Atmosphäre und gelangt ins All.

Die terrestrische Strahlung anderer Wellenlängen wird jedoch von einigen atmosphärischen Gasen in hohem Maße absorbiert, speziell von Wasserdampf und  $\text{CO}_2$ .

Körper, die Strahlung gut absorbieren, emittieren sie auch gut. Eine schwarze Oberfläche ist sowohl ein guter Absorber als auch ein guter Emittier, während gut reflektierende Oberflächen entsprechend weniger absorbieren und emittieren. Dies ist der Grund dafür, daß z. B. die Wände einer Thermoskanne oder Dämmstoffe mit hochreflektierenden Schichten versehen werden.

Die absorbierenden Gase der Atmosphäre nehmen einen Teil der von der Erdoberfläche ausgehenden Strahlung auf und geben folglich auch Strahlung ins All ab. Die Menge der emittierten Strahlung hängt von ihrer jeweiligen Oberflächentemperatur ab.

Diese Strahlungsemission durch Gase entspringt typischerweise in 5–10 km Höhe nahe der Obergrenze der Atmosphäre (vgl. Abb. 2.3). In diesen Höhen ist aufgrund der erwähnten Konvektionsprozesse die Temperatur sehr viel niedriger (etwa um  $30\text{--}50^\circ\text{C}$ ) als an der Erdoberfläche. Da die Gase kalt sind, emittieren sie dementsprechend auch wenig Strahlung. Diese Gase absorbieren also zunächst einen Teil der Wärmestrahlung der Erdoberfläche und geben anschließend einen wesentlich geringeren Teil davon in den Weltraum ab. Der Nettoenergieverlust der Erdoberfläche und der Atmosphäre ist daher geringer, als er es ohne die absorbierenden Gase wäre. Diese wirken also wie eine Decke, die die von der Oberfläche ausgehende Strahlung zurückhält (man beachte, daß die äußere Seite der Decke kälter ist als die innere) und die Temperatur insgesamt erhöht (Abb. 2.5).

Auch hier besteht – wie in dem stark vereinfachten Modell, mit dem dieses Kapitel begann – die Notwendigkeit eines Gleichgewichtes zwischen der aufgenommenen und der die Obergrenze der Atmosphäre verlassenden Strahlung. Abbildung 2.6 zeigt die verschiedenen Strahlungskomponenten der die Grenze der Atmosphäre passierenden Ein- und Ausstrahlung. Von der solaren Strahlung werden durchschnittlich  $240\text{ W/m}^2$  von der Atmosphäre und der Erdoberfläche absorbiert; das ist ein niedrigerer Wert als

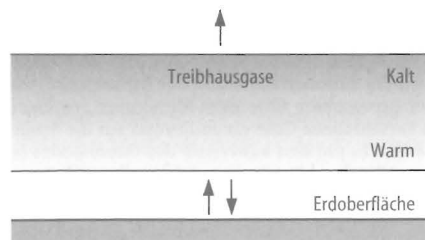


Abb. 2.5. Die abschirmende Wirkung von Treibhausgasen

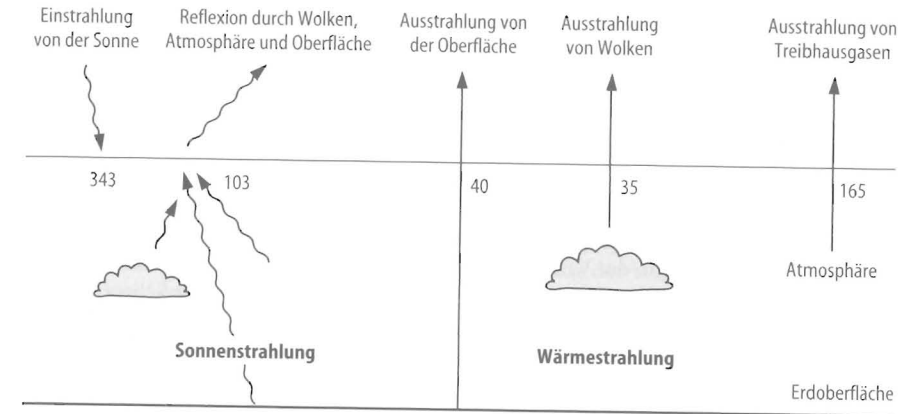


Abb. 2.6. Strahlungskomponenten (in  $\text{W/m}^2$ ), die durchschnittlich die Atmosphäre erreichen und verlassen und damit den Strahlungshaushalt der Atmosphäre bilden

die eingangs erwähnten  $288\text{ W/m}^2$ , da wir nun die Wirkung der Wolken berücksichtigen, die einen Teil der eintreffenden Sonnenstrahlung reflektieren. Doch auch die Wolken selbst absorbieren und emittieren Wärmestrahlung und haben eine den Treibhausgasen ähnliche abdeckende Eigenschaft. Die beiden Wolkeneffekte wirken gegeneinander: Der eine (die Reflexion der Sonnenstrahlung) kühlt die Erdoberfläche, der andere (die Absorption der Wärmestrahlung) hält sie warm. Sorgfältige Vergleiche dieser beiden Wirkungen kommen zu dem Ergebnis, daß die Nettowirkung der Wolken im Strahlungshaushalt zu einer geringfügigen Abkühlung der Erdoberfläche führt.<sup>7</sup>

Die Zahlenwerte in Abb. 2.6 veranschaulichen das geforderte Gleichgewicht –  $240\text{ W/m}^2$  werden durchschnittlich eingestrahlt, und  $240\text{ W/m}^2$  werden im Mittel auch ausgestrahlt. Die Temperatur der Erdoberfläche und folglich auch der darüberliegenden Atmosphäre stellt sich automatisch auf einen Wert ein, der die Ausgeglichenheit der Bilanz gewährleistet. Es ist wichtig festzuhalten, daß der Treibhauseffekt nur funktioniert, wenn die Temperaturen in der höheren Atmosphäre niedriger sind als in der tieferen. Ohne diesen Umstand, daß die Lufttemperatur mit der Höhe abnimmt, würde es auf der Erde keinen Treibhauseffekt geben.

## 2.3

### Mars und Venus

Ähnliche Treibhauseffekte treten auch auf unseren Nachbarplaneten Mars und Venus auf. Der Mars ist kleiner als die Erde und verfügt im Vergleich zu dieser über eine sehr dünne Atmosphäre. Ein Barometer, das sich auf der Marsoberfläche befände, würde einen atmosphärischen Druck von weniger als einem Prozent des Drucks auf der Erde anzeigen. Seine Atmosphäre besteht hauptsächlich aus  $\text{CO}_2$ , das, wie wir bereits gesehen haben, einen beträchtlichen Treibhauseffekt bewirkt. Da der Mars um die Hälfte weiter von der Sonne entfernt ist als die Erde, empfängt er von unserem Zentralgestirn



auch weniger Energie. Hätte er keine Atmosphäre, betrüge die Oberflächentemperatur, die notwendig wäre, um die einfallende Sonnenstrahlung auszugleichen,  $-57^{\circ}\text{C}$ . Tatsächlich liegt sie bei  $-47^{\circ}\text{C}$ ; der Treibhauseffekt der  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre bewirkt also einen Unterschied von etwa  $10^{\circ}\text{C}$ .

Die Venus, die man oft am Morgen- oder Abendhimmel in der Nähe der Sonne beobachten kann, besitzt eine Atmosphäre gänzlich anderer Zusammensetzung. Ein Barometer für den Einsatz auf der Venus müßte sehr widrigen Bedingungen standhalten können. Es müßte in der Lage sein, Drücke zu messen, die hundertmal höher sind als die auf der Erde. Innerhalb der Venusatmosphäre, die zu einem großen Teil aus  $\text{CO}_2$  besteht, bedecken tiefe Wolkenschichten, die aus Tröpfchen nahezu reiner Schwefelsäure bestehen, den ganzen Planeten und verhindern, daß das Sonnenlicht dessen Oberfläche erreicht. Einige russische Raumsonden, die dort gelandet sind, registrierten Bedingungen, die der Dämmerung auf der Erde entsprechen – nur 1–2% des über den Wolken eintreffenden Sonnenlichtes dringen so weit vor. Man müßte annehmen, daß aufgrund der geringen Strahlungsmenge, die die Oberfläche erreicht, diese eher kalt sei. Messungen der russischen Raumsonden haben aber im Gegenteil eine Temperatur von etwa  $525^{\circ}\text{C}$  ergeben – was tatsächlich einer schwachen Rotglut entspricht.

Der Grund für diese sehr hohe Temperatur ist wiederum der Treibhauseffekt. Aufgrund der sehr dichten, absorbierenden  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre gelangt nur sehr wenig Wärmestrahlung von der Planetenoberfläche ins All. Obwohl also nur geringe Mengen an Strahlung die Oberfläche erreichen, wirkt die Atmosphäre als derart effektive Strahlungsdecke, daß der Treibhauseffekt zu einer Erwärmung um fast  $500^{\circ}\text{C}$  führt.

## 2.4

### Der „ungebremste“ Treibhauseffekt

Was auf der Venus geschieht, ist ein Beispiel für den „ungebremsten“ Treibhauseffekt. Dieser kann durch die Betrachtung der frühen Geschichte der Venusatmosphäre erklärt werden, die sich bildete, als Gase aus dem Inneren des Planeten freigesetzt wurden. Zu Beginn enthielt sie viel Wasserdampf, ein starkes Treibhausgas (Abb. 2.7). Der Treibhauseffekt des Wasserdampfes bewirkte eine Erhöhung der Oberflächentemperatur. Die Temperaturerhöhung führte zu einer stärkeren Verdunstung von Wasser an der

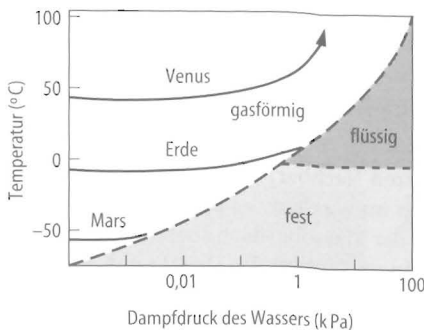


Abb. 2.7. Darstellung der Entwicklung der Atmosphären von Erde, Mars und Venus. Dieses Diagramm zeigt die Oberflächentemperaturen der drei Planeten gegen den Dampfdruck des Wassers, wie er sich innerhalb ihrer Atmosphären einstellte. Ebenfalls eingetragen sind (unterbrochene Linien) die Grenzen der drei Phasenzustände des Wassers, die das Diagramm in Flächen einteilen und an denen Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eis im Gleichgewicht miteinander stehen. Auf dem Mars und der Erde kommt der Treibhauseffekt zum Stillstand, wenn Wasserdampf mit Eis oder flüssigem Wasser im Gleichgewicht steht. Auf der Venus kommt es zu keinem Stillstand: Hier veranschaulicht das Diagramm den ungebremsten Treibhauseffekt auf diesem Planeten<sup>9</sup>

Oberfläche, zu mehr atmosphärischen Wasserdampf, einem noch stärkeren Treibhauseffekt und folglich zu einem weiteren Anstieg der Oberflächentemperatur. Dieser Prozeß dauerte so lange an, bis entweder die Atmosphäre wassergesättigt oder sämtliches verfügbare Wasser verdunstet war.

Ein solcher ungebremster Ablauf scheint auf der Venus stattgefunden zu haben. Warum, so werden wir uns fragen, ist das gleiche nicht auch auf der Erde, einem Planeten von vergleichbarer Größe und (soweit wir wissen) ähnlicher ursprünglicher chemischer Zusammensetzung, geschehen? Der Grund liegt darin, daß die Venus der Sonne näher steht als die Erde; die Sonnenenergie, die auf der Venus eintrifft, ist doppelt so hoch wie jene, die die Erde erreicht. Die Oberfläche der Venus würde ohne Atmosphäre zunächst eine Temperatur von  $50^{\circ}\text{C}$  aufweisen. Im Verlauf eines wie oben beschriebenen Prozesses würde das Wasser an der Oberfläche der Venus kontinuierlich gekocht haben. Aufgrund der hohen Temperatur konnte die Atmosphäre nie einen Zustand der Wasserdampfsättigung erreichen. Auf der Erde jedoch hat eine niedrige Anfangstemperatur geherrscht; auf jeder Stufe der Sequenz hat sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der Oberfläche und einer wasserdampfgesättigten Atmosphäre eingestellt. Die Bedingungen für einen solchen ungebremsten Treibhauseffekt sind also auf der Erde nicht gegeben.

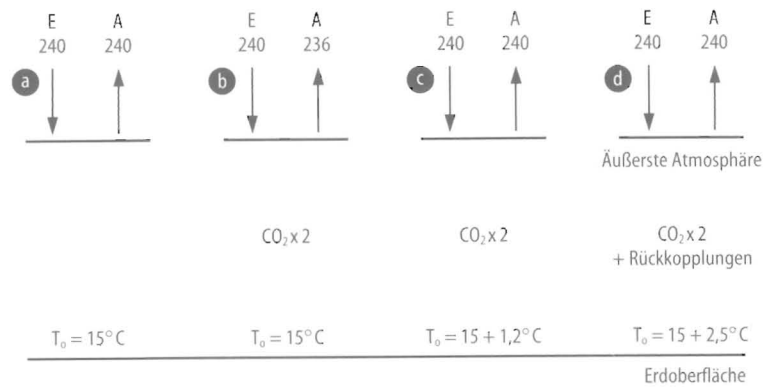
## 2.5

### Der anthropogene Treibhauseffekt

Kehren wir nach unserem Ausflug zum Mars und der Venus auf die Erde zurück! Für den natürlichen Treibhauseffekt sind die in der Atmosphäre in ihrer natürlichen Menge vorkommenden Gase Wasserdampf und  $\text{CO}_2$  verantwortlich. Die Menge des in der Atmosphäre enthaltenen Wasserdampfes hängt hauptsächlich von den Oberflächentemperaturen der Ozeane ab; der größte Teil entsteht durch Verdunstung an den Meeresoberflächen und wird nicht direkt durch die Aktivitäten des Menschen beeinflusst. Beim  $\text{CO}_2$  ist dies allerdings anders. Seine Konzentration hat sich seit der Industriellen Revolution merklich erhöht – bisher um etwa 25%. Verantwortlich ist zum einen die Industrie, zum anderen die zunehmende Vernichtung der Wälder (siehe Kap. 3). Zukunftsprognosen gehen davon aus, daß ohne Gegenmaßnahmen die Steigerungsrate noch zunehmen und die  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Atmosphäre sich gegenüber ihrem vorindustriellen Wert innerhalb der nächsten hundert Jahre verdoppeln wird (vgl. Abb. 3.6).

Diese zusätzliche  $\text{CO}_2$ -Menge führt aufgrund des dadurch vermehrten Treibhauseffektes zu einer weltweiten Erwärmung der Erdoberfläche. Stellen wir uns einmal vor, daß sich der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre plötzlich verdoppeln würde, alles andere aber beim alten bliebe (Abb. 2.8). Wie würden sich die Werte des oben vorgestellten Strahlungshaushaltes (vgl. Abb. 2.6) verändern? Die solare Einstrahlung wäre davon nicht betroffen. Die höhere  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Atmosphäre würde bewirken, daß die von ihr ausgesandte Strahlung im Durchschnitt einem höheren und kälteren Niveau als zuvor entspringt (vgl. Abb. 2.3). Der Anteil der Wärmestrahlung, der den Planeten verläßt, würde sich deshalb verringern, und zwar um etwa  $4\text{ W/m}^2$ .

Das würde eine Störung der Strahlungsbilanz in Höhe von  $4\text{ W/m}^2$  bedeuten. Dem System wird also mehr Energie zugeführt, als es selbst abgibt. Die Erdoberfläche und



**Abb. 2.8 a–d.** Darstellung des anthropogenen Treibhauseffektes. **a** Unter natürlichen Bedingungen wird die Nettosonneneinstrahlung ( $E = 240 \text{ W/m}^2$ ) durch die Wärmeausstrahlung ( $A$ ), die die Obergrenze der Atmosphäre verläßt, ausgeglichen; die mittlere Oberflächentemperatur ( $T_0$ ) beträgt  $15^{\circ}C$ . **b** Wird die  $CO_2$ -Konzentration plötzlich verdoppelt, reduziert sich  $A$  um  $4 \text{ W/m}^2$ . **c** Ändert sich nichts außer der Temperatur, stellt sich das Gleichgewicht bei einer um  $1,2^{\circ}C$  erhöhten Temperatur der Oberfläche und unteren Atmosphäre neu ein. **d** Unter Berücksichtigung der Rückkopplungen erhöht sich die mittlere Oberflächentemperatur um  $2,5^{\circ}C$ .

die Atmosphäre würden sich solange erwärmen, bis durch die damit ebenfalls erhöhte Wärmestrahlung das Gleichgewicht wiederhergestellt wäre. Die Temperaturverschiebung betrüge etwa  $1,2^{\circ}C$ , wenn sich lediglich die Temperatur änderte – mit anderen Worten, wenn Wolken, Wasserdampf, Schnee- und Eisbedeckung usw. unverändert blieben.

In der Realität sind selbstverständlich gerade viele dieser Faktoren Veränderungen unterworfen, einige davon in einer Art und Weise, die die Erwärmung noch verstärkt (man spricht dann von *positiver Rückkopplung*). Die realen Verhältnisse sind deshalb sehr viel komplizierter als in unserem einfachen Modell. Diese komplexen Faktoren werden wir in Kap. 8 genauer betrachten. Hier genügt die Feststellung, daß nach den gegenwärtig zuverlässigsten Schätzungen die Temperaturerhöhung der Erdoberfläche im Fall einer Verdoppelung der  $CO_2$ -Konzentration etwa das Zweifache des Werts aus unserem einfachen Modell betragen wird:  $2,5^{\circ}C$ . Wie im letzten Kapitel erläutert wurde, stellt dies für die globale Mitteltemperatur eine große Veränderung dar. Diese globale Erwärmung, die man wegen des anthropogenen Treibhauseffektes erwartet, bereitet uns derzeit viele Sorgen.

Nachdem wir uns bisher damit beschäftigt haben, was bei einer Verdoppelung der  $CO_2$ -Konzentration geschehen würde, wäre es interessant zu wissen, was denn geschähe, wenn man das  $CO_2$  vollständig aus der Atmosphäre entfernte. Des öfteren wurde der Standpunkt vertreten, daß sich dann die ins Weltall emittierte Wärmestrahlung um  $4 \text{ W/m}^2$  erhöhen und die Erde um  $1\text{--}2^{\circ}C$  abkühlen würde. Tatsächlich geschieht das aber bereits bei einer Halbierung der  $CO_2$ -Menge. Wenn man das  $CO_2$  gänzlich entfernte, würde die Veränderung im Strahlungshaushalt das Sechsfache (also  $25 \text{ W/m}^2$ ) betragen und folglich eine entsprechend hohe Temperaturverschiebung bewirken. Das ist darin begründet, daß mit den gegenwärtig in der Atmosphäre vorhandenen  $CO_2$ -Mengen bereits über weite Spektralbereiche eine Maximalabsorption (vgl. Abb. 2.4) gegeben ist. Das bedeutet, daß eine relativ starke Konzentrationserhöhung nur zu ei-

ner relativ geringen Veränderung der absorbierten Strahlungsmenge führt.<sup>9</sup> Dieser Effekt läßt sich an einem Wassertümpel veranschaulichen. Ist er klar und sauber, reicht eine geringe Menge aufgewühlten Schlammes, um das Wasser zu trüben. Ist dieses jedoch erst einmal trübe, bewirkt eine zusätzliche Schlammfracht keine wesentliche Veränderung mehr.

Die Frage liegt nahe, ob sich anhand der gegenwärtig vorliegenden Klimaaufzeichnungen schon Beweise für einen anthropogenen Treibhauseffekt ableiten lassen. Kapitel 4 wird sich mit den Temperatureaufzeichnungen ungefähr der letzten 100 Jahre, während derer sich die Erde um ca.  $0,5^{\circ}C$  erwärmt hat, befassen. Doch aufgrund der natürlichen Klimavariabilität läßt sich dieser Anstieg nicht eindeutig als Folge des anthropogenen Treibhauseffektes identifizieren. Wenn wir uns nicht sicher sind, ihn erkannt zu haben, wie können wir uns dann sicher sein, daß dieser Effekt überhaupt existiert?

Die Argumentation läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- Niemand zweifelt an der Realität des natürlichen Treibhauseffektes, der die Oberflächentemperatur, die ohne diesen Effekt bei etwa  $-6^{\circ}C$  läge, um etwa  $21^{\circ}C$  erhöht.
- Erhebliche Treibhauseffekte treten auf unseren nächsten Nachbarplaneten, Mars und Venus, auf. Unter den auf diesen Planeten existierenden Bedingungen lassen sich deren Treibhauseffekte berechnen. Die berechneten Werte stimmen mit den bisher verfügbaren Messungen recht gut überein.
- Das Studium vergangener Klimate gibt uns einige Anhaltspunkte für den Treibhauseffekt, die in Kap. 4 angeführt werden.

Zuerst jedoch müssen wir uns den Treibhausgasen selbst widmen. Wie gelangt  $CO_2$  in die Atmosphäre und welche anderen Gase wirken sich auf die globale Erwärmung aus?

## Anmerkungen

- <sup>1</sup> Es ist deshalb ein Viertel, weil die Erdoberfläche viermal so groß ist wie die Fläche der Kreisebene, die die Projektion der Erde in Richtung Sonne ergibt – vgl. Abb. 2.1.
- <sup>2</sup> Die Strahlung eines schwarzen Körpers ergibt sich aus der Stefan Boltzmann-Konstante ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1}$ ), multipliziert mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur des Körpers in Grad Kelvin. Die absolute Temperatur ist die Temperatur in Grad Celsius plus  $273,15$  (ein Grad Kelvin entspricht einem Grad Celsius).
- <sup>3</sup> Diese Berechnungen verwenden ein einfaches Modell einer Atmosphäre, die nur aus Stickstoff und Sauerstoff besteht, und das nur verwendet wird, um die Wirkung der anderen Gase, speziell des Wasserdampfes und des  $CO_2$ , zu veranschaulichen. Es handelt sich hierbei selbstverständlich um kein Modell, das in der Realität Bestand hätte. Es kann nicht sämtlicher Wasserdampf aus einer Atmosphäre über einer Wasser- oder Eisfläche entfernt werden. Außerdem wäre die Erde unter realen Bedingungen bei einer mittleren Oberflächentemperatur von  $-6^{\circ}C$  mit einer viel größeren Eisfläche bedeckt. Diese würde mehr Sonnenenergie ins All reflektieren, was zu seiner weiteren Abkühlung führen würde.
- <sup>4</sup> Die obige Kalkulation wird oft unter Verwendung eines Wertes von  $30\%$  für die mittlere Reflektivität der Erde und der Atmosphäre statt der hier verwendeten  $16\%$  durchgeführt; die Berechnung der Oberflächentemperatur ergibt dann einen mittleren Wert von  $-18^{\circ}C$  statt der hier ermittelten  $-6^{\circ}C$ . Der höhere Wert von  $30\%$  für die mittlere Reflektivität der Erde ist zutreffend, wenn die Wolken in die Berechnung einbezogen werden, wobei die mittlere Temperatur von  $-18^{\circ}C$  nicht auf die Erdoberfläche, aber auf einige bestimmte Höhenniveaus der Atmosphäre zuträfe. Des weiteren reflektieren Wolken nicht nur Sonnenstrahlung, sie absorbieren auch Wärmestrahlung und haben dabei eine den Treibhausgasen ähnliche Wirkung. Um die Wirkung der Treibhausgase zu veranschauli-

chen, ist es außerdem sinnvoller, die Wirkung der Wolken anfangs aus der Berechnung auszuschließen.

<sup>5</sup> Weitere Details können Gribbin J (1990) Hothouse earth. Bantam Press, entnommen werden.

<sup>6</sup> Das Spektrum wurde mit dem Infrarotinterferometer des Satelliten Nimbus 4 im Jahr 1971 aufgenommen und von Hanel RA et al. (1971) Appl Opt 10:1376–1382 beschrieben.

<sup>7</sup> Weitere Details der Strahlungswirkung von Wolken werden in Kap. 5 gegeben – siehe Abb. 5.14 und 5.15.

<sup>8</sup> Aus Houghton JT (1986) The physics of atmospheres, 2nd ed. CUP.

<sup>9</sup> Die Abhängigkeit der Absorption von der Konzentration des Gases ist näherungsweise logarithmisch.

## 3 Die Treibhausgase

**A**ls Treibhausgase werden jene atmosphärischen Gase bezeichnet, die die Erdoberfläche durch die Absorption der von ihr ausgehenden Wärmestrahlung einhüllen und erwärmen. Wichtigstes Treibhausgas ist der Wasserdampf, dessen Anteil in der Atmosphäre sich jedoch nicht direkt aufgrund menschlicher Aktivitäten verändert. Die entscheidenden Treibhausgase, die unmittelbar durch menschliche Aktivitäten beeinflusst werden, sind  $\text{CO}_2$ , Methan ( $\text{CH}_4$ ), Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Fluorchlorkohlenstoffe (FCK, bekannt unter dem Sammelbegriff FCKW) und Ozon ( $\text{O}_3$ ). In diesem Kapitel wird dargestellt, was wir über die Herkunft dieser Gase wissen, wie sich ihre Konzentration in der Atmosphäre verändert und wie deren Emissionen eingeschränkt werden können.

### 3.1

#### Welches sind die wichtigsten Treibhausgase?

Abbildung 2.4 stellte die Bereiche des Infrarotspektrums dar, in denen die Treibhausgase absorbieren. Ihre Wirksamkeit als Treibhausgase hängt sowohl von ihrer atmosphärischen Konzentration (Tabelle 2.1) als auch von der Stärke ab, mit der sie die Infrarotstrahlung absorbieren. Diese beiden Werte weichen für verschiedene Gase stark voneinander ab.

$\text{CO}_2$  ist das bedeutendste jener Treibhausgase, deren atmosphärische Konzentration aufgrund menschlicher Aktivitäten zunimmt. Wenn wir die Auswirkungen der FCK

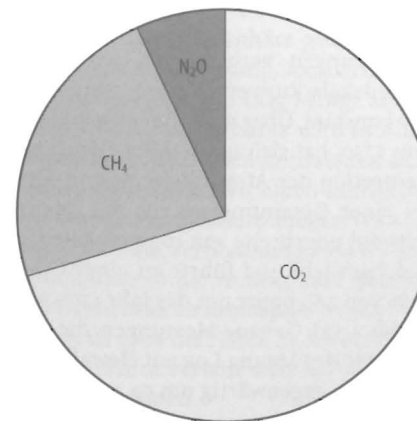


Abb. 3.1. Die Anteile der wichtigsten Treibhausgase an der Zunahme des Treibhauseffektes seit Beginn der Industriellen Revolution bis 1990