

## **Erster Bericht**

**der Enquete-Kommission**  
**„Schutz der Erdatmosphäre“**

**zum Thema**  
**Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung**  
**Zukunft sichern – Jetzt handeln**

**gemäß Beschluß des Deutschen Bundestages vom 25. April 1991**  
**– Drucksache 12/419 –**

## Zusammensetzung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“

### Mitglieder

Dr. Klaus W. Lippold (Offenbach), MdB (CDU/CSU)  
Vorsitzender

Dr. Liesel Hartenstein, MdB (SPD)  
Stellvertretende Vorsitzende

Herbert Frankenhauser, MdB (CDU/CSU)  
Klaus Harries, MdB (CDU/CSU)  
Dr. Peter Paziorek, MdB (CDU/CSU)  
Trudi Schmidt (Spiesen), MdB (CDU/CSU)  
Bärbel Sothmann, MdB (CDU/CSU)  
Brigitte Adler, MdB (SPD)  
Prof. Monika Ganseforth, MdB (SPD)  
Horst Kubatschka, MdB (SPD)  
Dr. Klaus Kübler, MdB (SPD)  
Martin Grüner, MdB, Parl. Staatssekretär a.D. (F.D.P.)  
Marita Sehn, MdB (F.D.P.)  
Dr. Klaus Dieter Feige, MdB (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN)

Prof. Dr. Wilfrid Bach  
Prof. Dr. Dr. Rudolf Dolzer  
Dr. Ing. Alfred-Herwig Fischer  
Prof. Dr. Hartmut Graßl  
Prof. Dr. Klaus Heinloth  
Prof. Dr. Peter Hennicke  
Prof. Dr. Hans-Jürgen Jäger  
Prof. Dr. Eckart Kutter  
Prof. Dr. Klaus Michael Meyer-Abich, Senator a.D.  
Prof. Dr. Hans Michaelis, Generaldirektor a.D.  
Prof. Dr. Wolfgang Seiler  
Prof. Dr. Alfred Voss  
Prof. Dr. Ing. Carl-Jochen Winter

### Sekretariat

Roland Jacob (Leiter)

Michael Bisek  
Klaus Hanfland  
Harald Kesberg  
Dr. Kora Kristof  
Dr. Christiane Paulus  
Dr. Martin Rieland  
Ralf Schmidt  
Manfred Treber  
Wilhelm Bauer  
Elke Greif

## Vorwort

Eine Chance für die Zukunft

Ein halbes Jahr nach ihrer Konstituierung legt die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ mit ihrem ersten Bericht eine umfassende, wissenschaftlich fundierte Studie über Treibhauseffekt, Zerstörung der Ozonschicht und die drohende Klimakatastrophe vor, die den letzten Stand der Forschung repräsentiert. Die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ setzt mit dem vorliegenden Bericht die international anerkannte Arbeit ihrer Vorgängerin fort.

Die vorliegende Bestandsaufnahme gibt Zeugnis von der Dringlichkeit geeigneter Maßnahmen zur Eindämmung der sich abzeichnenden Klimaänderung. Neuere, in dem vorliegenden Bericht dokumentierte wissenschaftliche Erkenntnisse bestätigen anfängliche Verdachtsmomente: Der Planet Erde erwärmt sich mit zunehmender Geschwindigkeit. Die ersten Anzeichen der Klimaänderung sind bereits meßbar und offensichtlich. Es gibt daher keinen Grund mehr, dringend erforderliche Maßnahmen aufzuschieben.

Über eine eingehende aktuelle Bestandsaufnahme hinaus enthält der erste Bericht der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ daher schwerpunktmäßig Maßnahmeempfehlungen zur Reduktion energiebedingter Spurengase auf nationaler und internationaler Ebene. Darüber hinaus entwirft die Enquete-Kommission im Rahmen des Berichts ein Konzept zur internationalen Lösung des Spannungsverhältnisses von Umwelt und Entwicklung und legt eine Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre vor.

Auf internationaler Ebene bedeuten die Vorschläge der Enquete-Kommission – Reduktion der Kohlendioxidemissionen um 20 bis 25 Prozent auf EG-Ebene, um 30 Prozent in allen wirtschaftsstarken Industrieländern und um 20 Prozent im Durchschnitt der Industrieländer jeweils bis zum Jahr 2005 – einschneidende Eingriffe in die nationalen und internationalen Energiepolitiken. Hier gilt es, die übrigen betroffenen Länder von der Notwendigkeit derart weitreichender Zielvorgaben zu überzeugen und möglichst schnell zu entsprechenden internationalen Vereinbarungen zu gelangen, um eine international abgestimmte, gleichgerichtete Vorgehensweise in die Wege zu leiten. Die Zeitvorgaben für derart weitreichende und tiefgreifende internationale Vereinbarungen sind sehr kurz. Das gilt insbesondere im Hinblick auf die „UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung“ in Rio de Janeiro. Die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ schlägt daher Handlungsempfehlungen vor, die geeignet scheinen, um im Rahmen dieser Konferenz zumindest einen Einstieg in eine internationale Klimaschutzpolitik zu finden.

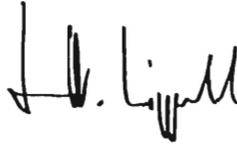
Ich hoffe, daß sich die Bundesregierung die Empfehlungen der Kommission zu eigen macht, auf nationaler Ebene entsprechende Maßnahmen einleitet und auf internationaler Ebene die Vorschläge der Kommission aufgreift und vertritt.

Nur wenn sich die Menschen in aller Welt der Gefahr bewußt sind, haben wir eine Chance, die globale Bedrohung noch abzuwenden. Der vorliegende Bericht will einen Beitrag zu dieser großen Aufgabe leisten. Gleichzeitig ist er vor dem Hintergrund der „UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung“ in Rio de Janeiro ein eindringlicher Appell. Ein Appell an die politisch Verantwortlichen und an die Weltöffentlichkeit, neue Wege der internationalen Zusammenarbeit und zur Neugestaltung des Nord-Süd Verhältnisses zu finden und zu gehen. Nur wenn das Spannungsfeld von Umwelt und Entwicklung zur Zufriedenheit aller und im Einklang mit der Natur gelöst wird, hat die Menschheit eine lebenswerte Zukunft.

Mein herzlicher Dank gilt der Präsidentin des Deutschen Bundestages für die wohlwollende Unterstützung, die sie der Kommission gewährt hat. Mein Dank gilt allen Kommissionsmitgliedern für die intensive Kooperation. Meinen besonderen,

persönlichen Dank und den der Kommission möchte ich dem Sekretariat für seinen beispiellosen und vorbildlichen Einsatz sowie die ausgezeichnete und vertrauensvolle Zusammenarbeit aussprechen.

Bonn, den 31. März 1992

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'K. W. Lippold', with a stylized flourish at the end.

Dr. Klaus W. Lippold, MdB  
Vorsitzender der Enquete-Kommission  
„Schutz der Erdatmosphäre“

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Zusammensetzung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“</b>	2
<b>Vorwort</b> .....	3
<b>Neue Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen</b> .....	9
<b>1 Grundlagen und Ziele einer globalen Politik zum Schutz der Erdatmosphäre</b> .....	13
<b>2 Darstellung des aktuellen Kenntnisstandes</b> .....	19
Zusammenfassung .....	19
2.1 Beobachtete Änderungen von Klimaparametern .....	20
2.2 Klima und Treibhauseffekt .....	22
2.2.1 Klimarelevante atmosphärische Spurengase .....	24
2.2.1.1 Wasserdampf .....	24
2.2.1.2 Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid und FCKW .....	25
2.2.1.3 Ozon (O <sub>3</sub> ) .....	28
2.2.1.4 Indirekt klimawirksame Spurengase .....	31
2.2.1.5 Treibhauspotentiale .....	33
2.2.2 Weitere Einflußfaktoren auf das Klima .....	33
2.2.2.1 Aerosolteilchen .....	33
2.2.2.2 Wolken .....	34
2.2.2.3 Oberflächenalbedo .....	35
2.2.2.4 Solare Einstrahlung .....	35
2.3 Ursachen und Verursacher .....	35
2.3.1 Energie einschließlich Verkehr .....	35
2.3.1.1 Energie: Globale Situation .....	35
2.3.1.2 Energie: Nationale Situation .....	40
2.3.1.3 Verkehr .....	43
2.3.2 Waldvernichtung .....	45
2.3.3 Landwirtschaft .....	48
2.3.3.1 Direkt wirksame klimarelevante Gase .....	48
2.3.3.2 Indirekt wirksame Spurengase .....	51

	Seite
2.3.4 Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Halone und chemisch verwandte Ersatzstoffe .....	52
2.3.4.1 Allgemeines .....	52
2.3.4.2 Produktion und Verbrauch .....	52
<b>3 Darstellung des zukünftigen Gefährdungspotentials .....</b>	<b>56</b>
Zusammenfassung .....	56
3.1 Stratosphärischer Ozonabbau .....	56
3.1.1 Gegenwärtige Situation und zukünftige Entwicklung .....	56
3.1.2 Auswirkungen .....	59
3.2 Globale Klimaänderung .....	60
3.3 Anstieg des Meeresspiegels .....	64
3.4 Auswirkungen auf die natürlichen Ökosysteme .....	67
3.4.1 Terrestrische Ökosysteme .....	67
3.4.1.1 Nettoprimärproduktion und Speicherung von Kohlenstoff in der Biosphäre .....	67
3.4.1.2 Verschiebung der Vegetationszonen und der Artenzusammensetzung .....	69
3.4.1.3 Sozioökonomische Folgen .....	70
3.4.2 Marine Ökosysteme .....	70
3.4.2.1 Gefährdungspotential .....	70
3.4.2.2 Sozioökonomische Folgen .....	71
3.5 Auswirkungen auf die Forstwirtschaft .....	71
3.6 Auswirkungen auf die Landwirtschaft .....	73
3.6.1 Direkte physiologische Auswirkungen von CO <sub>2</sub> , erhöhter UV-B-Strahlung und Luftschadstoffen auf Pflanzen, Böden und Tiere ....	74
3.6.2 Folgen veränderter Klimaparameter (Temperatur, Niederschläge, Wolkenbildung u. a.) .....	75
3.6.3 Sozioökonomische Folgen .....	76
<b>4 Bewertung des Forschungsstandes .....</b>	<b>78</b>
Zusammenfassung .....	78
4.1 Fakten und offene Fragen in der Klimadiskussion .....	78
4.1.1 Klimapotential anthropogen eingebrachter Spurengase .....	78
4.1.2 Wirkung interner Klimaparameter und mögliche Rückkopplungsmechanismen .....	79
4.1.3 Sensitivitätsabschätzung verschiedener Einflußfaktoren im Klimasystem .....	80
4.1.4 Globale Klimaentwicklung .....	81
4.1.5 Regionale Klimaänderungen und Auswirkungen .....	81

	Seite
4.2	Forschungsbedarf . . . . . 82
4.2.1	Beobachtung („Monitoring“) und Modellierung . . . . . 83
4.2.2	Überblick über die internationalen Forschungsaktivitäten . . . . . 83
4.3	Fazit . . . . . 84
4.4	Interdisziplinäre Forschung . . . . . 85
<b>5</b>	<b>Klimapolitik . . . . . 86</b>
5.1	Internationale Vereinbarungen und Umsetzungsstrategien . . . . . 86
5.1.1	Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht . . . . . 86
5.1.2	Das Montrealer Protokoll über ozonschichtschädigende Stoffe . . . . . 86
5.1.3	Verschärfung des Montrealer Protokolls . . . . . 86
5.1.4	Genfer Luftreinhaltkonvention . . . . . 88
5.1.5	Europäische Energiecharta . . . . . 88
5.1.6	Weitergehende Vereinbarungen . . . . . 88
5.1.6.1	Klimakonvention . . . . . 89
5.1.6.2	Waldkonvention . . . . . 89
5.2	Europäische Gemeinschaft . . . . . 89
5.2.1	Entwicklung der EG-Umweltpolitik . . . . . 89
5.2.2	EG-Maßnahmen zum Klimaschutz – neuere Entwicklungen . . . . . 89
5.2.2.1	CO <sub>2</sub> und andere Treibhausgase . . . . . 89
5.2.2.2	Ozonschichtschädigende Gase . . . . . 91
5.2.3	EG-Haltung zur UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung . . . . . 91
5.3	Bundesrepublik Deutschland . . . . . 91
5.3.1	Energie . . . . . 91
5.3.2	Verkehr . . . . . 93
5.3.3	Land- und Forstwirtschaft . . . . . 94
5.3.4	Ozonschichtschädigende Gase . . . . . 94
<b>6</b>	<b>Handlungsempfehlungen für die internationale Gemeinschaft . . . . . 96</b>
6.1	Bestätigung der grundlegenden Zielsetzungen der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ . . . . . 96
6.2	Empfehlungen zu Mindestanforderungen im Hinblick auf die „UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung“ . . . . . 96
6.3	Weitere Empfehlungen . . . . . 99
<b>Anhang 1</b>	
	Instrumente einer Reduktion der Emissionen von CO <sub>2</sub> . . . . . 100
<b>Anhang 2</b>	
	Beispiele für internationale wissenschaftlich-technische Kooperation . . . . . 102

	Seite
<b>Glossar</b> .....	104
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	111
<b>Einheiten und chemische Formeln</b> .....	113
<b>Verzeichnis der Kommissionsdrucksachen</b> .....	116
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	123

## Neue Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen

Der aktuelle wissenschaftliche Kenntnisstand über die anthropogene Einflußnahme auf den Treibhauseffekt, die damit verbundene Änderung des globalen Klimas und deren mögliche Auswirkungen sowie über den stratosphärischen Ozonabbau läßt sich wie folgt zusammenfassen:

### 1. Erste Anzeichen der Klimaveränderung sind erkennbar

Beobachtungen innerhalb der letzten 30 bis 50 Jahre weisen eindeutig auf eine beginnende Umstellung des globalen Klimas hin. Diese äußert sich in folgenden, sich gegenseitig bestätigenden Beobachtungen:

- Zunahme der Oberflächentemperatur der tropischen Ozeane um 0,5 Grad Celsius
- Zunahme des Wasserdampfgehaltes in der Troposphäre der Tropen
- vermehrt freiwerdende gebundene Wärme in den mittleren Schichten der tropischen Troposphäre
- Verstärkung des Temperaturgefälles zwischen Äquator und den polaren Breiten
- Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit
- Vertiefung der quasi stationären Tiefdruckgebiete über dem Nordatlantik und Nordpazifik

Die globale Mitteltemperatur liegt heute um etwa 0,7 Grad Celsius über dem Wert von 1860. Innerhalb desselben Zeitraumes hat die Masse der Inlandgletscher in den Alpen um etwa 50 Prozent abgenommen.

### 2. Der wissenschaftliche Sachstand über den anthropogenen Treibhauseffekt hat sich in den letzten Jahren gefestigt

Der wissenschaftliche Sachstand über den anthropogenen Treibhauseffekt hat sich in den letzten Jahren gefestigt. Der vom Menschen verursachte Anstieg der Konzentrationen der langlebigen Treibhausgase Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid und der Fluorchlorkohlenwasserstoffe setzt sich weiter fort. Das wichtigste anthropogene Treibhausgas ist das Kohlendioxid. Es weist ein mittleres Mischungsverhältnis in der Troposphäre von 355 ppmv auf, welches damit höher ist als zu irgendeinem Zeitpunkt in den vergangenen 160 000 Jahren. Das Kohlendioxid ist mit 50 % am anthropogenen Treibhauseffekt beteiligt. Die weiteren prozentualen Anteile sind: Methan 13 %, troposphärisches Ozon 7 %, Distickstoffoxid 5 %, alle FCKW 22 % sowie stratosphärischer Wasserdampf mit 3 %.

Der Anstieg der atmosphärischen Konzentrationen anthropogener Treibhausgase wird in seiner Klimawirksamkeit in den kommenden 100 bis 200 Jahren alle anderen Einflußfaktoren, wie z. B. Vulkanausbrüche oder Änderung der Einstrahlungsstärke der Sonne, übertreffen. Die wesentlichen internen Rückkopplungsmechanismen im Klimasystem, bis auf einige offene Fragen bei der Einschätzung des Beitrags der Bewölkung, sind verstanden.

Mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit wird die Verdopplung der äquivalenten CO<sub>2</sub>-Konzentration schon in der ersten Hälfte des kommenden Jahrhunderts erreicht. Damit wird sich der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur weiter beschleunigen (auf 0,3 °C pro Jahrzehnt) und die Veränderung der räumlich und zeitlichen Niederschlagsverteilungen verstärken.

### 3. Die wichtigsten Ursachen sind die Emissionen im Energiebereich sowie durch Landwirtschaft und Waldrodung

Immer noch werden die meisten klimarelevanten Spurengase im Energiebereich (inklusive Verkehr) freigesetzt. Sie allein tragen etwa die Hälfte zur globalen Erwärmung bei. Durch die politischen Veränderungen in Osteuropa und in der ehemaligen Sowjetunion hat sich gerade im Energiebereich eine grundlegend neue Situation ergeben. Dies schlägt sich einerseits darin nieder, daß in diesen Ländern die Energienachfrage infolge der Umstrukturierung der ehemaligen Zentralverwaltungswirtschaften deutlich zurückgeht. Andererseits ergibt sich durch das Ende des Ost-West-Konflikts die Möglichkeit zur verstärkten Kooperation zwischen den Ländern West- und Osteuropas, was die Chance für deutliche Steigerungen der Effizienz der Energienutzung und damit zu einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bietet. Im Hinblick auf diese Entwicklung erscheint eine Revision der Prognosen zur mittelfristigen Entwicklung des Weltenergiebedarfs notwendig. Dabei ist auch zu bedenken, daß sich der Anteil des Verkehrssektors am Energieverbrauch durch die verstärkte Ost-West-Kooperation und die Schaffung des europäischen Binnenmarktes erhöhen wird.

Die durch die Vernichtung der tropischen Wälder freigesetzten Spurengase tragen etwa 15 % zum Treibhauseffekt bei. Von noch größerer Bedeutung sind die Auswirkungen auf das regionale Klima. Die Abholzungsrate in den tropischen Wäldern hat sich im vergangenen Jahrzehnt um 50 % auf jährlich 170 000 km<sup>2</sup> erhöht. Inzwischen ist zudem zu befürchten, daß auch in den borealen Wäldern großflächige Abholzungen stattfinden.

Die Landwirtschaft trägt weltweit mit 15 % zur Emission von treibhauswirksamen Spurengasen bei. Als

bedeutende Emissionsgruppen sind  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  zu nennen.  $\text{CO}_2$  wird hauptsächlich bei der Biomasseverbrennung, der Umwandlung von Wäldern in landwirtschaftlich genutzte Flächen sowie bei sekundären Bränden zum Erhalt der Flächen freigesetzt. Landwirtschaftliche Quellen für Methan sind der Naßreisenanbau, die (Massen-)Tierhaltung und die Biomasseverbrennung. Eine weitere Quelle sind Mülldeponien.  $\text{N}_2\text{O}$  ist nicht nur treibhauswirksam, sondern trägt auch zur Zerstörung der Ozonschicht bei.  $\text{N}_2\text{O}$  entsteht durch Abbau von Stickstoffverbindungen im Boden, zu den Emissionen trägt daher die Stickstoffdüngung erheblich bei. Da sich die Klimaänderung direkt auf die Landwirtschaft auswirken wird, ist eine Umorientierung zu umweltfreundlicher, „emissionsarmer“ Bewirtschaftungsweise notwendig.

#### **4. Der durch den Menschen verursachte Abbau des stratosphärischen Ozons ist weitaus stärker als dies noch vor wenigen Jahren angenommen worden ist**

Der durch den Menschen verursachte Abbau des stratosphärischen Ozons ist weitaus stärker als dies noch vor wenigen Jahren angenommen worden ist. Der Ozonabbau ist am stärksten während der Winter- und Frühjahrsmonate mit etwa 6 % pro Jahrzehnt. Dies entspricht einer Verstärkung des Trends um weitere 2 % pro Jahrzehnt gegenüber vorangehenden Analysen und ist auf die verstärkte Ozonabnahme im Verlaufe der 80iger Jahre zurückzuführen. Das antarktische Ozonloch 1991 war hinsichtlich der Tiefe und Ausdehnung vergleichbar mit den Ozonlöchern der Jahre 1987, 1989 und 1990.

Im Winter 1991/92 wurden über weiten Bereichen der Nordhemisphäre ungewöhnlich niedrige Ozon-Gesamt mengen gemessen, wobei in Europa die Werte in den Monaten Dezember, Januar und Februar um bis zu 10 % unter dem langjährigen Mittel lagen.

Nach heutiger Erkenntnis sind alle chemisch bedingten Ozonverluste auf den Gehalt der Stratosphäre an Chlor- und Bromverbindungen zurückzuführen. Der Anstieg der Konzentrationen dieser beiden Elemente in der Stratosphäre wird weit überwiegend durch anthropogene Emissionen verursacht.

Es wird erwartet, daß sich die beobachteten Ozone-trends in den kommenden Jahrzehnten weiter verstärken werden. Ein sofortiger Ausstieg aus der Produktion der FCKW ist unbedingt erforderlich.

#### **5. Erste Untersuchungen über mögliche Auswirkungen machen das mit dieser globalen Klimaveränderung verbundene Gefährdungspotential deutlich**

Bei der Abschätzung der regionalen Gefährdungspotentiale wurden wesentliche Fortschritte erzielt. Es ist zu befürchten, daß die Länder des Südens von der Veränderung des Klimas stärker betroffen sein werden als die Industrieländer.

Die unmittelbarste Bedrohung geht von der bereits festzustellenden Häufung klimabedingter Katastrophen, wie z. B. tropischen Wirbelstürmen, aus. Auch vermehrt auftretende Dürren im Wechsel mit Starkniederschlägen werden in Zukunft weit häufiger auftreten und vor allem die semiariden Gebiete gefährden.

Der zu erwartende Anstieg des Meeresspiegels um 70 bis 100 cm im kommenden Jahrhundert wird zu einer Verstärkung von Flutkatastrophen und zur permanenten Überflutung von fruchtbaren und z. T. dichtbesiedelten Küstenebenen führen. Besonders gefährdet sind die Delta- und Ästuarmündungen großer Flüsse. Darüber hinaus werden einige pazifische Inselstaaten erhebliche Flächenverluste zu beklagen haben und drohen, zum Teil unbewohnbar zu werden.

Die Anpassungsfähigkeit der Wälder und der natürlichen Ökosysteme wird sowohl durch das Ausmaß als auch durch die Schnelligkeit der Klimaveränderungen überschritten werden. Es droht ein großflächiger Zusammenbruch der Ökosysteme mit drastischen ökologischen und sozioökonomischen Folgen.

Insbesondere die landwirtschaftliche Produktion wird durch die Klimaverschiebungen gefährdet. Vor allem in den kontinentalen Klimaten ist mit einer Austrocknung der Böden und den daraus resultierenden Degradationserscheinungen (z. B. Versalzung, Erosion) zu rechnen. Eine Häufung von klimatischen Extremereignissen sowie die stärkere Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten und -schädlingen im wärmeren Klima wird sich negativ auf die Erträge auswirken. Der mit einem erhöhten  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre einhergehende Düngereffekt wird sich dagegen kaum auf das Pflanzenwachstum auswirken. Angesichts einer rapide anwachsenden Bevölkerung sind drastische Auswirkungen auf die weltweite Ernährungssituation zu befürchten.

Eine zusätzliche Gefährdung des Klimas kann durch die Beschleunigung des mikrobiellen Abbaus der abgestorbenen organischen Substanz in einem wärmeren Klima ausgehen. Die dadurch hervorgerufene zusätzliche Freisetzung von Kohlendioxid in die Atmosphäre könnte ein Ausmaß annehmen, das mit dem aus der Verbrennung fossiler Energieträger vergleichbar ist und zu einer dramatischen Verstärkung des Treibhauseffektes führen kann.

#### **6. Zeit zu handeln**

Durch die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse hat sich der Handlungsdruck auch für die internationale Gemeinschaft weiter erhöht. Im Hinblick auf die „UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung“ und nach der Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ im Januar 1992 zum Stand der internationalen politischen Willensbildung kann nicht damit gerechnet werden, daß die grundlegenden Zielsetzungen (vgl. Kap. 6.2) kurzfristig in vollem Umfang konsensfähig sind.

Vor diesem Hintergrund hat die Kommission die folgenden Empfehlungen erarbeitet; sie sieht diese Leitsätze ausdrücklich als Mindestanforderungen an

das Ergebnis der Verhandlungen in den kommenden Monaten an.

1. Das Wissen von den durch menschliche Aktivitäten verursachten Klimaänderungen hat einen so hohen Grad an Gewißheit erreicht, daß politische Maßnahmen zur Vorsorge nicht mehr aufgrund von Wissenslücken unterlassen werden dürfen. Wo Regierungen nachhaltige Verminderungen der Emissionen klimarelevanter Substanzen hinauschieben, ist dies nicht aufgrund von Wissenslücken zu rechtfertigen. Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert

- die drohenden Klimaänderungen so weit wie möglich abzuwenden,
- Folgen der bereits nicht mehr abwendbaren Klimaänderungen solidarisch zu tragen.

2. Unbestritten ist, daß es hinsichtlich der absehbaren Klimaänderungen noch weiteren Forschungsbedarf gibt. Während das jetzige Wissen bereits weitgehende Verminderungen der Emissionen rechtfertigt, kann zusätzliches Wissen in Zukunft entsprechendes Handeln erfordern. Die noch bestehenden Wissenslücken betreffen vor allem:

- die Genauigkeit der Klimaprognosen
- die unterschiedlichen regionalen Klimaänderungen und ihre Auswirkungen
- die ökonomischen und weiterreichenden gesellschaftlichen Folgen der Klimaänderung für die verschiedenen Länder, besonders für die Ernährungslage;
- die Folgen für die übrige Biosphäre

Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert, die bestehenden Wissenslücken zu schließen und daraus zusätzliche Konsequenzen zu ziehen.

3. Die absehbaren Klimaänderungen werden bisher weit überwiegend von den Industrieländern verursacht. Mit Blick auf die Folgen für das Klima ist die bisherige Wirtschaftsweise nicht verallgemeinerungsfähig; ihre Nachahmung durch die Entwicklungsländer würde die Risiken ökologischer Katastrophen erhöhen. Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert, klimaverträgliche Wirtschaftsformen zu finden und zu verwirklichen, in denen kein Land mehr zu Lasten anderer Länder, zu Lasten der Nachwelt und zu Lasten der natürlichen Mitwelt wirtschaftet. Ein erster Schritt in dieser Richtung sollte die Anerkennung des Verursacherprinzips (gemeinsame, aber differenzierte Verantwortung) auf internationaler Ebene sein.

4. Unter der absehbaren Klimaänderung werden vor allem die Länder der Dritten Welt zu leiden haben. Ist die Klimapolitik zunächst überwiegend eine Aufgabe der Industrieländer als Hauptverursacher, so darf doch auch die künftige Entwicklung der noch nicht industrialisierten Länder die Klimakrise nicht verschärfen. Über die bisherige Entwicklungszusammenarbeit hinaus wird die Erhaltung der klimatischen Lebensbedingungen deshalb zu einem entscheidenden Faktor aller künftigen Entwicklungspolitik. Armut darf nicht um der Erhal-

tung des Klimas willen verewigt werden, es bedarf einer neuen Strategie, die Klimavorsorge und Überwindung der Armut miteinander verbindet. Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert, unter dem neuen Gesichtspunkt der Klimaverträglichkeit auch neue Wege einer für alle Staaten erträglichen Entwicklung von Industrieländern und Entwicklungsländern zu gehen; diese Politik muß das gemeinsame Überleben sichern und allen Staaten die Chance für eine dauerhafte Entwicklung gewährleisten.

5. Mit der „UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung“ muß der Prozeß dieser Neuorientierung der ökologischen und ökonomischen globalen Entwicklung eingeleitet werden. Die Gegensätze zwischen Industrieländern und Entwicklungsländern sind so groß, daß nur kleine Schritte zu erwarten sind, solange die Industrieländer sich mit den Gütern der Erde überproportional versorgen. Im letztlich doch gemeinsamen Interesse aber sollten in Rio de Janeiro mindestens die folgenden Schritte unternommen werden, um den Prozeß in Richtung auf eine effektive internationale Klimapolitik mit Nachdruck weiterzuführen.

(a) Die internationale Gemeinschaft sollte sich verständigen, unmittelbar nach der Konferenz in Protokollverhandlungen über konkrete Reduktionen der Emission klimarelevanter Substanzen einzutreten.

(b) Das Protokoll, zu dem diese Verhandlungen führen, sollte auf der Basis der bereits jetzt vorhandenen wissenschaftlichen Erkenntnisse beschlossen werden.

(c) Das Protokoll sollte mit dem Fortgang der Klimaänderung und der wissenschaftlichen Erkenntnisse in einer vorab festgelegten Zeitfolge überprüft werden.

(d) Alle den Staaten zugänglichen klimarelevanten naturwissenschaftlichen Forschungsergebnisse sollten unverzüglich aufgearbeitet werden und international verfügbar sein.

6. Die Klimakonferenz von Toronto (1988) hat das Globalziel gesetzt, die Emissionen der klimarelevanten Substanzen bis zum Jahr 2005 weltweit um 20 % und bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts weltweit um 50 % zu reduzieren. Diese Forderung ist nach gegenwärtigem Wissen noch verstärkt gerechtfertigt. Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert, das in Toronto formulierte Ziel unabhängig von der Zuordnung von Reduktionsraten einzelner Länder generell zu bestätigen.

7. Schon in Rio de Janeiro sollten konkrete Absprachen getroffen werden, die den unmittelbaren politischen Willen aller Staaten zum Ausdruck bringen, Maßnahmen zum Schutz des Klimas ernst zu nehmen. Gemäß dem Verursacherprinzip sind in erster Linie die Industriestaaten aufgerufen, konkrete Schritte für eine globale effektive Klimapolitik einzuleiten. Die Entwicklungsländer werden außerstande sein, den von ihnen zu leistenden Beitrag ohne Unterstützung der Industrieländer zu leisten; sie bedürfen deshalb der Unterstützung im technologischen und im finanziellen Bereich.

In Rio de Janeiro müssen Vereinbarungen getroffen werden, welche die erforderlichen neuen Wege der Kooperation und des Ausgleichs der Interessen zwischen den Industriestaaten und den Entwicklungsländern aufzeigen und die Grundlage für ein gemeinsames Handeln bilden. Daher sollte es in Rio de Janeiro wegen der Dringlichkeit des Problems nicht bei allgemein und unverständlich gehaltenen Erklärungen bleiben. Vielmehr sollen Abreden getroffen werden, welche die künftig notwendige institutionelle, finanzielle und technologische Kooperation zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern bereits auf den Weg bringen und damit die späteren Verhandlungen für eine Klimakonvention erleichtern und fordern.

- Institutionell wird die internationale Gemeinschaft zu diesem Zwecke aufgefordert, die Global Environment Facility (GEF) nicht mehr nur als Pilotkonzept, sondern als dauernde Einrichtung zu akzeptieren. Die Entscheidungsstruktur des GEF muß so verändert werden, daß sie für alle Staaten einschließlich der Entwicklungsländer akzeptabel wird und somit inhaltlich und vom Verfahren her Wege für eine neuartige Umweltpartnerschaft aufzeigt; die Erfahrungen mit dem Multilateral Fund des Protokolls von Montreal müssen dabei als Vorbild dienen.
- Finanziell werden die Industriestaaten aufgefordert, ihren Beitrag zur GEF bis zum Inkrafttreten einer Klimakonvention deutlich zu erhöhen und mindestens zu verdreifachen. Dabei sollen keine Umschichtungen vorgenommen werden. Die Bundesregierung wird aufgefordert, ihre Bereitschaft zu einem solchen Vorgehen gemeinsam mit allen Industriestaaten zu erklären.

Flankierend zur GEF wird die Einrichtung eines begrenzten sog. „Grünen Fonds“ (Klimafonds) angeregt, aus dessen Mitteln alle diejenigen Umweltprojekte finanziert werden sollen, die nach den bisherigen Vereinbarungen nicht vom GEF bzw. vom Multilateral Fund des Montrealer Protokolls abgedeckt sind.

- Um den Prozeß der technologischen Kooperation zwischen Nord und Süd schon in Rio de Janeiro einzuleiten und zu fordern, bedarf es auch auf diesem Felde schon erster Absprachen. Diese Vereinbarungen sollten folgenden Inhalt haben:
  - (a) Aus den Mitteln des GEF sollten auf Antrag der Entwicklungsländer Studien gefördert werden, welche den möglichen künftigen

Beitrag einzelner Staaten und Regionen im Süden für eine globale Klimapolitik aufzeigen und eingrenzen. Diese Studien sollten in sorgfältiger Weise vom jeweiligen Staat, vom GEF und von externen Gutachtern gemeinsam erstellt werden. Wesentlich ist, daß dabei nicht nur die vorhandenen und erforderlichen technologischen Kapazitäten, sondern im menschlichen Bereich auch Ausbildung, Know how und Management angesprochen werden.

- (b) Gleichzeitig sollen vom GEF Inventarlisten über Technologien auf dem neuesten Stand erstellt werden, welche einen möglichst kostengünstigen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgase in den einzelnen Staaten und Regionen leisten können.
- (c) Auf der Grundlage der zu erstellenden Länderstudie und der Inventarlisten sollten die im GEF vertretenen Staaten entscheiden, welche Technologien in den einzelnen Staaten und Regionen gefördert werden; dabei sollen die Erwägungen über das Verhältnis von Kosten und Nutzen im Vordergrund stehen.

Mögliche Instrumente zur nationalen wie internationalen Umsetzung, die noch geprüft werden müssen wie z. B. Steuern, Abgaben, Selbstverpflichtungen, Kooperations- und Kompensationsinstrumente (Joint Implementation) sollten insofern berücksichtigt werden, als sie die Ziele der Konvention fördern; die Regeln des GATT und der Weltbank sollten – falls notwendig – diesem Regime angepaßt werden.

8. Das gemeinsame Ziel der Verhinderung globaler katastrophaler Klimaveränderungen kann nur erreicht werden, wenn einzelne Länder von sich aus demonstrieren, daß und wie es erreichbar ist. Die Bundesrepublik Deutschland ist die Selbstverpflichtung eingegangen, die Emission von CO<sub>2</sub> bis zum Jahr 2005 um mindestens 25 % (relativ zum Stand von 1987) zu reduzieren. Andere Länder gehen denselben Weg. Die internationale Gemeinschaft sollte alle Länder, die dazu wirtschaftlich, technisch und politisch imstande sind, auffordern, nicht auf den Abschluß einer Klimakonvention und deren Durchführungsprotokolle zu warten, sondern sofort mit der Vorbereitung und Durchführung effektiver nationaler und regionaler Maßnahmen zum Schutz des Klimas zu beginnen.

# 1 Grundlagen und Ziele einer globalen Politik zum Schutz der Erdatmosphäre

## Das Klima ist bedroht – eine globale Herausforderung für die Menschheit

Wir stehen vor einer Klimaänderung, die in den letzten Jahrtausenden ihresgleichen sucht. Treibhauseffekt und Zerstörung der schützenden Ozonschicht haben bedrohliche Ausmaße angenommen. Sie stellen die Menschheit vor eine Herausforderung von bislang nicht gekannter Dimension.

Im Gegensatz zu früheren Umweltgefahren handelt es sich nun um eine weltweite Bedrohung, deren lokale und regionale Auswirkungen derzeit noch kaum abgeschätzt werden können. Die Konzentration von Treibhausgasen, vor allem Kohlendioxid, aber auch FCKW, Methan, Distickstoffoxid und ozonbildenden Substanzen steigt in der Atmosphäre an. Sie erwärmen die Erdatmosphäre mit zunehmender Geschwindigkeit. Alterprobte Lösungsstrategien, so der Einsatz von Reparaturtechniken zur Behebung lokaler Umweltprobleme, müssen angesichts dieses Problems versagen. Es müssen daher vollkommen neue Wege gesucht und beschritten werden, d. h. Abschied nehmen vom Althergebrachten. Aus Gründen der Vorsorge ist es unbedingt erforderlich, schnellstmöglich weitreichende Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre zu ergreifen. Gefordert sind Politik, Wissenschaft, Wirtschaft aber auch jeder einzelne Mensch.

Die drohende Klimaänderung zeigt, daß das ressourcenverschwendende Wirtschaften der Industrienationen des Nordens an Grenzen gelangt ist. Nur ein Umdenken und eine Hinwendung zur ökologisch und sozial orientierten Marktwirtschaft kann der drohenden Katastrophe noch Einhalt gebieten. Zahlreiche Probleme der Welt, die schon lange zur Lösung anstanden und nicht gelöst wurden, vor allem Bevölkerungsexplosion, Armut, Hunger, Unterentwicklung und die Energieproblematik, stehen in einer untrennbaren Wechselwirkung mit der drohenden Klimakatastrophe. Es ist keine Zeit mehr zu verlieren. Einige Probleme haben bereits einen Umfang erreicht, der kaum noch erfolgreiche Lösungen zuläßt. Soll der Planet Erde auch nachfolgenden Generationen erhalten bleiben, müssen hehren Worten nun Taten folgen. Die „UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung“ in Rio de Janeiro könnte in dieser Hinsicht einen Meilenstein setzen.

Wird das Bewußtsein für die drohende Katastrophe und die Bereitschaft, einschneidende Maßnahmen zu tragen in Nord und Süd, in Industrie und Landwirtschaft, bei Bürgern und Politikern nicht geschärft, besteht wenig Hoffnung, eine gangbare Lösung zu finden. Erst wenn alle erkennen, daß sie gemeinsam von den gleichen unmittelbaren Gefahren – wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß – bedroht werden, besteht Hoffnung auf Besserung. Erst dann kann ein umfassender politischer Wille entstehen und damit Kooperationen, die für das Überleben aller notwendig sind. Die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmo-

sphäre“ möchte mit diesem Bericht einen Beitrag zu der politischen Willensbildung leisten.

## Klimaveränderungen und Auswirkungen

### – Die anthropogene Erwärmung der Erde

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse lassen keinen anderen Schluß mehr zu: Anthropogene Emissionen verursachen die zunehmende Erwärmung der Erdatmosphäre. Wissenschaftler warnen bereits seit zwei Jahrzehnten eindringlich vor den katastrophalen Folgen der Temperaturerhöhung. Inzwischen ist diese Sorge wissenschaftlich bestätigt. Ursprünglich ist der Treibhauseffekt ein natürliches Phänomen und ermöglicht das Leben auf unserem Planeten. Die in der Atmosphäre von Natur aus vorhandenen Gase Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon, Distickstoffoxid und Methan heben die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche von  $-18^{\circ}\text{C}$  auf erträgliche  $15^{\circ}\text{C}$  an. Doch seit Beginn der Industrialisierung ist durch menschliche Eingriffe die ursprüngliche Konzentration der Gase stark angestiegen. Insbesondere die Konzentration der Spurengase, vor allem von Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid hat seit der industriellen Revolution auf der Erde deutlich zugenommen. Verantwortlich dafür ist in erster Linie die Verbrennung großer Mengen fossiler Brennstoffe im Energie- und Verkehrssektor, die Vernichtung der Wälder und die Intensivierung der Landwirtschaft. Mit Beginn der 30er Jahre dieses Jahrhunderts hat die Emission treibhausrelevanter Spurengase eine neue Qualität erhalten. Treibhausgase, wie FCKW und Halone, waren bis zum Datum ihrer erstmaligen technischen Produktion nicht in der Umwelt anzutreffen. Ihre zerstörende Wirkung auf die Ozonschicht der Stratosphäre und die Erwärmung der unteren Erdatmosphäre ist ein besonders hohes, ebenfalls ausschließlich von Menschen verursachtes Gefahrenpotential.

Klimatologen machen die Freisetzung dieser Treibhausgase für die Zunahme der mittleren Temperatur um  $0,5^{\circ}\text{C}$  in den letzten 100 Jahren verantwortlich. Die Folgen dieser Temperaturerhöhung sind bereits heute zu spüren. So hat sich die Oberflächentemperatur der tropischen Meere seit 1950 signifikant erhöht und den Wasserdampfgehalt in der Luft um 10 bis 20 % ansteigen lassen. Zudem haben sich die Temperaturunterschiede zwischen den Tropen und den höheren Breiten verstärkt. Als Folge dieser Veränderungen hat sich die Windgeschwindigkeit um etwa 5 bis 10 %, die Windenergie um 10 bis 20 % erhöht. Dies führte insbesondere in den Tropen zu einer Häufung von Stürmen, mit zum Teil katastrophalen Folgen.

Es ist zu befürchten, daß sich bislang nur die Emissionen auswirken, die bereits vor 30 bis 40 Jahren freigesetzt wurden. Ohne daß der Mensch darauf noch

Einfluß nehmen könnte, werden die heutigen treibhausrelevanten Emissionen also in den kommenden Jahrzehnten zu einer Verstärkung der Klimaveränderungen und ihrer negativen Folgen führen.

Derzeit steigt die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre – maßgeblich für rund 50 % des zusätzlichen Treibhauseffektes – weiterhin mit einer alarmierenden Geschwindigkeit an. Zu keiner Zeit während der zurückliegenden 160 000 Jahre war der Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre so hoch wie heute. Wenn keine einschneidenden Gegenmaßnahmen ergriffen werden, ist bis zum Jahr 2030 mit einem Anstieg der äquivalenten Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre auf 550 ppm zu rechnen. Dieser Wert läge damit doppelt so hoch wie in der vorindustriellen Zeit. Szenarien zeichnen inzwischen ein düsteres Bild der zu erwartenden Auswirkungen. Als Folge einer Politik des Abwartens wird sich die Temperatur der Erdatmosphäre bis zum Jahre 2100 um rund 2–5 °C erhöhen. Dieser dramatische Temperaturanstieg ist sowohl hinsichtlich seines Ausmaßes als auch seiner Geschwindigkeit ohne Beispiel in der Vergangenheit und wird extreme sozioökonomische und ökologische Auswirkungen haben, deren Ausmaß noch nicht abzusehen ist:

#### – Anstieg des Meeresspiegels

Die bisherige Erwärmung der Erde hat in den letzten 100 Jahren zu einem Anstieg des Meeresspiegels um etwa 10 bis 20 cm geführt. Bei anhaltendem Trend ist bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts aufgrund der Wärmeausdehnung des Meerwassers und des Abschmelzens der Festlandgletscher mit einem Anstieg um 70 bis 100 cm zu rechnen. Durch diesen Anstieg werden viele küstennahe Gebiete und Inseln unter den Wassermassen verschwinden, Millionen von Menschen aus ihrer Heimat vertrieben, Küstenstädte und fruchtbares Land überflutet und küstennahe Grundwasserspeicher versalzen. Als besonders gefährdet gelten die tiefliegenden Gebiete von Ägypten, Bangladesch, Thailand, China, Brasilien, Indonesien oder Argentinien. Zahlreiche Inselgruppen wie z. B. die Malediven oder die Delta-Gebiete des Nil, Ganges oder Amazonas werden gleichfalls von einem Meeresspiegelanstieg bedroht.

#### – Veränderung der Niederschlagsmengen

Die Zunahme der Temperatur führt zu einer Veränderung der Windzirkulation und wirkt sich damit auch auf die globale Niederschlagsverteilung aus. Insgesamt nimmt die Niederschlagsmenge aufgrund höherer Temperatur und höherer Verdunstungsraten zu, allerdings werden starke regionale Veränderungen der Niederschlagshäufigkeit und -intensität eintreten. Dies wird erhebliche Auswirkungen auf die Vegetation sowie die land- und forstwirtschaftliche Produktion haben, die noch verstärkt werden durch die Austrocknung der Böden als Folge der höheren Verdunstung.

#### – Natürliche Ökosysteme

Besonders betroffen von der Temperaturzunahme und der Veränderung von Niederschlag und Verdun-

stung sind die natürliche Ökosysteme. Als Folge der Klimaveränderung werden sich die globalen Vegetationszonen polwärts verschieben. Dabei führt bereits eine Erwärmung um 1 °C zu einer Verschiebung um etwa 200 km. Bei der vorhergesagten Erwärmung von 0,3 °C pro Jahrzehnt werden die meisten Ökosysteme jedoch nicht in der Lage sein, sich an die veränderten Bedingungen anzupassen und drohen, zusammenzubrechen. In vielen Regionen wird dieser Effekt noch dadurch verstärkt, daß die Ausweichräume für natürliche Ökosysteme durch den hohen Anteil genutzter Flächen extrem eingeschränkt werden.

#### – Landwirtschaft

Für die Landwirtschaft könnten daher Probleme von bislang nicht gekannter Größenordnung entstehen. Bedingt durch die steigende Erderwärmung wird es zu einer Verschiebung der Anbauzonen kommen. Das Pflanzenwachstum wird durch Niederschlagsumverteilung, durch eine Erhöhung der UV-B-Strahlung und die veränderte chemische Zusammensetzung der Atmosphäre gefährdet. Die schon heute in vielen Teilen der Welt problematische Versorgung mit Nahrungsmitteln wird sich künftig noch schwieriger gestalten. Gefährdet sind insbesondere die Länder des Südens, deren Volkswirtschaften in hohem Maße von der Agrarproduktion abhängig sind. Dazu zählen u. a. Brasilien, Peru, die Sahelzone, Südostasien und die asiatischen Regionen der GUS und China. Hier fehlt es bereits heute an geeignetem Land, Kapital, technischem Know-how und angemessenen Erzeugerpreisen.

#### Zerstörung der Ozonschicht

Die Freisetzung der FCKW führt neben einer Verstärkung des Treibhauseffektes zur Zerstörung der Ozonschicht. Darüber hinaus ist die durch FCKW und andere aggressive chemische Substanzen angegriffene Ozonschicht nicht mehr ausreichend in der Lage, die für Lebewesen gefährliche UV-B-Strahlung abuschirmen.

Eine erhöhte UV-B-Strahlung wird erhebliche Konsequenzen für Menschen, Tiere, Landpflanzen und die Lebensgemeinschaften in den Ozeanen haben. Eine dramatische Zunahme der Hautkrebserkrankungen und vermehrt auftretende Augenschädigungen sind nur einige der prognostizierten Auswirkungen, die die Menschen betreffen werden. So ist von einer deutlichen Erhöhung des Risikos, an Hautkrebs und Augenleiden zu erkranken, auszugehen. Im Lauf der kommenden Jahrzehnte ist zu erwarten, daß die Flora und Fauna durch erhöhte UV-B-Strahlung geschädigt wird. Zudem kann die Schädigung des marinen Planktons dramatische Konsequenzen für die Nahrungskette in den Weltmeeren bewirken. Eine erhöhte UV-B-Strahlung wird demnach die Kohlenstoffspeicherung in der terrestrischen Biomasse und vor allem den Meeren verringern und somit zu einer zusätzlichen Verstärkung des Treibhauseffektes führen.

## Gefahr und Chance

Nach bisherigen Erkenntnissen werden vor allem die ärmeren Länder der tropischen und subtropischen Zonen betroffen sein, wenn nicht ausreichende Maßnahmen ergriffen werden. Die Folgen sind Hunger, Elend und endlose Ströme von Umweltflüchtlingen. Die Betroffenen werden die Solidarität derer brauchen, die verschont worden sind. Sie werden auch zu einer Bedrohung des Weltfriedens. Nach der friedlichen Beilegung des Ost-West Konfliktes drohen künftig massive Nord-Süd-Auseinandersetzungen als Folge der Klimakatastrophe. Die Abwanderung aus bedrohten, überschwemmten oder ausgetrockneten Gebieten und die Neuansiedlung an anderer Stelle, könnte sich letztendlich als die bedrohlichste Folge einer Klimaänderung erweisen. Auch in den Industrieländern kann es zu erheblichen Auswirkungen und sozialen Verwerfungen kommen.

Die Umweltprobleme, die der anthropogene Treibhauseffekt verursacht, werden durch die Zerstörung der Ozonschicht, die Schädigung der Wälder durch Luftschadstoffe und die weiter zunehmende Verschmutzung der Meere noch verstärkt. Soll die Katastrophe noch abgewendet werden, muß unverzüglich gehandelt werden. Um die bedrohliche Entwicklung ganz zu verhindern, ist es jetzt bereits zu spät. Auch wenn die Emissionen sofort drastisch reduziert würden, erwärmt sich die Erde weiter. Wegen seiner hohen Wärmespeicherkapazität verzögern die Ozeane die Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre um 30 bis 40 Jahre. Das bedeutet: Die Temperatur wird auch dann noch weiter zunehmen, wenn die Emissionen der Treibhausgase sofort und in vollem Umfang eingestellt würden. Die ganze Wirkung des zusätzlichen Treibhauseffekts wird erst zeitlich verzögert – nach 30–40 Jahren – wirksam. Zahlreiche Treibhausgase haben eine Lebensdauer in der Atmosphäre von rund 100 Jahren. Selbst wenn die Emissionsraten auf dem heutigen Stand „eingefroren“ werden könnten, würde die Konzentration in den folgenden 100 Jahren noch weiter ansteigen. Um zumindest die Umweltschäden auf ein erträgliches Minimum zu begrenzen ist sofortiges Handeln unabdingbar.

Schnellstmöglich muß die Emission klimarelevanter Spurenstoffe (einschließlich Aerosole) reduziert, die Produktion der FCKW, teilhalogenierter Substitute und Halone eingestellt und der Zerstörung der Wälder – sowohl der tropischen als auch der gemäßigten und borealen Zonen –, die eine lebenswichtige Funktion als Kohlendioxid-Speicher haben, Einhalt geboten werden.

Die drohende Klimakatastrophe ist sowohl Gefahr als auch Chance. Zwar hat sich die Menschheit mit der rücksichtslosen Ausbeutung der Natur in eine bedrohliche Situation gebracht. Doch die Notwendigkeit, umzusteuern, der ökologischen Komponente verstärkt im System der Marktwirtschaft zur Geltung zu verhelfen und die Notwendigkeit, ein neuartiges und auf Ausgleich bedachtes Nord-Süd-Verhältnis zu schaffen, ist gleichzeitig eine große Chance. Die drohende Klimakatastrophe könnte einer neuen Entwicklungspolitik zum Durchbruch verhelfen. Ein Mei-

lenstein auf dem Weg zu einer gerechteren Welt ist die „UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung“ in Rio de Janeiro. Auch wenn auf dieser Konferenz nicht alle Probleme gelöst werden können, so bietet sie zumindest die Chance, einen Einstieg in eine neues Nord-Süd-Verhältnis zu finden und einen internationalen Grundstein zur Bewältigung der drohenden Klimakatastrophe zu legen. Selten war der Zeitpunkt für eine Neuorientierung so günstig wie heute. Durch die veränderte geopolitische Weltsituation infolge der Auflösung des Ost-West Konfliktes und der Überwindung der ideologischen Gegensätze sind neue politische Handlungsoptionen und Chancen geschaffen worden. Dies sind Optionen und Potentiale, die zur weltweiten Zusammenarbeit und zur Lösung des Problems von Umwelt und Entwicklung genutzt werden müssen.

## Die Grundlage globalen Handelns

Die sich abzeichnende Klimakatastrophe hat globalen Charakter. Die drohenden Umweltschäden sind nicht mehr regional oder lokal begrenzt sondern stellen in ihren Auswirkungen eine Gefahr für die gesamte Menschheit dar. Mehr oder weniger ist jedes einzelne Land der Erde an der Zerstörung unserer gemeinsamen Lebensgrundlage beteiligt und gleichzeitig auch von der drohenden Klimaänderung betroffen. Diese Entwicklung ist letztendlich auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführen und daher auch nur durch entschiedene Verhaltensänderungen zu bewältigen. Industrie- und Entwicklungsländer haben eine gemeinsame, aber unterschiedliche Verantwortung für die Verhaltensweisen, die die Klimaänderung bedingen und die Probleme, die sie mit sich bringt.

### – Kosten und Nutzen des Handelns und Nichthandelns

Würden wir angesichts der drohenden globalen Klimakatastrophe nicht handeln, so würden wir die kurzfristigen Vorteile des Nichthandelns mittel- und langfristig teuer bezahlen müssen. Denn Nichthandeln bedeutet: Beibehaltung des gewohnten Lebensstandards, kein Aufwand für die Entwicklung energie- und ressourcenschonender Technologien, keine Verteuerung klimaschädlicher Produkte etc. Als Folgen sind Schäden in der Land- und Forstwirtschaft, die durch Veränderungen der Temperatur und der Niederschläge ausgelöst werden, Aufwendungen für den Deichbau aufgrund des Meeresspiegelanstiegs oder die Schädigung menschlicher Gesundheit durch die erhöhte UV-B-Strahlung zu erwarten.

Trotz dieser bedrohlichen Perspektiven bleibt die Geschwindigkeit, mit der die Emission klimarelevanter Stoffe begrenzt wird, weit hinter dem Erforderlichen zurück.

Die drohende Klimaveränderung ist ein globales Problem, das nur durch gemeinsame internationale Anstrengungen gelöst werden kann. Die Entwicklungsländer sehen sich ökonomisch nicht in der Lage, aus eigener Kraft wirksame Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen. Andere Probleme, wie die Bevölke-

rungsexplosion, Armut, Hunger etc. stehen im Vordergrund.

Unabdingbar ist es daher, neue politische Mechanismen (Konventionen, internationale Verträge etc.) zu entwickeln, die die Beziehungen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern auf eine neue Basis stellen. Eine gemeinsame Strategie von Nord und Süd muß das Ziel verfolgen, die Grundbedürfnisse der Bevölkerung in den Entwicklungsländern zu decken und einen Entwicklungsprozeß anzustoßen, der die Lücke zwischen den Entwicklungs- und Industrieländern in einer umweltverträglichen Art schließt.

Nur wenn man sich auf eine „gerechte“ Verteilung der Lasten und der Vorteile dieser Strategie einigt, ist das Ziel einer international abgestimmten Klimapolitik erreichbar.

Die Industrieländer tragen in diesem Zusammenhang eine besondere Verantwortung. Derzeit sind sie Hauptverursacher der drohenden Klimaänderung. Der wirtschaftliche und technologische Vorsprung setzt sie in die Lage, auf eine international abgestimmte und wirkungsvolle Klimaschutzpolitik hinzuwirken.

Die Einbindung der Entwicklungsländer in eine internationale Klimapolitik erfordert, daß die Industrieländer ihr ressourcenverschwendendes Handeln aufgeben und mit gutem Beispiel vorangehen. Darüber hinaus müssen den Entwicklungsländern Transfers für die Verwendung in klimarelevanten Bereichen zufließen. Eine intensive technologische und wirtschaftliche Kooperation zwischen Entwicklungs- und Industrieländern ist ebenfalls unverzichtbar.

Auf den ersten Blick fallen nur die Kosten einer Klimaschutzpolitik ins Auge, wie z. B. die Verteuerung von Ressourcen, deren Einsatz klimaschädigend wirkt, die Kosten für Energieeinsparungen oder die Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen für neue, angepaßte Technologien. Dabei wird aber vernachlässigt, daß Investitionen in den Klimaschutz den verschiedensten Wirtschaftssektoren neue Absatzmärkte – auch im Export – erschließen können: angefangen beim kleinen Handwerksbetrieb, der Wärmedämmungsmaßnahmen durchführt, über das Forschungsinstitut, das dazu beiträgt, technische und wirtschaftliche Potentiale regenerativer Energieformen zu erschließen, bis hin zum Großkonzern, der neue Technologien für die Optimierung im Verkehrssektor entwickeln könnte.<sup>1)</sup>

Bei der ökonomischen Bewertung einzelner Klimaschutzmaßnahmen muß deren Wirkung auf den ganzen, hochkomplexen Wirtschaftskreislauf untersucht werden. Nicht nur die direkten, sondern auch die indirekten Effekte müssen berücksichtigt werden. Klimapolitik läßt sich intelligent und kostenfreundlich gestalten. So könnten dort, wo eine Renovierung fällig ist – z. B. in Altbauten – von vornherein im Rahmen der Renovierung auch Wärmedämmmaßnahmen durchgeführt werden, um die Kosten für den Klimaschutz zu minimieren. Es wird in einem Land also nicht nur wirtschaftliche Verlierer einer Klimaschutzpolitik geben, sondern auch Gewinner.

Die Kosten der Klimaschutzmaßnahmen müssen sowohl gegenüber den gesamtwirtschaftlichen Vor-

teilen als auch den durch die Klimapolitik vermiedenen Schäden abgewogen werden.

Das gegenwärtige Problem betrifft nicht nur die heutige Generation. Wir, die die Kosten der jetzt beschlossenen Klimaschutzmaßnahmen als erste tragen müssen, zählen nicht nur für das, was wir selbst verursacht haben, sondern auch für das Handeln früherer und das Wohlergehen späterer Generationen. Die Lebensgrundlage der Kinder und Kindeskiner kann nur durch Maßnahmen gesichert werden, die heute ergriffen werden.

Unsere Generation kann sich angesichts der drohenden Klimaänderung und ihrer Folgen der Verantwortung nicht entziehen.

### – Verantwortung der Industrieländer

Insbesondere die Industrieländer stehen in der Verantwortung. Der technische Fortschritt hat den Lebensstandard und die Lebensqualität vieler Menschen in den Industrieländern vergrößert und die Formen der Armut gemildert. Dieser Wohlstand wird mit einem hohen Verbrauch an Energie, natürlichen Ressourcen und um den Preis der Umweltzerstörung erkauft. Die Zerstörung der natürlichen Ressourcen hält immer noch an. Die Emissionen aus der Industrieproduktion, der Energieversorgung und auch aus dem Verkehr steigen ständig weiter.

Die Ausbeutung der Natur kommt nicht von ungefähr sondern ist die Folge der Tatsache, daß die bestehenden Wirtschaftssysteme keinen adäquaten Preis für die Nutzung der Umwelt kennen. Die Beanspruchung der Natur, die Ausbeutung der Bodenschätze und der Verbrauch der natürlichen Ressourcen erfolgt nicht

#### <sup>1)</sup> Zusatzvotum Prof. Dr. P. Henicke

Aus Studien der EG (Generaldirektion XII, [1]) und von F. Krause et al. (2) sowie aus Einzelstudien zum Gebäudebereich (3), zu den regenerativen Energiequellen (4) und zum Elektrizitätssektor kann bei einer vorsichtigen Abschätzung abgeleitet werden, daß eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von etwa 30% bis zum Jahr 2005 in der Bundesrepublik Deutschland bei aktiver Energiepolitik und bei entsprechenden staatlichen Rahmenbedingungen keine unüberwindbaren Probleme für die Wirtschaft und für die Finanzierung aufwerfen wird. Umfangreiche Potentiale der Energienutzung sowie der Kraftwärmekopplung sind vielmehr in dem Sinne kosteneffektiv, daß ihre Realisierung aus wirtschaftlichen Gründen ohnehin erfolgen sollte, weil sie – zusätzlich zu ihrer umweltentlastenden und klimaschützenden Wirkung – einzel- und gesamtwirtschaftliche Kosten einsparen helfen. So hat z. B. eine Studie der Generaldirektion XII (5) festgestellt, daß in zehn EG-Ländern die meisten Energieeinsparpotentiale im Bereich Beleuchtung, Haushaltsgeräte, Gebäude (durch bessere Wärmedämmung) und Transport ökonomisch attraktiv sind: Die Investitionen für Energieeinsparungen werden durch die erzielte Energiekosteneinsparung überkompensiert. Für eine CO<sub>2</sub>-Reduktion um 30% ermittelt die EG-Studie für die Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer) einen Anteil der CO<sub>2</sub>-Reduktionskosten am Brutto-sozialprodukt von nur 0,48%.

#### Literatur:

- (1) Europäische Gemeinschaft, Generaldirektion XII, 1991
- (2) Krause et al., 1992
- (3) Ebel et al., 1990
- (4) Nitsch, Ziesing, 1991
- (5) Europäische Gemeinschaft, Generaldirektion XII, 1991

nach ökologischen Gesichtspunkten. Die Schäden finden weder Eingang in die ökonomische Entscheidungsplanung noch in die Kostenrechnung.

Zu drei Vierteln sind es die Industrieländer, die derzeit mit ihren Emissionen und Aktivitäten das Weltklima gefährden. Eine weltweite Kopie durch die Entwicklungsländer würde den ökologischen Kollaps nur beschleunigen. Die für die Erderwärmung hauptsächlich verantwortlichen Kohlendioxidemissionen, die aus der Verbrennung fossiler Energieträger resultieren, stammen zu rund 95 % – kumulativ seit ca. 100 Jahren – aus den Industrieländern des Nordens. Technische Errungenschaften der industriellen Produktion, die lange Zeit als Symbole des Fortschritts galten, haben sich auch als Gefahrenpotential entwickelt. Wurden FCKW einst als großer Fortschritt gepriesen und als Treibgas in Sprühdosen und als Kältemittel eingesetzt, werden jetzt die Schattenseiten überdeutlich.

Vor allem die Entwicklungsländer werden Hauptleidtragende der drohenden Klimaänderung sein. Die Landwirtschaft, die durch die Klimaänderung überdurchschnittlich stark betroffen sein wird, hat einen sehr großen Anteil am Bruttosozialprodukt der Entwicklungsländer. Entwicklungsländer können sich am wenigsten selbst aus eigener Kraft helfen und stehen schon heute vor den größten Problemen. Von den prognostizierten Auswirkungen – Anstieg des Meeresspiegels, Veränderung der Vegetationszonen, Veränderung der Niederschläge – werden diese Gebiete auch absolut am stärksten betroffen sein.

#### – Umwelt und Entwicklung

Das Problem der Klimaänderung ist in das Spannungsfeld Umwelt und Entwicklung eingebettet. Viele der bislang nicht gelösten Weltprobleme wie Bevölkerungsexplosion, Unterentwicklung, Armut und Hunger eskalieren derzeit und finden ihren Ausdruck auch in einer wachsenden Umweltzerstörung.

Rund 80 % der energiebedingten treibhausrelevanten Spurengase weltweit gehen derzeit von 15 % der Weltbevölkerung aus. Der Energieverbrauch in den Industrieländern des Nordens hat sich auf einem sehr hohen Niveau eingependelt. Die Industrieländer tragen auch sonst die Hauptverantwortung für die Klimaänderung. Die Entwicklungsländer dagegen sind gegenwärtig nur zu einem geringen Anteil an der Klimaänderung beteiligt. Der Pro-Kopf-Energieverbrauch in Entwicklungsländern liegt bei einem Bruchteil, nämlich bei rund  $\frac{1}{10}$  bis  $\frac{1}{40}$  dessen, was in den Industriestaaten pro Kopf der Bevölkerung an Energie verbraucht wird. Aber nicht nur die Industriestaaten, auch die Entwicklungsländer haben ein Recht auf Entwicklung und Lebensqualität. Auch wenn dieser Energiezuwachs heute in den Entwicklungsländern weit geringer gehalten werden kann als in den Frühjahren der Industrialisierung der heutigen Industrieländer, ist doch absehbar, daß die Entwicklungsländer, die auf ihrem Weg der Entwicklung dem Industrialisierungspfad der Industrienationen folgen, künftig eine wesentlich größere Rolle bei der Veränderung unseres Klimas spielen werden. Dies wird die heutigen Probleme vervielfachen.

Der künftig steigende Anteil der Entwicklungsländer an der Klimaänderung wäre nicht nur eine Folge der fortschreitenden Industrialisierung. Die Zerstörung der Umwelt in den Entwicklungsländern, die Abholzung der tropischen Regenwälder und die Umwandlung der gerodeten Flächen in landwirtschaftliche Nutzfläche sind das Resultat der Armut. Aus Mangel an bezahlbaren Energieträgern und funktionsfähigen Energieversorgungssystemen werden Wälder abgeholzt, um Brennholz als kostenfreie Energiequelle zu erhalten. Die gleichzeitige Bevölkerungsexplosion verschärft die Situation dramatisch. Als Folge wird die Umwelt immer stärker übernutzt.

Der wissenschaftliche und technische Fortschritt in den industrialisierten Ländern tendiert dazu, die wirtschaftlichen Unterschiede zwischen reichen und armen Ländern zu verschärfen und die Einführung technischer Innovationen zu erschweren.

Im Welthandel haben die Entwicklungsländer eine relativ schwache Position. Für ihre Rohstoffe erzielen sie an den Weltmärkten nur geringe Preise. Die hohe Überschuldung, nachlassende Auslandsinvestitionen in den Entwicklungsländern und ein erheblicher Netto-Kapitalabfluß von den armen in die reichen Länder verschärft die Armut zunehmend. Die Schere zwischen Nord und Süd weitet sich. Wenn die Entwicklungsländer nicht eine faire Chance auf Entwicklung erhalten, ist die Zerstörung der natürlichen Ressourcen und die Rodung des Tropenwaldes nicht aufzuhalten. Unsere nicht ausreichend auf nachhaltige Sicherung der Lebensgrundlagen ausgerichtete Wirtschafts- und Lebensweise belastet nicht nur unsere eigene Umwelt und zerstört die Lebensgrundlagen künftiger Generationen, sondern auch die der Entwicklungsländer.

Der Schlüssel zur Lösung der globalen Klimakatastrophe liegt darin, daß die Industrieländer so schnell wie möglich die überproportionale Belastung zurücknehmen und daß die Entwicklungsländer durch ihre eigene, ihrer Tradition und ihren Lebensverhältnissen entsprechende Entwicklung in einer umweltverträglichen Weise Not und Armut überwinden.

Bei ihrem berechtigten Streben, die Grundbedürfnisse der Bevölkerung zu decken und das zwischen Industrie- und Entwicklungsländern bestehende Wohlstandsgefälle zu überwinden, haben sich die Entwicklungsländer bisher weitgehend an der Wirtschaftsweise der Industrieländer orientiert, die bereits zu globaler Überbeanspruchung der Ressourcen geführt hat.

Zahlreiche Länder sind bereits derartig hoch verschuldet, daß eine Lösung aus eigener Kraft mehr als unwahrscheinlich scheint. Die Industrienationen stehen in der Pflicht, den Entwicklungsländern, die zum Wohlstand des Nordens erheblich beigetragen haben, auf dem Weg der Entwicklung im Einklang mit der Umwelt zu helfen.

#### – Osteuropa

Mit dem Zusammenbruch der politischen Systeme des Ostens wurde das ganze Ausmaß der dortigen Umweltzerstörung offenbar. Wie im Westen galten

qualmende Schloten lange Zeit als Zeichen für Industrialisierung und Modernität. Umweltschutz haftete lange Zeit der Makel der Unproduktivität an. Eine Ursache für den rücksichtslosen Verbrauch natürlicher Ressourcen war der harte ideologische Konkurrenzkampf mit den hochtechnisierten westlichen Industriegesellschaften um die weltpolitische Vormachtstellung. Finanzmittel wurden in unproduktive Sektoren, wie die Rüstungsindustrie investiert. Aus Mangel an Kapital mußte in der Industrie daher mit veralteten technischen Anlagen produziert werden. Zur Energieerzeugung in technisch längst überholten Kraftwerken wurde zum großen Teil stark schadstoffhaltiges Brennmaterial verfeuert. Sicherheitsstandards bei Risikotechnologien wurden vernachlässigt. Das System der Zentralverwaltungswirtschaft führte zu ineffizientem und umweltschädigendem Wirt-

schaften. Weder die Umwelt noch die ökologischen Folgen eines verschwenderischen Energieverbrauchs fanden Eingang in die Produktions- und Wirtschaftspläne.

Als hochgradig umweltschädlich erwies sich das System der Energiesubventionierung. Über Jahrzehnte hat die Zentralplanwirtschaft die Schwerindustrie und ihre hohe Energieintensität favorisiert. Als Folge der staatlichen Energiesubventionierung und fehlender am Markt orientierter Preise wurde Energie verschwendet und wurden Emissionen in großem Ausmaß freigesetzt. Ähnlich wie Entwicklungsländer können auch die Staaten des Ostens ihre immensen Umweltprobleme nicht allein lösen und sind auf die Hilfe der westlichen Industrienationen angewiesen.

## 2 Darstellung des aktuellen Kenntnisstands

### Zusammenfassung

Beobachtungen innerhalb der letzten 30 bis 50 Jahre weisen eindeutig auf eine beginnende Umstellung des globalen Klimas hin. Diese äußert sich in folgenden, sich gegenseitig bestätigenden Beobachtungen:

- Zunahme der Oberflächentemperatur der tropischen Ozeane um 0,5 °C
- Zunahme des Wasserdampfgehaltes in der Troposphäre der Tropen
- vermehrt freiwerdende gebundene Wärme in den mittleren Schichten der tropischen Troposphäre
- Verstärkung des Temperaturgefälles zwischen Äquator und den polaren Breiten
- Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit
- Vertiefung der quasi stationären Tiefdruckgebiete über dem Nordatlantik und Nordpazifik

Die globale Mitteltemperatur liegt heute um etwa 0,7 °C über dem Wert von 1860. Innerhalb desselben Zeitraumes hat die Masse der Inlandgletscher in den Alpen um etwa 50 Prozent abgenommen.

Der wissenschaftliche Sachstand über den anthropogenen Treibhauseffekt hat sich in den letzten Jahren gefestigt. Der vom Menschen verursachte Anstieg der Konzentrationen der langlebigen Treibhausgase Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid und der Fluorchlorkohlenwasserstoffe setzt sich weiter fort. Das wichtigste anthropogene Treibhausgas ist das Kohlendioxid. Es weist ein mittleres Mischungsverhältnis in der Troposphäre von 355 ppmv auf, welches damit höher ist als zu irgendeinem Zeitpunkt in den vergangenen 160 000 Jahren. Das Kohlendioxid ist mit 50 % am anthropogenen Treibhauseffekt beteiligt. Die weiteren prozentualen Anteile sind: Methan 13 %, troposphärisches Ozon 7 %, Distickstoffoxid 5 %, alle FCKW 22 % sowie stratosphärischer Wasserdampf mit 3 %.

Für den Energiebereich entstand durch die politischen Veränderungen in Osteuropa und in der ehemaligen Sowjetunion eine grundlegend neue Situation. Sie schlägt sich darin nieder, daß in diesen Ländern die Energienachfrage infolge der Umstrukturierung der ehemaligen Zentralverwaltungswirtschaften deutlich zurückgeht. Im Hinblick auf diese Entwicklung erscheint eine Revision der Prognosen zur mittelfristigen Entwicklung des Weltenergiebedarfs notwendig. Der beschriebene Sachverhalt verbunden mit einer rezessionsartigen Entwicklung bzw. einer Abschwächung des Wachstums in vielen Industrieländern führte zu einer Stagnation der weltweiten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den letzten beiden Jahren.

Der irakische Überfall auf Kuwait unterstrich erneut die Instabilität der politischen Lage in der Region mit den mit Abstand größten Erdölreserven der Welt. Hektische Schwankungen des Rohölpreises waren die Folge der politischen Krise.

Für die Bundesrepublik Deutschland ist seit der Vereinigung der beiden deutschen Staaten eine deutliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verzeichnen, was dadurch herrührt, daß der Umstrukturierungsprozeß der Wirtschaft in den neuen Bundesländern vorerst zu einem starken Rückgang der Produktion führt. Insgesamt haben sich dadurch die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland von 1987 um rund 6 % bis 1990 und vorläufig geschätzt um 12 % bis 1991 vermindert.

Der Verkehrssektor hat im Laufe der Zeit hinsichtlich des Energieverbrauchs sowohl in absoluten als auch in relativen Werten an Bedeutung zugenommen. Weltweit entfallen 27 % des Energieverbrauches auf den Verkehrsbereich, für den im Vergleich zu anderen Verbrauchssektoren überdurchschnittlich hohe Wachstumsraten prognostiziert werden. Die durch den Verkehr verursachten Umweltbelastungen gehen vor allem auf den motorisierten Individualverkehr zurück. Emissionsminderungen durch technische Verbesserungen am Fahrzeug konnten den Emissionsanstieg durch Verkehrszuwächse nicht kompensieren.

Die durch die Vernichtung der tropischen Wälder freigesetzten Spurengase tragen etwa 15 % zum Treibhauseffekt bei. Von noch größerer Bedeutung sind die Auswirkungen auf das regionale Klima. Die Abholzungsrate in den tropischen Wäldern hat sich im vergangenen Jahrzehnt um etwa 50 % auf jährlich 170 000 km<sup>2</sup> erhöht. Inzwischen ist zudem zu befürchten, daß auch in den borealen Wäldern großflächige Abholzungen stattfinden werden.

Die Landwirtschaft trägt weltweit mit 15 % zur Emission von treibhauswirksamen Spurengasen bei. Als bedeutende Emissionsgruppen sind CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O zu nennen. CO<sub>2</sub> wird hauptsächlich bei der Biomasseverbrennung, der Umwandlung von Wäldern in landwirtschaftlich genutzte Fläche sowie bei sekundären Bränden zum Erhalt der Flächen freigesetzt. Landwirtschaftliche Quellen für Methan sind der Naßreisbau, die (Massen-) Tierhaltung und die Biomasseverbrennung. Eine weitere Quelle sind Mülldeponien. N<sub>2</sub>O ist nicht nur treibhauswirksam, sondern wird bei weiterer Anreicherung in der Atmosphäre zunehmend auch zur Zerstörung der Ozonschicht beitragen. N<sub>2</sub>O entsteht durch Abbau von Stickstoffverbindungen im Boden, zu den Emissionen trägt daher die Stickstoffdüngung erheblich bei. Da sich die Klimaänderung direkt auf die Landwirtschaft auswirken wird, ist eine Umorientierung zu umweltfreundlicher, „emissionsarmer“ Bewirtschaftungsweise notwendig.

## 2.1 Beobachtete Änderungen von Klimaparametern

Durch die in letzter Zeit intensivierten Beobachtungen ist nachgewiesen worden, daß sich eine Reihe wichtiger Klimaparameter signifikant verändert haben und deshalb von einer globalen Veränderung des Klimas auszugehen ist. Einige in diesem Zusammenhang wichtige Beobachtungen sind im folgenden aufgeführt:

- Die Zeitreihen für das globale und jahreszeitliche Mittel der bodennahen Lufttemperatur zeigen seit 1860 einen langfristigen Anstieg um  $0,45 \pm 0,15$  Grad Celsius in 100 Jahren (Abb. 2.1). Die sieben wärmsten Jahre innerhalb dieses Zeitabschnitts waren (in aufsteigender Reihenfolge) 1944, 1989, 1987, 1983, 1988, 1991 und 1990 (bisheriger Spitzenwert).
- Die Temperaturänderung auf der Nordhalbkugel ist regional und jahreszeitlich sehr unterschiedlich ausgefallen. So hat z. B. über dem Atlantik außerhalb der tropischen Breiten eine nur geringe Erwärmung stattgefunden, im Norden Nordamerikas und Sibiriens dagegen eine stärkere als im globalen Mittel.
- Der mittlere Tagesgang der bodennahen Lufttemperatur hat sich über den Landflächen der mittleren

Breiten der Nordhalbkugel in den letzten 20 Jahren verändert. Dabei sind die Minimaltemperaturen leicht angestiegen, während die Maximaltemperaturen unverändert geblieben sind (1). Das deutet auf den Effekt einer verminderten langwelligen Ausstrahlung, – vor allem während der Nächte –, aufgrund zunehmender Bewölkung oder zunehmender Mengen von klimarelevanten atmosphärischen Spurengasen hin. Da sich die Tagesmaxima nicht in gleicher Weise verändert haben, ist der Einfluß zunehmender Treibhausgase eher wahrscheinlich.

- Die Oberflächentemperaturen der tropischen Ozeane sind zwischen 1949 und 1989 um 0,5 Grad Celsius gestiegen (Abb. 2.2a). Der Dampfdruck des Wassers steigt exponentiell mit der Temperatur an. Für die Wasserverdunstung ergab sich in demselben Zeitabschnitt ein Zuwachs von 16 % (Abb. 2.2b). Die durch den Wasserdampf transportierte latente Wärme wird größtenteils noch in den Tropen und Subtropen durch Kondensation und Niederschlagsbildung im Wolkenniveau frei.
- Die stärkste Erwärmung liegt demzufolge in der mittleren Troposphäre (in 3 bis 6 km Höhe) über den Tropen und Subtropen. Über der Arktis ist dagegen in diesem Höhenbereich eine Abkühlung beobachtet worden. Dazu ist anzumerken, daß die Änderung

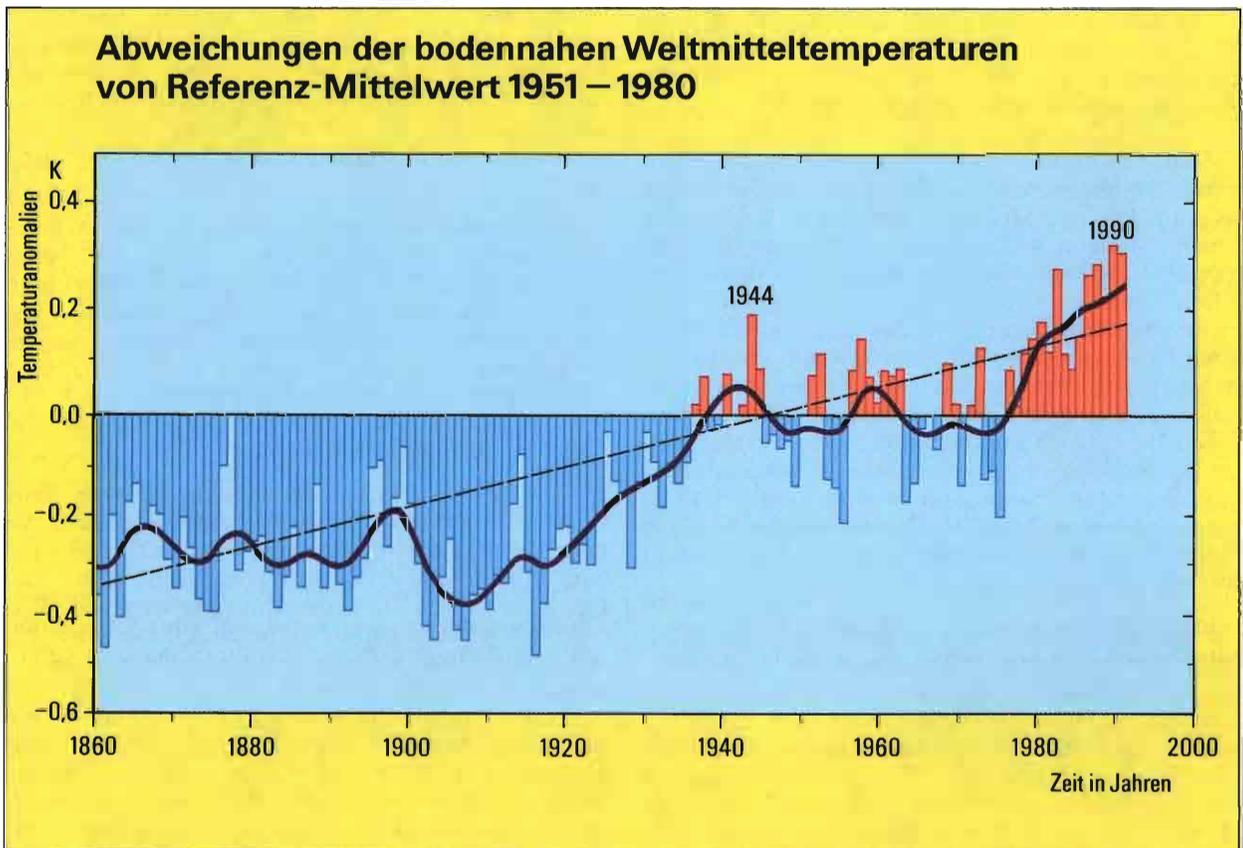


Abb. 2.1: Anomalien (Abweichungen vom Referenzintervall 1951–1980) der bodennahen Weltmitteltemperatur, Kombination aus Luft- und ozeanischer Wasseroberflächentemperatur, Säulen, zehnjährige Glättung, dick gezeichnete Kurve, und linearer Trend, gestrichelt. Der Jahresmittelwert 1990 liegt bei  $15,5^{\circ}\text{C}$ , der Wert für 1991 ist vorläufig. Der lineare Trend beträgt  $0,5^{\circ}\text{C}$  (Unschärfe  $0,1$  bis  $0,2^{\circ}\text{C}$ ), das Trend-/Rauschverhältnis 2,7. Die Rangfolge der sieben wärmsten Jahre ist: 1990, 1991, 1988, 1983, 1987, 1989, 1944. Datenquelle: IPCC, 1990, 1992; Bearbeitung: Schönwiese (1991, 1992).

Anmerkung: Ein Trend-/Rauschverhältnis von  $>2$  bedeutet bei normalverteilten Datenkollektiven eine statistische Signifikanz von  $>95\%$ , bei  $>3$  entsprechend  $99\%$ .

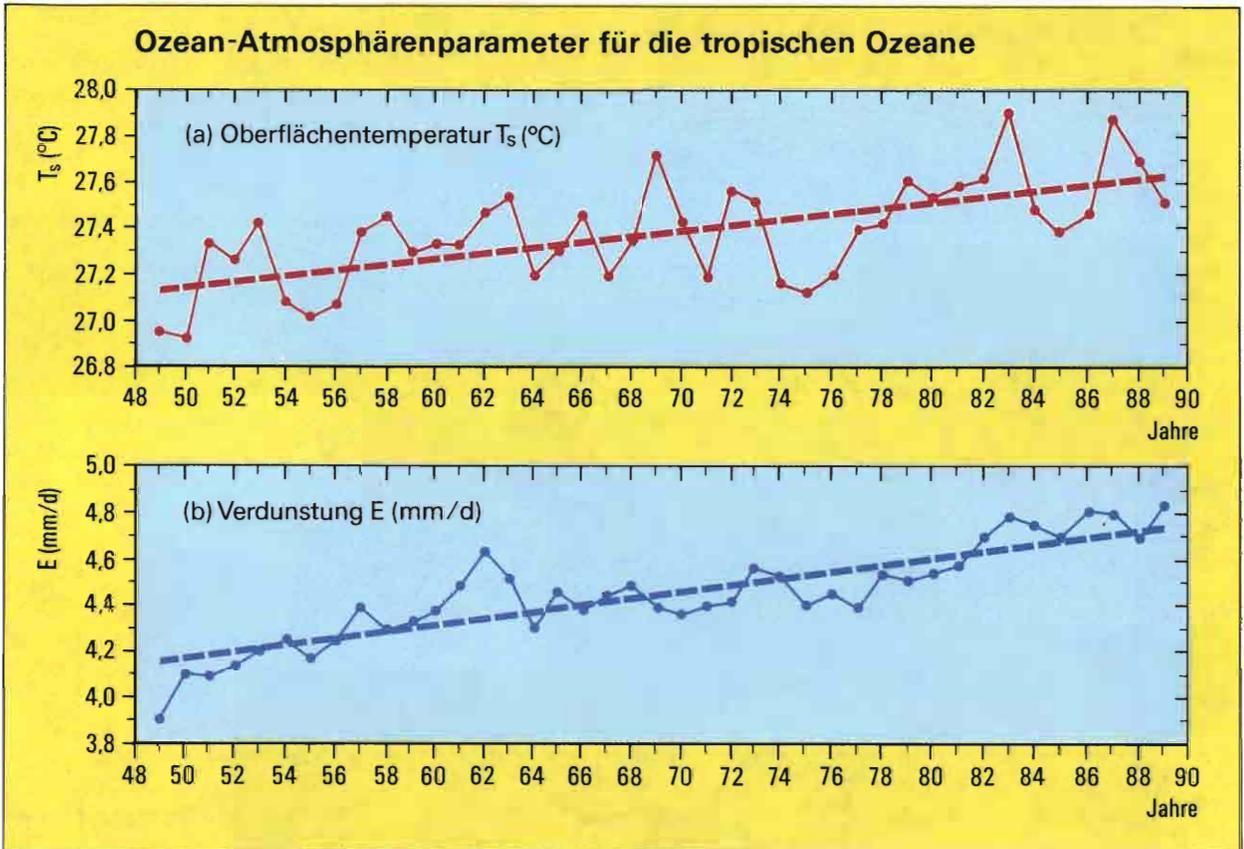


Abb. 2.2: Zeitreihen von Ozean-Atmosphären-Parametern für die tropischen Ozeane ( $10^{\circ}\text{S}$  bis  $14^{\circ}\text{N}$ )

(a) Oberflächentemperatur  $T_s$  (°C)

(b) Verdunstung  $E$  (mm/d)

(nach Flohn, 1992)

- des Wasserdampfgehaltes in der Troposphäre der höheren Breiten offenbar gering gewesen ist.
- Wegen der unterschiedlichen zeitlichen Entwicklung der Temperaturen in den tropischen und in den nördlichen hohen Breiten muß man davon ausgehen, daß sich sowohl das Temperatur- als auch das Druckgefälle zwischen Äquator und Nordpol und damit zugleich die Intensität der atmosphärischen Zirkulation auf der Nordhemisphäre verstärkt haben (2).
- In allen Breiten ist in den letzten zwanzig Jahren eine Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit beobachtet worden. Diese Zunahme beträgt am Boden in den Tropen  $1\text{ m s}^{-1}$  (+20 %) und in mittleren Breiten  $0.4\text{ m s}^{-1}$  (+9 %). In 500 hPa (5–6 km Höhe) ist in mittleren Breiten eine Zunahme um  $0.7\text{ m s}^{-1}$  (+6.2 %) festgestellt worden.
- In den Winterhalbjahren der letzten 22 Jahre hat sich das annähernd ortsfeste Tiefdruckgebiet bei Island/Grönland um 5, das über dem Nordpazifik (Aleuten-Tief) um 8 hPa vertieft (Abb. 2.3). Im Bereich des Tiefdruckzentrums bei Island hat die relative Sturmhäufigkeit von 1966/67 bis 1988/89 von 18 auf 26 % zugenommen. Für das Aleuten-Tief wurde sogar eine Zunahme der Sturmhäufigkeit von 17 auf 32 % festgestellt (1,2).
- Eine Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit von 5 bis 10 % (Wertebereich für die unteren Schichten der Troposphäre auf der Nordhemisphäre) bedeutet gleichzeitig einen Zuwachs der Windenergie von 10 % bis 20 %. Die Zunahme der Sturmschäden, insbesondere in den letzten fünf Jahren (Hurrikan „Gilbert“, 1988 und „Hugo“, 1989, Winterstürme in Europa 1987 und 1990, Taifun „Mirreille“, 1991), ist ein weiteres Indiz für die Intensivierung der allgemeinen Zirkulation (3).
- Globale Aussagen über die Veränderung der Niederschlagsraten und -verteilung sind wegen der unzureichenden Datenbasis und der großen zeitlichen und räumlichen Variabilität der Niederschläge nicht so sicher. Nach den vorhandenen Daten haben die Niederschläge auf den Kontinenten seit 1950 um mehr als 5 % zugenommen. Eine Ausnahme bildet der Breitengürtel  $5\text{--}35^{\circ}\text{N}$ , wo die Niederschläge abgenommen haben (4,5).
- Die jährliche Schneebedeckung der Kontinente in der Nordhemisphäre hat seit 1973 um ca. 8 % abgenommen (1).
- Die Masse der Inlandsgletscher in den Alpen hat zwischen 1850 und 1969 um etwa 50 % abgenommen (Abb. 2.4,(6)). Als Folge der „gletschergünstigen“

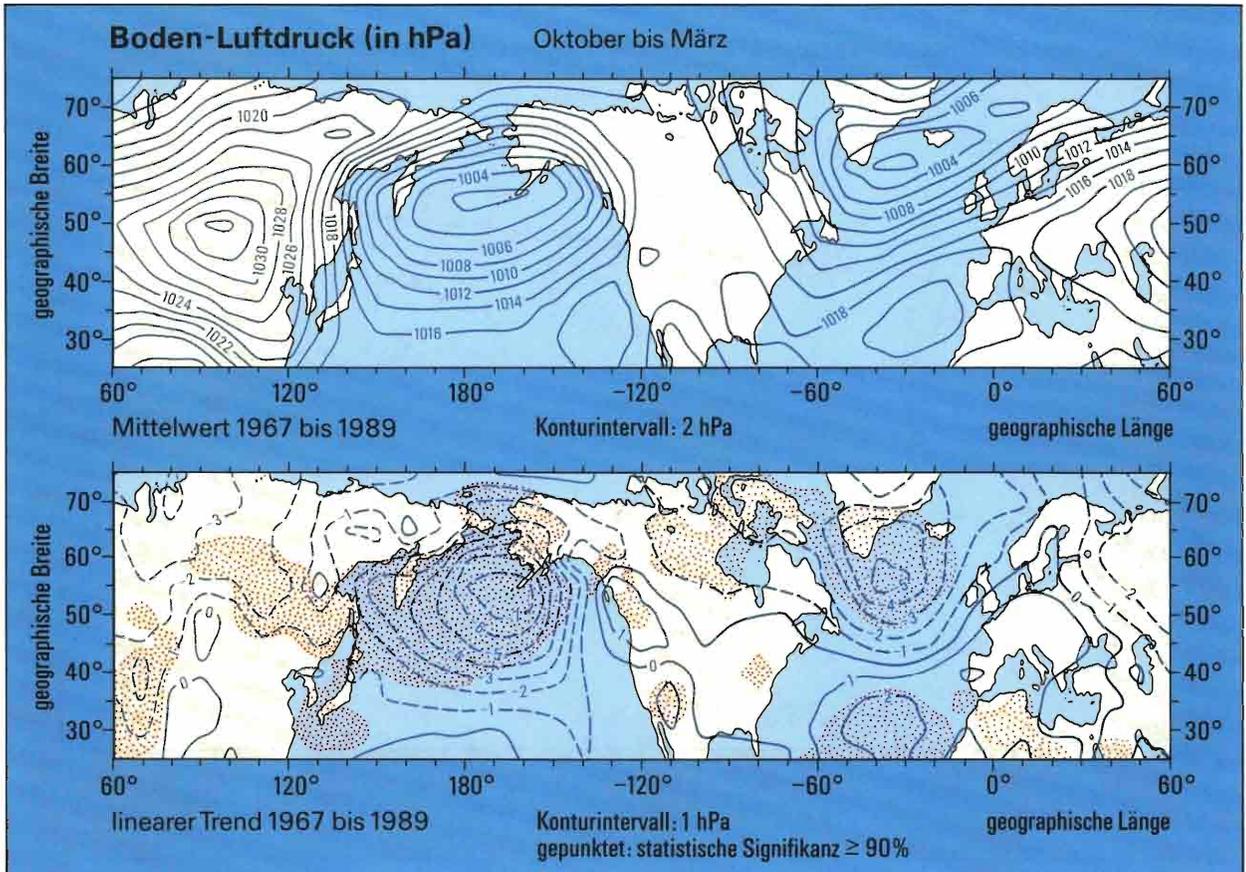


Abb. 2.3: Boden-Luftdruck (Oktober bis März) in hPa für die Periode 1966/67 bis 1988/89 (entnommen Flohn, 1992)

(a) Mittelwert

(b) linearer Trend

Interpretation siehe Text!

gen“ Witterung (hier insbesondere relativ niedrige Sommertemperaturen sowie häufige Niederschläge in Form von Schnee im Sommer) dehnten die Mehrzahl der beobachteten Alpengletscher sich bis etwa 1983 aus. Danach gingen sie wieder zurück, so daß die Zahlen der Gletscherinventur von 1969 noch repräsentativ für 1992 sind (7).

- Es gibt Anzeichen dafür (Satellitendaten), daß die Dicke des Inlandeises zumindest im südlichen Teil Grönlands zunimmt, wahrscheinlich durch erhöhte Niederschlagsmengen (8). Den Satellitenbeobachtungen stehen jedoch Beobachtungen eines allgemeinen Rückzugs der Gletscherzungen in Grönland gegenüber, der durch die in Grönland in den vergangenen hundert Jahren festgestellte Temperaturzunahme und die damit verbundene Abschmelzrate erklärt wird (9). In der Antarktis zeichnet sich offenbar kein Zeittrend ab.
- Die Auswertung von Satellitendaten für den Zeitraum 1978 bis 1987 ergab eine signifikante Abnahme der Ausdehnung des Meereises nördlich von Grönland. Die mittlere Zunahme der Lufttemperatur betrug 0,5 Grad Celsius für diesen Zeitabschnitt.

## 2.2 Klima und Treibhauseffekt

Bevor die neuesten Erkenntnisse über den anthropogenen Beitrag zu dieser Klimaänderung im folgenden ausgeführt werden, sollen die physikalischen Grundlagen kurz erläutert werden. Unter dem Begriff „Klima“ wird der langzeitige Mittelwert des Wettergeschehens einer Region verstanden. Bei diesem Mittelwert werden neben der Temperatur der Luft in Bodennähe bzw. an der Meeresoberfläche Parameter wie Strahlung, Niederschlag, Bodenfeuchte sowie Häufigkeit und Stärke besonderer Wetterereignisse (Stürme, Spätfröste, Dürren, u. a.) betrachtet. Da das Klima natürliche Schwankungen auf Zeitskalen von wenigen Jahren bis 100 000 Jahren aufweist sind für statistisch gesicherte Aussagen über Zeittrends Mitteilungen über mindestens 20 bis 30 Jahre und Datensätze über mindestens 100 Jahre erforderlich.

Wichtig für das Klima ist der Strahlungshaushalt der Erde, der durch die relativ kurzwellige solare Einstrahlung im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes und durch die längerwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche im infraroten Bereich des Spektrums (Wärmestrahlung) bestimmt wird. Die tatsächliche

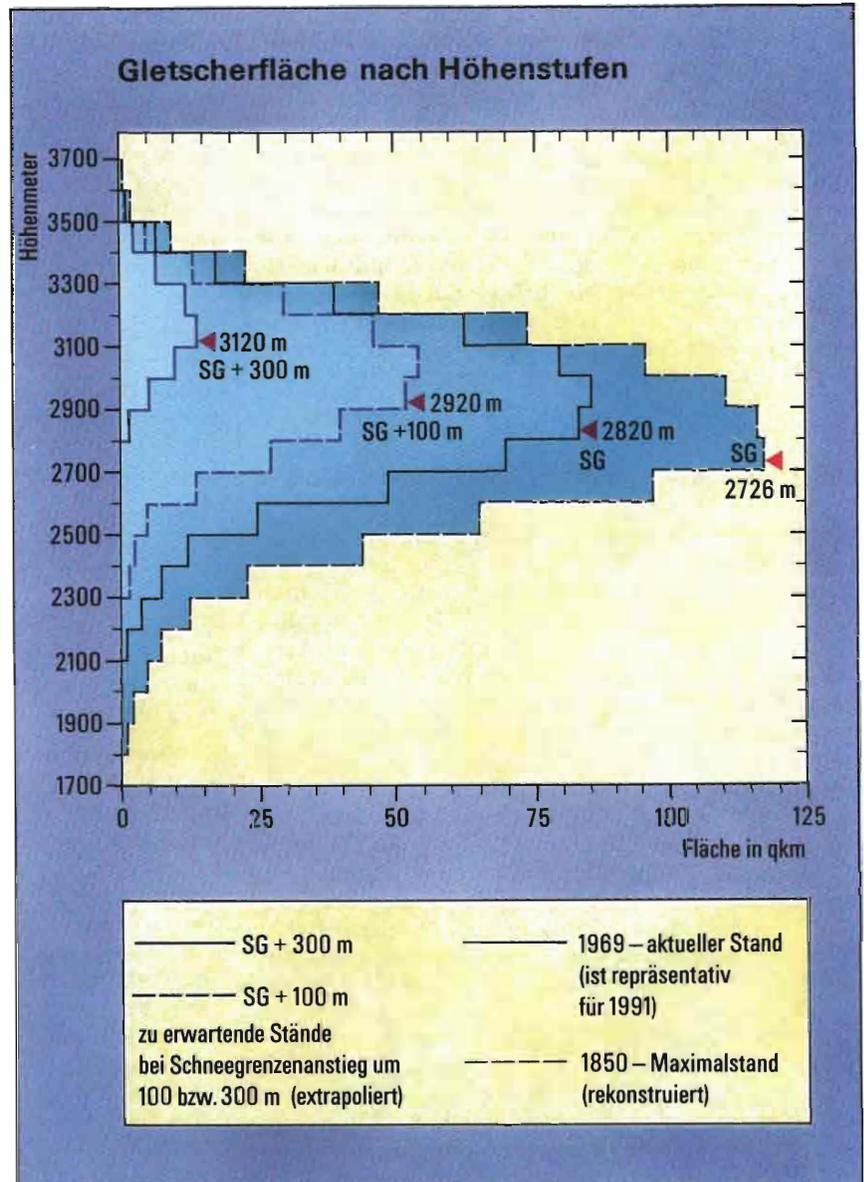


Abb. 2.4: Höhenverteilung der Gletscherflächen in den österreichischen Alpen:

- aktueller Stand 1969 (ist repräsentativ für 1991)
- Maximalstand 1850 (ist rekonstruiert)
- zu erwartende Stände bei Anstieg der Schneegrenze um 100 bzw. 300 m (extrapoliert)

Bemerkung: Eine Erwärmung um 1 Grad Celsius entspricht einer Verschiebung der Gleichgewichtslinie eines Gletschers um ca. 170 m (entnommen Patzelt und Aellen, 1990)

Ausprägung des Klimas wird durch eine Vielzahl komplexer und miteinander gekoppelter Regelkreise, an denen die Atmosphäre, die Pedosphäre (d. h. die Landoberflächen), die Hydrosphäre (vor allem die Weltmeere), die Kryosphäre (d. h. die schnee- und eisbedeckten Gebiete vornehmlich in den Polarzonen) und die Biota (d. h. die lebenden Organismen) auf den Kontinenten und im Meer beteiligt sind, sowohl regional wie global kontrolliert (Klimasystem). Die innerhalb der einzelnen Regelkreise ablaufenden Prozesse und die für die Kopplung der Regelkreise verantwortlichen Mechanismen sind immer noch nicht ausreichend bekannt.

Der Mensch greift durch verschiedene Aktivitäten in diese Regelkreise ein. Durch die seit Beginn des Industriezeitalters zunehmende Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Urbarmachung großer Landflächen für die Landwirtschaft trägt der Mensch dazu bei, die chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre nachhaltig zu verändern. Damit ändert sich auch der von der Atmosphäre bewirkte Treibhauseffekt.

Der Treibhauseffekt geht auf die Wirkung der klimarelevanten Spurenstoffe zurück, die in der Erdatmosphäre zwar nur in geringen Mischungsverhältnissen auftreten, aber für die Temperatur und damit das

Klima der Erde von ausschlaggebender Bedeutung sind. Diese Spurenstoffe lassen die kurzweilige Sonnenstrahlung ungehindert in Richtung Erdoberfläche passieren, absorbieren aber die von der Erdoberfläche abgegebene Wärmestrahlung und führen damit zu einer Erwärmung der bodennahen Luftmassen. In Analogie zu den Verhältnissen in einem Treibhaus wird die Wirkung der klimarelevanten Spurenstoffe vielfach auch als „Treibhauseffekt“ bezeichnet. Ohne das Vorhandensein der klimarelevanten Spurenstoffe in der Atmosphäre würde sich an der Erdoberfläche eine durchschnittliche Temperatur von  $-18\text{ °C}$  einstellen – ein Wert, der um  $33\text{ °C}$  unter dem heutigen Mittelwert von  $+15\text{ °C}$  liegen würde.

### 2.2.1 Klimarelevante atmosphärische Spurengase

Die wesentlichen klimarelevanten Spurengase in der vom Menschen unbeeinflussten Atmosphäre sind Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Die Konzentrationen dieser Spurengase nehmen durch die anthropogene Steigerung der entsprechenden Emissionsraten zu und führen zusammen mit den durch industrielle Prozesse emittierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts, was auch als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet wird. Der anthropogene Treibhauseffekt wird durch das photochemisch gebildete troposphärische Ozon verstärkt. Die zur Ozonbildung beitragenden Vorläufer wie z. B.  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  und die Gruppe der VOC (flüchtige organische Verbindungen) werden daher auch als indirekt klimawirksame Spurengase bezeichnet. Zur Zeit haben der Wasserdampf und das Kohlendioxid zusammen einen Anteil von etwa 85% am Gesamttreibhauseffekt (10). Eine Änderung der Konzentrationen der klimarelevanten Spurengase, insbesondere der im Bereich des sogenannten Wasserdampffensers (Wellenlängenbereich  $8\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$ ) optisch aktiven Gase, führt zwangsweise zu einer Änderung des Erdklimas.

#### 2.2.1.1 Wasserdampf

Das Wasser bildet in der Atmosphäre ein recht komplexes dynamisches System, in dem die verschiedenen Aggregatzustände Dampf, Flüssigwassertröpfchen und Eiskristalle in dauernder Wechselwirkung miteinander stehen. In allen diesen Aggregatzuständen ist das Wasser in der Atmosphäre klimarelevant. Die verbreitetste Form des atmosphärischen Wassers ist der Wasserdampf, der mit einem Anteil von 65% am Gesamttreibhauseffekt das wichtigste klimarelevante atmosphärische Spurengas ist.

Der Wasserdampf, der hauptsächlich durch Verdunstung des Oberflächenwassers der Ozeane in die Atmosphäre gelangt, durchläuft einen schnellen hydrologischen Kreislauf. Zwischen der Verdunstung des Wassers und seinem Niederschlag in Form von Regen und Schnee liegt eine mittlere Zeitspanne von acht Tagen. Der hydrologische Kreislauf ist eng mit der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre gekoppelt. Die Verdunstungsrate und damit der Fluß von

Wasserdampf in die Atmosphäre hängen von der Oberflächentemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit ab. Der Wasserdampfgehalt ist besonders hoch in den oberflächennahen Luftschichten über den warmen, tropischen Ozeanen. Er nimmt mit der Höhe und zu den Polen hin um mehr als Faktor 100 bzw. 10 ab. Relativ niedrige Wasserdampfgehalte findet man in den ariden Regionen der Subtropen, die durch absinkende Luftbewegungen und damit durch trockene Luftmassen gekennzeichnet sind.

Die durch die Verdunstung von Wasser gebundene (latente) Wärme macht über den Ozeanen mehr als drei Viertel der von der Ozeanoberfläche absorbierten Sonnenenergie aus. Diese Wärme wird wieder freigesetzt, wenn der Wasserdampf in der Atmosphäre zu Wolkentröpfchen kondensiert.

Unter heutigen Bedingungen verdunsten ca. 525 Billionen Tonnen pro Jahr, von denen ein großer Teil in kontinentale Bereiche transportiert wird und dort ausregnet. Wegen der kurzen mittleren Verweilzeit und der Abhängigkeit der Verdunstungsraten von der Temperatur unterliegt die Wasserdampfkonzentration in der Troposphäre erheblichen räumlichen und zeitlichen Schwankungen.

In Folge der allgemeinen Erwärmung der Erdoberfläche hat die Verdunstung, insbesondere über den tropischen Ozeanen, zugenommen (11). Diese Zunahme der Verdunstungsrate ist eine natürliche Reaktion auf den durch den Anstieg der übrigen klimarelevanten Spurengase ausgelösten anthropogenen Treibhauseffekt und verstärkt damit den anthropogenen Treibhauseffekt des  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , Ozons und der FCKW (positive Rückkopplung). Auf der anderen Seite ist bekannt, daß die Wolkenbildung in der Regel mit starken, aber kleinräumigen Aufwärtsbewegungen verbunden ist, die aus Kontinuitätsgründen durch meist großräumige Abwärtsbewegungen außerhalb der Wolken kompensiert werden. Die Folge kann eine „Austrocknung“ großer Teile der oberen Troposphäre sein, die dem anthropogenen Treibhauseffekt entgegenwirken würde (negative Rückkopplung). Ob die Zunahme der Wasserverdunstungsrate bei ansteigenden Oberflächentemperaturen letztendlich im Mittel eine positive oder negative Rückkopplung des Treibhauseffekts bewirkt, ist von der Veränderung der vertikalen Verteilung des Wasserdampfes in der Troposphäre und der Konzentrationsänderung des Wasserdampfes in der oberen Troposphäre abhängig. Neuere Messungen haben gezeigt, daß der Wasserdampf in Gebieten mit verstärkter Konvektion (in den Tropen) auch in der oberen Troposphäre zunimmt (12). Abb. 2.5 zeigt als Beispiel den zwischen 1985 und 1989 beobachteten Wasserdampfgehalt in der Troposphäre als Funktion der Höhe und der geographischen Breite in beiden Hemisphären. Aufgetragen ist die Differenz zwischen den Juli- und den Januarwerten. Die jahreszeitlichen Unterschiede sind ein Maß für die Empfindlichkeit des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes auf Änderungen in der Temperatur. Es ist deutlich zu erkennen, daß der Wasserdampfgehalt in den Sommermonaten in der gesamten Troposphäre höher ist als in den jeweiligen Wintermonaten. Dies bedeutet gleichzeitig, daß der durch die „trockenen“ Treibhausgase ausgelöste Treibhauseffekt durch die

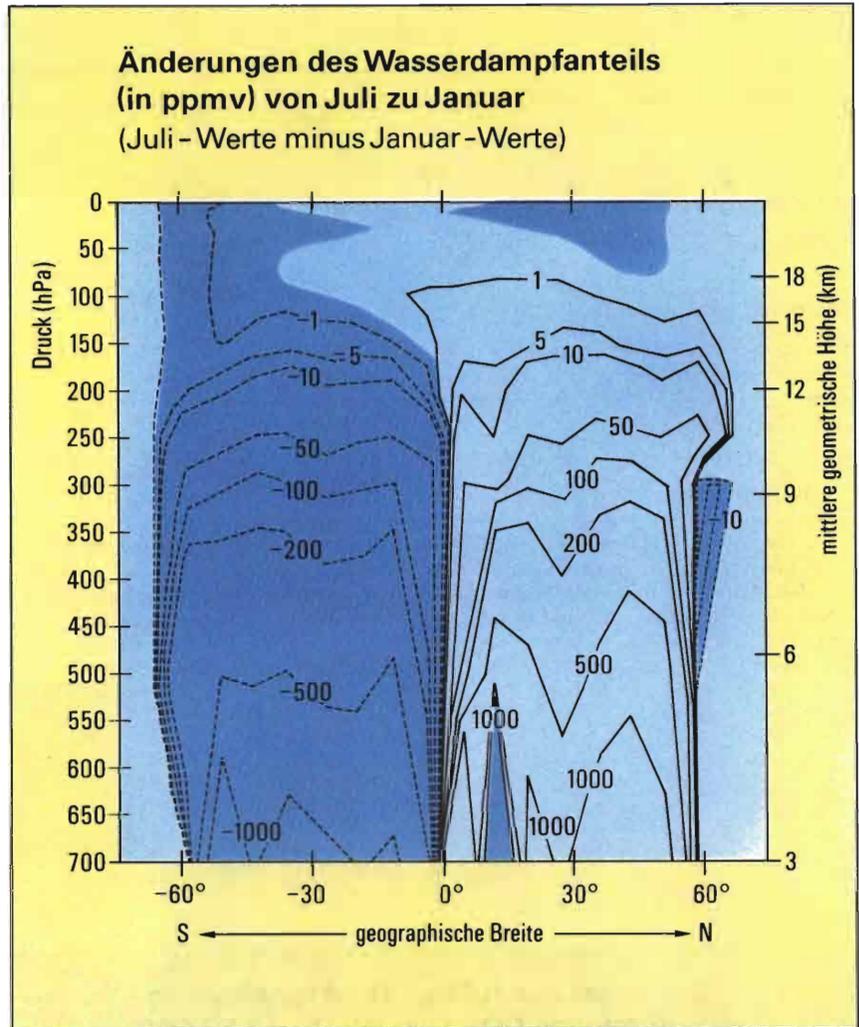


Abb. 2.5 (entnommen aus Rind et. al., Nature, Vol 349, 7 Febr. 91)

Änderung des Wasserdampfgehaltes in Abhängigkeit von der Höhe und der geographischen Breite von Juli zu Januar (berechnet aus SAGE II Satellitenmessungen, Zeitraum Januar 1985 bis Juli 1989).

Die durchgezogenen Linien markieren den Bereich, in dem der Wasserdampfgehalt im Juli höher ist als im Januar. Die Bereiche mit höherem Wasserdampfgehalt im Januar sind dunkel unterlegt und mit gestrichelten Isolinien gekennzeichnet. Es wird deutlich, daß in den jeweiligen Sommermonaten wesentlich mehr Wasserdampf in der Atmosphäre enthalten ist als in den Wintermonaten, d. h. eine globale Erwärmung zieht einen höheren Wasserdampfanteil bis in die hohen Schichten der Troposphäre nach sich. Damit wird der zusätzliche Treibhauseffekt weiter verstärkt.

zunehmende Verdunstung von Wasser verstärkt werden wird. Diese positive Rückkopplung des anthropogenen Treibhauseffektes wird auch durch Modellrechnungen bestätigt (13).

Die bisher beobachtete Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfes hat noch darüber hinausgehende klimatische Konsequenzen. So wird durch den zunehmenden vertikalen Transport von Wasserdampf mehr Kondensationswärme in den mittleren und höheren Schichten der Troposphäre freigesetzt. Dieses wirkt sich wiederum direkt auf die allgemeine atmosphärische Zirkulation aus, die durch die Differenzen in der Energiebilanz der äquatorialen Zone

und der Polargebiete aufrecht erhalten wird (2). (siehe „Beobachtete Änderungen von Klimaparametern“ in Kap. 2.1)

#### 2.2.1.2 Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid und FCKW

Die atmosphärischen Konzentrationen der nach dem Wasserdampf wichtigsten klimarelevanten Spurengase  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und FCKW sind seit dem Beginn der industriellen Entwicklung stetig angestiegen (siehe Tabelle 2.1 und Abb. 2.6). Hinzu kommt der auf

Tabelle 2.1

## Charakteristika atmosphärischer Spurengase

	Kohlendioxid	Methan	FCKW 11	FCKW 12	Distickstoffoxid	Ozon <sup>1)</sup>
Mischungsverhältnis .....	ppmv	ppmv	pptv	pptv	ppbv	ppbv
vorindustrielle (1750 bis 1800) .....	280	0,8	0	0	288	5—15
1991 .....	355	1,74	280	484	311	40—50
Ausstieg pro Jahr .....	1,8 (0,5%)	0,015 (0,75%)	9,5 (4%)	17 (4%)	0,8 (0,25%)	0,15 (0,5)
Verweilzeit (Jahre) .....	50—200	10	65	130	130—150	0,1
rel. GWP (Mol.) <sup>1)</sup> .....	1	21	12 400	15 800	206	2 000
rel. GWP (kg) <sup>1)</sup> .....	1	58	3 970	5 750	206	1 800
Anteil in % <sup>1)</sup> .....	50	13 <sup>3)</sup>	5	12	5	7

<sup>1)</sup> rel. GWP (Mol.): relatives Treibhauspotential (GWP) bezogen auf das gleiche Volumen CO<sub>2</sub> (Mol.)

rel. GWP (kg): GWP bezogen auf die gleiche Masse CO<sub>2</sub> (kg)

Anteil: Anteil der einzelnen Treibhausgase am zusätzlichen Treibhauseffekt in den achtziger Jahren dieses Jahrhunderts.

<sup>2)</sup> Sämtliche Angaben sind sehr grobe Mittelwerte, da die Ozonkonzentration in der Troposphäre räumlich und zeitlich sehr variabel ist.

<sup>3)</sup> In diesem Anteil von 13 Prozent von CH<sub>4</sub> sind nur die direkten Effekte enthalten.

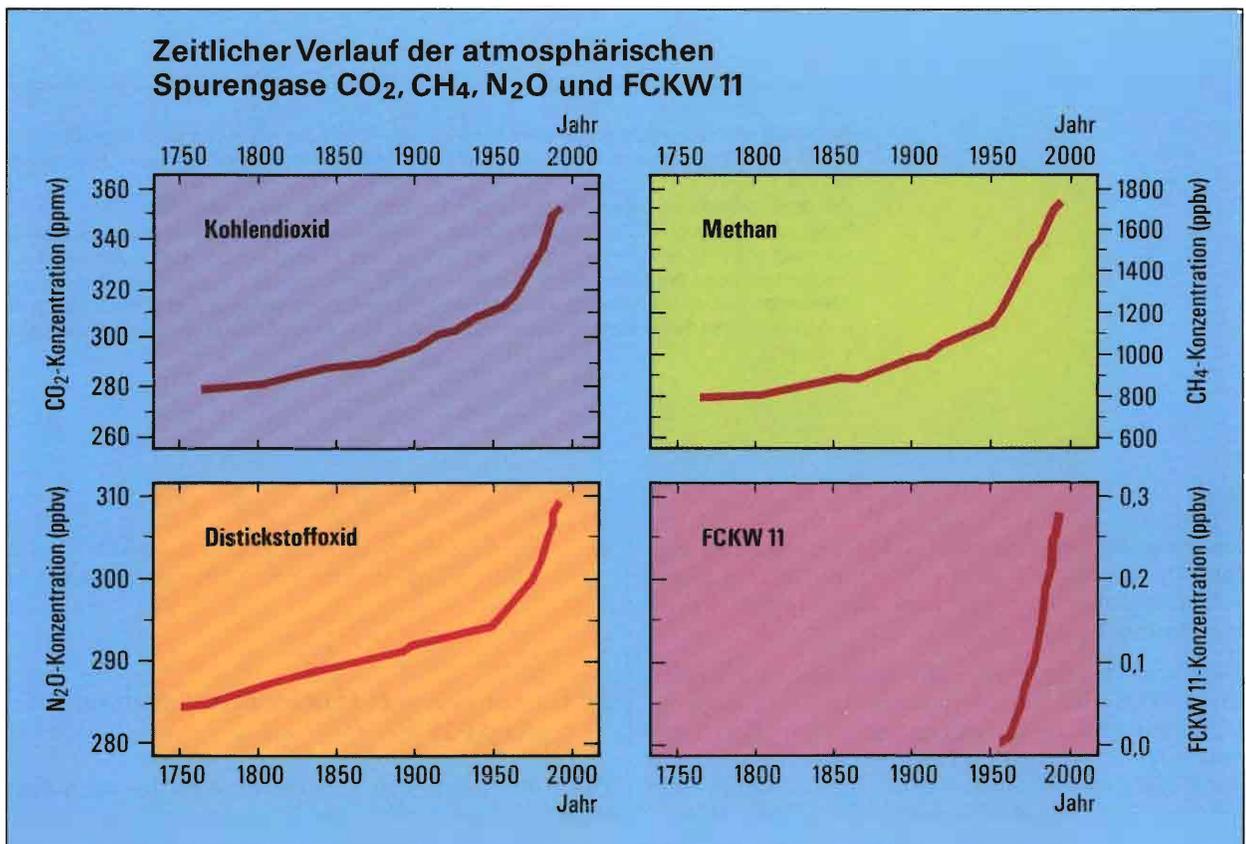


Abb. 2.6: Zeitlicher Verlauf der atmosphärischen Spurengase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und FCKW 11 seit 1750. Bemerkenswert ist der beschleunigte Anstieg für alle Gase von ca. 1950 an. (Quelle: IPCC WG I)

die Nordhemisphäre beschränkte Anstieg des troposphärischen Ozons. Alle diese Gase sind primär für den zusätzlichen, anthropogenen Treibhauseffekt verantwortlich.

### Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

Nach dem troposphärischen Wasserdampf ist CO<sub>2</sub> das wichtigste klimarelevante Spurengas, dessen mittleres troposphärisches Mischungsverhältnis von 280 ppmv im vorindustriellen Zeitalter auf inzwischen 355 ppmv oder um 25 % angestiegen ist. Damit ist ein Wert erreicht worden, der zu keinem Zeitpunkt in den vergangenen 160 000 Jahren aufgetreten ist. Gegenwärtig steigt das mittlere troposphärische CO<sub>2</sub>-Mischungsverhältnis jährlich um 0,5 % oder derzeit 1,6–1,8 ppmv an. Setzt sich dieser Trend fort, wird das CO<sub>2</sub> um das Jahr 2050 einen Wert von ca. 450 ppmv erreicht haben. Die Verweilzeit des anthropogenen CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre ist hoch und wird je nach Beachtung und Wichtung der Zwischenspeicher Tiefsee und terrestrische Biosphäre auf 50–200 Jahre geschätzt (10,1). Trotz ungleicher geographischer Verteilung von Quellen und Senken ist das troposphärische CO<sub>2</sub> relativ gleichmäßig horizontal und vertikal verteilt. Das CO<sub>2</sub>-Mischungsverhältnis unterliegt einem Jahresgang, der durch die terrestrische Biosphäre bestimmt und in der Nordhemisphäre besonders stark ausgeprägt ist. Maximale Werte werden im Frühjahr, Minima dagegen im Herbst beobachtet.

Als eine wesentliche, bis vor kurzer Zeit nicht gebührend berücksichtigte Information über den Kohlenstoffkreislauf muß der zwar kleine, aber eindeutig feststellbare Gradient des CO<sub>2</sub> zwischen der Nord- und der Südhemisphäre gewertet werden. Dieser Gradient betrug in den 80er Jahren etwa 3 ppmv. Modellrechnungen auf der Basis der bekannten geographischen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe und relativ gleichförmig global verteilter CO<sub>2</sub>-Senken ergeben aber einen interhemisphärischen Gradienten von 5 ppmv. Aus dieser Diskrepanz kann auf die Existenz einer starken CO<sub>2</sub>-Senke (2–3 Gigatonnen C pro Jahr) in der nördlichen Hemisphäre geschlossen werden (14).

Zwei kürzlich erschienene Studien, die diese Informationen berücksichtigt haben, sind unter Zuhilfenahme weiterer Beobachtungsdaten zu zwei gegensätzlichen Einschätzungen der relativen Rolle der Land-Biosphäre gegenüber derjenigen der Hydrosphäre (Ozeane) gelangt:

Tans, Fung und Takahashi (15) basierten ihre Analyse auf Meßdaten über den regionalen CO<sub>2</sub>-Fluß Atmosphäre-Ozean im Nordatlantik und im Nordpazifik und kamen durch Extrapolation zu einer Bilanz der Ozeane in der Nordhemisphäre. Dabei ergab sich für die CO<sub>2</sub>-Nettoaufnahme nördlich von 15 °N ein Wert von weniger als 0,7 Gigatonnen C pro Jahr. Dieser relativ kleine Wert wurde als Hinweis auf die Existenz einer CO<sub>2</sub>-Senke von 2 Gigatonnen C pro Jahr in der Landbiosphäre der mittleren nördlichen Breiten interpretiert.

Keeling, Piper und Heimann (16) berücksichtigten in ihrer Analyse neben dem Nord-/Südgradienten des

CO<sub>2</sub> in der Troposphäre auch den entsprechenden Gradienten des <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C-Isotopenverhältnisses im CO<sub>2</sub>. Dieses Isotopenverhältnis wird in erster Linie durch die relativen Beiträge von CO<sub>2</sub> aus fossilen bzw. rezenten biologischen Quellen bestimmt. Nach Auswertung der verfügbaren Daten haben Keeling und Kollegen ausgeschlossen, daß es in der Nordhemisphäre eine dominante biosphärische CO<sub>2</sub>-Senke gibt.

Zu diesen sich widersprechenden Schlußfolgerungen kommt hinzu, daß der beobachtete Anstieg des mittleren troposphärischen CO<sub>2</sub>-Mischungsverhältnisses weniger steil ist, als durch Modellrechnungen prognostiziert (1). Dies könnte auch an einer möglichen Unterschätzung des Aufnahmevermögens der Ozeane liegen. Diese Differenzen machen deutlich, daß der globale CO<sub>2</sub>-Kreislauf noch weitgehend unverstanden ist.

### Methan (CH<sub>4</sub>)

Das atmosphärische CH<sub>4</sub> ist ein sowohl direkt wie indirekt wirksames klimarelevantes Spurengas. Sein mittleres troposphärisches Mischungsverhältnis hat heute einen Wert von 1,74 ppmv erreicht und liegt damit um mehr als Faktor zwei über dem vorindustriellen Wert von 0,8 ppmv. Die höchsten troposphärischen CH<sub>4</sub>-Mischungsverhältnisse werden in der Nordhemisphäre beobachtet, für die der hemisphärische Mittelwert bei 1,78 ppmv liegt. Der südhemisphärische Mittelwert beträgt 1,70 ppmv. Wie beim CO<sub>2</sub> tritt auch beim CH<sub>4</sub> ein ausgeprägter Jahresgang in der Troposphäre auf, mit einem Maximum im Frühjahr und einem Minimum im Herbst. Dieser Jahresgang wird sowohl durch die zeitlichen Variationen der CH<sub>4</sub>-Quellstärken als auch durch die zeitlich variierende Senkenstärke, d. h. durch die saisonalen Schwankungen der OH-Radikalkonzentrationen in der Troposphäre bestimmt.

Das atmosphärische Methan wird durch mehrere Quellen an der Erdoberfläche produziert, deren Stärken noch unzureichend bekannt sind. Kürzlich haben Vaghjani und Ravishankara (17) nachgewiesen, daß die Geschwindigkeit der Reaktion von CH<sub>4</sub> mit atmosphärischen OH-Radikalen bisher um bis zu 25 % überschätzt worden war. Da diese Reaktion die Hauptsenke des atmosphärischen CH<sub>4</sub> darstellt, mußten auch die Abschätzungen der Quellstärken entsprechend revidiert werden (18). Der Schätzwert für die atmosphärische CH<sub>4</sub>-Verweilzeit liegt jetzt bei 10 ± 2 Jahren.

Das mittlere troposphärische CH<sub>4</sub>-Mischungsverhältnis ist in dem Zeitabschnitt von 1962 bis 1979 um ca. 1 % pro Jahr angestiegen. Der Anstieg hat sich in den letzten Jahren auf ca. 0,8 % pro Jahr verlangsamt (19, 20, 21). Dieses kann an einer Abnahme der Emissionen aus natürlichen und anthropogenen Quellen liegen. Noch wahrscheinlicher ist ein verstärkter CH<sub>4</sub>-Abbau aufgrund der anzunehmenden Zunahme der troposphärischen OH-Radikale, vor allem in der nördlichen Hemisphäre (1).

Durch seine Rolle bei der photochemischen Ozonbildung beeinflusst das CH<sub>4</sub> das Oxidationspotential der

Troposphäre, das sich wiederum auf die Konzentration und Verteilung anderer klimarelevanter Spurengase und damit indirekt auf den Strahlungshaushalt auswirkt. Durch seine Oxidation in der Stratosphäre trägt das atmosphärische  $\text{CH}_4$  auch wesentlich zur Wasserdampfbildung in diesen Höhen bei und nimmt damit auch wieder Einfluß auf den Treibhauseffekt. Diese indirekten Beiträge des  $\text{CH}_4$  werden auf etwa 2/3 des direkten Anteils geschätzt (1). Dabei ist die vertikale Verteilung von Ozon und Wasserdampf berücksichtigt worden, die in der Nähe der kalten Tropopause besonders wirksam sind.

### Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ )

Das atmosphärische  $\text{N}_2\text{O}$  steigt gegenwärtig mit etwa 0,8 ppbv pro Jahr an. Sein mittleres globales troposphärisches Mischungsverhältnis liegt heute (1991) bei 311 ppbv. Der atmosphärische Kreislauf des  $\text{N}_2\text{O}$  und hier insbesondere die einzelnen Quell- und Senkenstärken sind nur unzureichend bekannt. Nach den z.Zt. vorliegenden, noch höchst ungenauen Daten wird die Senkenstärke einschließlich der Akkumulierung von  $\text{N}_2\text{O}$  in der Atmosphäre auf insgesamt etwa 20 Millionen Tonnen  $\text{N}_2\text{O}$  pro Jahr geschätzt. Diesem Wert steht eine Quellstärke von insgesamt lediglich 8–19 Millionen Tonnen  $\text{N}_2\text{O}$  pro Jahr gegenüber (22). Es ist deshalb anzunehmen, daß die globale Stärke der bisher bekannten Quellen entweder unterschätzt worden ist oder noch weitere Quellen existieren, die bisher in der Bilanzierung des atmosphärischen  $\text{N}_2\text{O}$ -Haushalts nicht berücksichtigt worden sind.

### Halogenierte Kohlenwasserstoffe

Die halogenierten Kohlenwasserstoffe gehören zu den klimarelevanten Spurengasen mit dem höchsten Treibhauspotential, das durch hohe Strahlungswirksamkeit verbunden mit langen atmosphärischen Verweilzeiten bestimmt wird. Die vollhalogenierten (FCKW) und der größte Teil der teilhalogenierten Kohlenwasserstoffe (H-FCKW) haben keine natürlichen Quellen. Sie sind ausschließlich industrieller Herkunft und werden entweder direkt (z. B. durch Verwendung als Reinigungsmittel oder Treibgas) oder zu einem späteren Zeitpunkt (z. B. bei der Verschrottung FCKW- bzw. H-FCKW-haltiger Produkte) in die Atmosphäre emittiert. Die atmosphärischen Mischungsverhältnisse steigen in beträchtlichem Maße an. Das gilt sowohl für die FCKW (z. B. FCKW 11, 12, 113), die erst in der Stratosphäre photolytisch abgebaut werden, als auch für die H-FCKW (z. B. H-FCKW 22), die zum großen Teil bereits in der Troposphäre photochemisch zerstört werden. Über natürliche Quellen (Ozeane, Biomasse-Verbrennung) verfügen nur das Methylchlorid ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), das Methylbromid ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ) und das Methyljodid ( $\text{CH}_3\text{J}$ ).

Zusätzlich zu ihrer Klimawirksamkeit tragen die FCKW und die verwandten bromhaltigen Verbindungen (z. B. Halon 1211) als Vorläufer des reaktiven Chlors und Broms zu der zunehmend schnelleren Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht bei.

Das reaktive Brom ist besonders gefährlich, da es das Ozon 30–120 mal effektiver zerstört als das reaktive Chlor. Von besonderer Bedeutung sind heterogene chemische Prozesse an den Oberflächen stratosphärischer Teilchen (Aerosolteilchen und Eiswolken), durch die die Ozon-Zerstörung beschleunigt wird. Die heterogenen Reaktionen werden auch für die Ausbildung des antarktischen „Ozonlochs“ verantwortlich gemacht.

Das mittlere stratosphärische Mischungsverhältnis des durch die Photolyse der halogenierten Verbindungen in der Stratosphäre gebildeten reaktiven Chlors hatte 1990 einen Wert von 3,3 ppbv erreicht. Bis zum Jahre 2000 wird mit einer weiteren Zunahme auf 4,1 ppbv gerechnet, wenn der Ausstieg aus der FCKW-Produktion nicht schneller, als im Montrealer Protokoll (2. Londoner Vertragsstaatenkonferenz, 1990) festgelegt, vollzogen wird und wenn die Emission von H-FCKW 22 mit einer jährlichen Rate von 3 % zwischen den Jahren 1990 und 2000 ansteigt, aber sonst keine weitere Substitution von FCKW durch H-FCKW erfolgt. Unter diesen Umständen kann man in den 90er Jahren vergleichbar hohe Ozonverluste erwarten wie in den 80er Jahren. Dieses setzt voraus, daß sich der heterogene Ozon-Abbau in der Stratosphäre nicht prinzipiell ändert. Die Zunahme von Sulfatteilchen in der Stratosphäre – sowohl kurzfristig als Folge der Injektion größerer Mengen schwefelhaltiger Gase durch die kürzliche Eruption des Pinatubo als auch längerfristig durch die Zunahme des sog. stratosphärischen Hintergrund-Aerosols, u. a. durch den Flugverkehr, in der unteren Stratosphäre – läßt jedoch einen schnelleren Abbau des stratosphärischen Ozons erwarten.

Eine Rückkehr des derzeitigen stratosphärischen Chlor-Gehalts aufgrund der vereinbarten Emissionsminderungen auf den vor dem Auftreten des antarktischen Ozonloches gemessenen Wert von 2 ppbv wird erst für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts prognostiziert (23). Das natürliche Hintergrund-Mischungsverhältnis, das überwiegend durch das  $\text{CH}_3\text{Cl}$  aus den Ozeanen bestimmt wird, liegt bei etwa 0,6 ppbv (10).

Die mittleren troposphärischen Mischungsverhältnisse und Anstiegsraten ausgewählter halogener Kohlenwasserstoffe sowie deren Ozonzerstörungs- und Treibhauspotentiale sind in Tab. 2.2 zusammengestellt.

#### 2.2.1.3 Ozon ( $\text{O}_3$ )

Unter den klimarelevanten Spurengasen nimmt das  $\text{O}_3$  aus verschiedenen Gründen eine Sonderstellung ein. Zum einen ist Ozon eine sehr reaktive Verbindung und daher ziemlich kurzlebig (Lebenszeit: 2–3 Monate in der freien Troposphäre, 1–2 Tage in Bodennähe). Zum andern ist es eine wichtige Vorläufer-Verbindung der OH-Radikale, die bei vielen photochemischen Prozessen und damit für die chemische Zusammensetzung der Troposphäre von großer Bedeutung ist. Das Ozon gehört zu den Gasen, die keine (direkten) Quellen an der Erdoberfläche besitzen und ausschließlich durch photochemische Pro-

Tabelle 2.2

**Mischungsverhältnis und Trends verschiedener FCKW, H-FCKW und anderer Verbindungen sowie deren Ozonzerstörungs- und Treibhauspotential**

	Mischungsverhältnis (pptv)	jährliche Zuwachsrates (pptv)	(%)	Verweilzeit (Jahre)	Ozonzerstörungs-potential <sup>1)</sup>	Treibhaus-potential (Zeithorizont 100)	
CCl <sub>3</sub> F	FCKW 11	280	9—10	4	65	1	3 500
CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	12	484	17—18	4	130	0,9	7 300
CClF <sub>3</sub>	13	5	—	—	400	—	—
C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	113	60	6	10	90	0,8—0,9	4 200
C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	114	15	—	—	200	0,6—0,8	6 900
C <sub>2</sub> ClF <sub>5</sub>	115	5	—	—	400	0,3—0,4	6 900
CCl <sub>4</sub>		146	1—1,5	1,5	50	1,0—1,2	1 300
CHClF <sub>2</sub>	H-FCKW 22	122	5—6	7	15	0,04—0,06	1 500
CH <sub>3</sub> Cl		600	—	—	1,5	—	—
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>		158	4—5	4	7	0,13—0,16	100
CB-ClF <sub>2</sub>	Halon 1211	1,7	0,4—0,7	12	25	3,0	—
CBrF <sub>3</sub>	Halon 1301	2,0	0,2—0,4	15	110	7,8	5 800
CH <sub>3</sub> Br		10—15	—	—	1,5	—	—

1) Das Ozonzerstörungs-potential wurde mit Hilfe 2-dimensionaler Modelle berechnet. FCKW 11 wurde dabei als Bezugsgröße gewählt.

2) Das Treibhauspotential ist bezogen auf die gleichen Maße CO<sub>2</sub> (kg) integriert über einen Zeitraum von 100 Jahren.

Quellen: IPCC WGI, 1992

III. Bericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“

zesse in der Atmosphäre gebildet werden (in der Stratosphäre überwiegend durch Photolyse von molekularem Sauerstoff, in der Troposphäre durch Photolyse von NO<sub>2</sub>). Die zeitlichen Trends der O<sub>3</sub>-Konzentrationen in der Stratosphäre und in der Troposphäre sind grundverschieden. Während in der Stratosphäre eine globale Abnahme beobachtet wird, nimmt die O<sub>3</sub>-Konzentration in der Troposphäre, zumindest in der Nordhemisphäre zu. Die O<sub>3</sub>-Gesamtmenge in der Atmosphäre (90 % davon befinden sich in der Stratosphäre und 10 % in der Troposphäre) wirkt als Filter für die harte UV-Strahlung der Sonne und ermöglicht dadurch die Existenz des heute auf den Kontinenten angetroffenen Lebens. Dagegen wirkt das troposphärische O<sub>3</sub> bereits in relativ kleinen Konzentrationen (≥60 ppbv) toxisch auf Menschen, Fauna und Flora.

**Ozon in der Stratosphäre**

Etwa 90 % des gesamten atmosphärischen Ozons befinden sich in der Stratosphäre, wo das O<sub>3</sub> durch Photolyse des molekularen Sauerstoffs mit anschließender Rekombination der dabei gebildeten Sauerstoffatome mit molekularem O<sub>2</sub> produziert wird. Die Ozonschicht in der Stratosphäre hat in den letzten 20 Jahren deutlich abgenommen. Erhebliche O<sub>3</sub>-Verluste wurden vor allem in mittleren und hohen Breiten beider Hemisphären beobachtet (23,24). Dagegen blieb das O<sub>3</sub> in der tropischen Stratosphäre praktisch unverändert. Die O<sub>3</sub>-Verluste sind jahreszeitabhängig – am stärksten in den Winter- und Frühlingsmonaten, etwas weniger stark während der

Sommermonate. Tabelle 2.3 zeigt die Zeittrends, die kürzlich für die Zeitspanne 1979–1991 ermittelt worden sind. Diese Werte deuten auf eine Verstärkung der O<sub>3</sub>-Abnahme in der Stratosphäre um annähernd Faktor 2 gegenüber früheren Analysen hin. Dieser O<sub>3</sub>-Verlust tritt vorwiegend in der unteren Stratosphäre zwischen 13 und 25 km (in mittleren Breiten) auf, in denen lokale O<sub>3</sub>-Abnahmen von bis zu 10 % pro Jahrzehnt beobachtet wurden. Gleichzeitig hat sich die Stratosphäre im globalen Mittel mit 0,3 °C pro Jahrzehnt abgekühlt (23).

Tabelle 2.3

**Zeittrends des gesamten atmosphärischen Ozons für den Zeitabschnitt 1979–1991**

Angaben in Prozent pro Jahrzehnt (23)

Jahreszeit	45°S	Äquator	45°N	26 bis 64°N Dobson u. a.
	←TOMS-Messungen→			
Dezember bis März . . . . .	-5.2	+0.3	-5.6	-4.7
Mai bis August . . .	-6.2	+0.1	-2.9	-3.3
September bis November . . . . .	-4.4	+0.3	-1.7	-1.2

Mit den vorhandenen chemisch-dynamischen Modellen der Atmosphäre lassen sich diese starken

O<sub>3</sub>-Verluste nur zum Teil erklären. Das kann daran liegen, daß

- ozonarme und chemisch gestörte Luftmassen aus polaren Breiten in mittlere Breiten transportiert werden, was von den Modellen nicht adäquat simuliert wird, oder daß
- die zum Ozon-Abbau beitragenden, heterogenen chemischen Prozesse am globalen Sulfat-Aerosol in der Stratosphäre wesentlich effektiver sind, als bisher angenommen wurde (25, 26).

Dramatische Abnahmen des stratosphärischen Ozons wurden in den Frühlingsmonaten über der Antarktis beobachtet, die dort zur Ausbildung des sogenannten antarktischen Ozonlochs führten. Die im Oktober 1991 beobachteten Werte (23) zeigten eine minimale vertikale Säulendichte von 110 Dobson-Einheiten, die einem Verlust von 60 % gegenüber dem langjährigen Mittelwert für diese Jahreszeit (bis zum Ende der 70er Jahre) entspricht. Das Gebiet mit vertikalen O<sub>3</sub>-Säulendichten von kleiner als 200 Dobson-Einheiten weist inzwischen eine Fläche von 16 Millionen km<sup>2</sup> auf und entspricht damit etwa 6,5 % der Gesamtfläche der Südhemisphäre.

Die O<sub>3</sub>-Verluste in der winterlichen Stratosphäre über der Arktis sind dagegen erheblich geringer. Modellrechnungen ergaben räumlich begrenzte O<sub>3</sub>-Verluste von etwa 10 % (Mini-Löcher) über eine Zeitspanne von einem Monat. Direkte Messungen ergaben ebenfalls Werte in dieser Größenordnung.

Weitere Einzelheiten zum stratosphärischen Ozonabbau in Kap. 3.1.

### Ozon in der Troposphäre

Die in der Troposphäre angetroffenen Ozonkonzentrationen werden durch den Eintrag aus der Stratosphäre und durch die photochemische Bildung in der Troposphäre bestimmt. Der Eintrag aus der Stratosphäre erfolgt durch Luftmassenaustausch zwischen Troposphäre und Stratosphäre in mittleren bis hohen Breiten beider Hemisphären. Dieser Transport ist auf der Nordhalbkugel im Frühjahr besonders stark ausgeprägt. Zusätzlich wird troposphärisches O<sub>3</sub> bei der photochemischen Oxidation von CO, CH<sub>4</sub> und höheren flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in der Troposphäre gebildet, sofern das NO<sub>x</sub>-Mischungsverhältnis einen Wert von 10 pptv überschreitet. Dabei sind die reaktiven VOC für die O<sub>3</sub>-Bildung innerhalb der planetarischen Grenzschicht (unterste Schicht der Troposphäre) und die langlebigeren Spurengase CO und CH<sub>4</sub> für die O<sub>3</sub>-Bildung in der freien Troposphäre von Bedeutung. Unterschreitet das NO<sub>x</sub>-Mischungsverhältnis den Wert von 10 pptv, wird Ozon nicht mehr gebildet, sondern abgebaut.

Wegen der relativ kurzen atmosphärischen Lebenszeit des O<sub>3</sub>, der ungleichmäßigen geographischen Verteilung der Quellen, der (z. T. ebenfalls recht kurzlebigen) Vorläufer NO<sub>x</sub> und VOC und der sehr variablen Intensität der solaren Strahlung zeigen die O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnisse in der Troposphäre starke regionale Unterschiede. Sie variieren mit der geogra-

phischen Länge und Breite sowie mit der Höhe und Jahreszeit. In reinen Luftmassen der Nordhemisphäre schwanken die O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnisse zwischen 30 und 50 ppbv mit deutlichen Maxima im Frühling und Sommer. In verschmutzten Luftmassen können bei „Smog“-Wetterlagen Werte von mehr als 100 ppbv erreicht werden. In den Tropen sind die O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnisse gewöhnlich deutlich niedriger als in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre. Dieses gilt jedoch nicht für die Trockenzeit, während der bei der großflächigen Verbrennung von Biomasse erhebliche Mengen von O<sub>3</sub>-Vorläufern emittiert werden. In den davon beeinflussten Gebieten können die O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnisse Werte erreichen wie über den Industriegebieten der mittleren Breiten im Sommer. Dagegen können die O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnisse in sauberen kontinentalen und maritimen Luftmassen der Tropen bis auf Werte von 4–12 ppbv absinken (10).

Abb. 2.7 zeigt den Jahresgang der O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnisse in den mittleren Breiten beider Hemisphären. Beachtenswert ist der unterschiedliche Verlauf während der Sommermonate. Der starke Einfluß anthropogener Vorläufer auf die photochemische O<sub>3</sub>-Bildung in der Nordhemisphäre ist die naheliegendste Erklärung für die interhemisphärischen Unterschiede.

Seit der Industrialisierung sind die mittleren Ozon-Mischungsverhältnisse in bodennahen Luftmassen der Nordhemisphäre von 5–15 ppbv (27) auf die heutigen Werte von 40–50 ppbv angestiegen. In den letzten 20 Jahren hat das O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnis in der freien Troposphäre in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre im Mittel um etwa 1 % pro Jahr zugenommen (23).

### Wirkung des Ozons auf den Strahlungshaushalt

Die vom Menschen verursachte Änderung der vertikalen Verteilung des Ozons macht eine differenzierte Betrachtung der daraus resultierenden Strahlungswirkung erforderlich. Der Ozonverlust in der unteren Stratosphäre bewirkt eine Zunahme der langwelligen Ausstrahlung des Systems Oberfläche/Troposphäre (negativer Treibhauseffekt) und gleichzeitig eine Abkühlung der unteren Stratosphäre aufgrund verminderter Absorption von solarer Strahlung. Letztere hat dort zu einer mittleren, globalen Abkühlung von 0,3 °C pro Jahrzehnt geführt (23).

Die Zunahme des Ozons in der Troposphäre (aber auch die Abnahme des Ozons in der oberen Stratosphäre) führt dagegen zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Die Verstärkung des Treibhauseffektes ist besonders wirksam, wenn das O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnis in der sehr kalten, oberen Troposphäre ansteigt. Hier spielen die Emissionen des Flugverkehrs eine wichtige Rolle.

Die breitenabhängige Ozonabnahme (s. o.) hat den zusätzlichen Treibhauseffekt ebenfalls breitenabhängig gemacht. Dazu liegen jedoch noch keine vollständigen Rechnungen mit Klimamodellen vor. Erste Abschätzungen mit eindimensionalen Modellen deuten daraufhin, daß der Abkühlungseffekt durch die

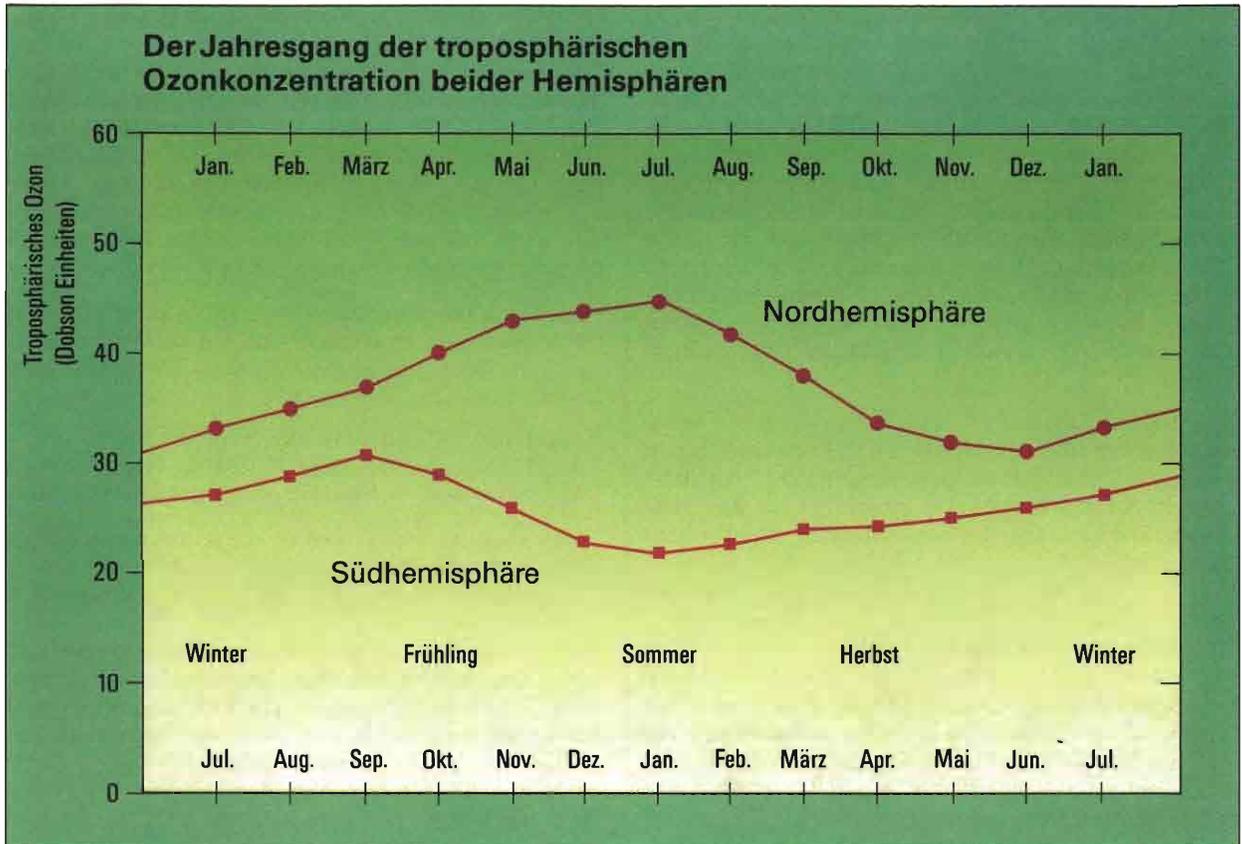


Abb. 2.7: Der Jahresgang der troposphärischen Ozonkonzentration in den mittleren Breiten beider Hemisphären (35°–45°). Zum besseren Verständnis sind die beiden Jahresgänge um 6 Monate gegeneinander versetzt aufgetragen. (entnommen Fishman, 1992)

stratosphärischen O<sub>3</sub>-Verluste in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre etwas größer als der Erwärmungseffekt des zunehmenden troposphärischen O<sub>3</sub> ist. Auch der zusätzliche Treibhauseffekt der FCKW und H-FCKW in der Troposphäre kann in diesen Breiten gegenwärtig die Abkühlung möglicherweise nicht ganz kompensieren (28). Daraus sollte jedoch nicht der Schluß gezogen werden, daß die Klimaänderung durch die FCKW und ihre Abbauprodukte kompensatorisch wirkt, denn es ist eine neuartige, stark breitenabhängige Störung des Strahlungshaushaltes damit verbunden.

#### 2.2.1.4 Indirekt klimawirksame Spurengase

Neben den direkt klimawirksamen atmosphärischen Spurengasen gibt es eine Reihe anderer gasförmiger Verbindungen, die einen indirekten Einfluß auf den Strahlungshaushalt des Systems Erdoberfläche-Atmosphäre ausüben, indem sie die Ozonkonzentrationen in der Troposphäre und Stratosphäre ändern, die Verteilung und Konzentrationen der OH-Radikale beeinflussen oder zu einer zusätzlichen Bildung von Aerosolteilchen führen.

Diese indirekt klimawirksamen Spurengase haben in der Regel eine kurze atmosphärische Verweilzeit von weniger als drei Monaten. Damit sind große räumliche

und zeitliche Variationen ihrer Konzentrationen verbunden, aus denen sich in Anbetracht der bisherigen kurzen Meßreihen keine gesicherten Aussagen über die globalen Zeittrends ihrer atmosphärischen Mischungsverhältnisse ableiten lassen.

#### Kohlenmonoxid (CO)

Das troposphärische CO hat eine Verweilzeit von ein bis drei Monaten. Die CO-Mischungsverhältnisse in der Troposphäre zeigen im Frühjahr maximale und im Frühherbst minimale Werte. Auf der Nordhalbkugel schwanken die CO-Werte in wenig verschmutzten Luftmassen zwischen 100 und 150 ppbv, während auf der Südhalbkugel Werte zwischen 40 und 80 ppbv gemessen werden (29). In Großstädten und industriellen Ballungsgebieten treten kurzzeitig wesentlich höhere Mischungsverhältnisse von 1 bis 10 ppmv auf (10). In der Troposphäre über dicht besiedelten Gebieten und in der Stratosphäre nehmen die CO-Mischungsverhältnisse mit der Höhe ab. In den Reinluftgebieten der Nordhemisphäre wird eine geringere Abnahme des troposphärischen CO mit der Höhe beobachtet. In der Südhemisphäre scheint das CO in der Troposphäre vertikal gut durchmischt zu sein. Aufgrund der jahreszeitlichen Variationen ist der Unterschied der CO-Mischungsverhältnisse zwischen Nord- und Südhemisphäre im April besonders groß.

Das CO wird von einer Vielzahl unterschiedlicher Quellen an der Erdoberfläche gebildet und in die Troposphäre emittiert. Zusätzlich entsteht CO auch bei der photochemischen Oxidation von Methan und VOC. Etwa 60 Prozent der insgesamt auf 2400 Millionen Tonnen geschätzten, weltweiten CO-Nettoproduktion sind auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen. Die wichtigste CO-Senke ist die Reaktion mit OH-Radikalen, die für den Abbau von ca. 2 100 Millionen Tonnen CO pro Jahr verantwortlich ist. In geringerem Umfang wird CO auch durch mikrobielle Prozesse in Böden abgebaut. Ein kleiner Teil gelangt in die Stratosphäre, wo er schnell zu CO<sub>2</sub> oxidiert wird (10).

Aus den vorliegenden Meßdaten wird auf eine Zunahme der troposphärischen CO-Konzentrationen in der Nordhemisphäre geschlossen. Der jährliche Zuwachs wird auf etwa 1 % geschätzt. In der Südhemisphäre ist bisher kein eindeutiger Trend nachweisbar (1).

### Stickstoffoxide (NO und NO<sub>2</sub>)

Die Stickstoffoxide NO und NO<sub>2</sub> sind sehr reaktive Verbindungen. Da sich in der Atmosphäre tagsüber zwischen beiden Verbindungen sehr schnell ein (photochemisches) Gleichgewicht einstellt, werden die beiden Spurengase unter der Bezeichnung „NO<sub>x</sub>“ (Stickoxide) meistens zusammen betrachtet. Die troposphärische Verweilzeit von NO<sub>x</sub> ist mit ca. einem Tag sehr kurz. Wegen dieser kurzen Verweilzeit sowie der komplexen Verteilung der Quellen und Senken zeigen die troposphärischen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen sehr starke räumliche und zeitliche Variationen. Die niedrigsten NO<sub>x</sub>-Mischungsverhältnisse mit Werten von kleiner als 1 pptv werden in extrem reinen maritimen Luftmassen beobachtet. Dagegen erreichen die NO<sub>x</sub>-Mischungsverhältnisse in verschmutzter Luft (z. B. über Europa und dem östlichen Nordamerika) Werte von mehr als 10 ppbv. In der freien Troposphäre oberhalb der planetarischen Grenzschicht werden NO<sub>x</sub>-Werte von unter 20 pptv in Reinform bis über 5 ppbv über den dicht besiedelten Gebieten der stark industrialisierten Länder gemessen (10).

Das troposphärische NO<sub>x</sub> wird durch verschiedene Quellen an der Erdoberfläche produziert und nahezu ausschließlich als NO emittiert. Nach den z. T. noch ziemlich unsicheren Emissionsdaten wird die globale NO<sub>x</sub>-Emission auf etwa 50 Millionen Tonnen Stickstoff (N) pro Jahr geschätzt. Davon kommen ca. 60 Prozent aus anthropogenen Quellen. Das meiste NO<sub>x</sub> stammt aus Verbrennungsprozessen (Verbrennung von fossilen Brennstoffen und von Biomasse). Einen besonderen Stellenwert hat die flugzeugbedingte NO<sub>x</sub>-Emission, die nahezu ausschließlich in der oberen Troposphäre und der unteren Stratosphäre erfolgt. Die indirekte Klimawirksamkeit des in diesen Höhen emittierten NO<sub>x</sub> ist deutlich höher als die der in der unteren Troposphäre wirksamen Stickoxide, weil die Verweilzeit des NO<sub>x</sub> in der Reiseflughöhe der Flugzeuge mit acht Tagen relativ lang und das in dieser Höhe unter der Mitwirkung des NO<sub>x</sub> gebildete Ozon besonders klimawirksam ist.

### Flüchtige organische Verbindungen (VOC)

Die in der Troposphäre auftretenden VOC (= Volatile Organic Carbons) gehören verschiedenen chemischen Klassen an (aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Aldehyde, Ketone, Fettsäuren u. a.). Dementsprechend sind ihre Ozonbildungspotentiale durchaus verschieden. Sinnvollerweise teilt man sie entsprechend ihrer Reaktionsgeschwindigkeiten mit OH-Radikalen und Ozon ein in

- langsam reagierende VOC mit troposphärischen Verweilzeiten von mehr als einer Woche (z. B. Äthan, Acetylen, Propan, Benzol, Methanol, Aceton);
- reaktive VOC mit Verweilzeiten von einem halben Tag bis zu einer Woche (z. B. Pentan, Hexan, Äthen, Toluol, Xylole, Äthylalkohol, Methyläthylketon);
- sehr reaktive VOC mit Verweilzeiten von wenigen Stunden und kürzer (Propen und höhere Olefine, Terpene).

Die Konzentrationen und das räumlich-zeitliche Verhalten der verschiedenen organischen Verbindungen in der Troposphäre weichen stark voneinander ab. In der Regel liegen die VOC-Konzentrationen in der Südhemisphäre deutlich niedriger als in den mittleren bis hohen Breiten der Nordhemisphäre. Die VOC-Konzentrationen nehmen je nach VOC-Reaktivität mehr oder weniger schnell mit der Höhe ab. Über dem Nordatlantik spielt der Flugverkehr bei der vertikalen Verteilung der VOC eine Rolle. Die überwiegend anthropogenen VOC zeigen einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Jahresgang mit einem breiten Minimum in den Sommermonaten. Biologische Quellen für VOC sind die Vegetation und die Biota im Oberflächenwasser der Ozeane, vor allem in Küstennähe. Isopren und die Terpene stammen fast ausschließlich aus biologischen Quellen. Sie sind die reaktivsten troposphärischen VOC und daher praktisch nur in unmittelbarer Nähe ihrer Quellen zu messen (10).

### Schwefelhaltige Spurengase

Schwefelhaltige Spurengase modifizieren den Strahlungshaushalt der Erde durch ihre Oxidation zu Schwefelsäure und die anschließende Bildung von Sulfat-Aerosolteilchen

- direkt aufgrund ihres Streu- und Absorptionsvermögens hinsichtlich der einfallenden solaren Strahlung (siehe Abschnitt 2.1.2.1.),
- indirekt durch ihren Einfluß auf die zur Wolkenbildung führenden Kondensationsprozesse und damit auch auf die Streueigenschaften der Wolkentröpfchen (siehe Abschnitt 2.1.2.2.) sowie
- indirekt durch Beeinflussung der (heterogenen) chemischen Prozesse vor allem in der Stratosphäre (heterogene Ozonzerstörung).

Die hauptsächlich schwefelhaltigen Spurengase in der Troposphäre und Stratosphäre sind Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Dimethylsulfid (DMS), Schwefelwasser-

stoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und Karbonsulfid ( $\text{COS}$ ). Diese Verbindungen werden an der Erdoberfläche durch verschiedene Prozesse gebildet und in die Atmosphäre emittiert. Die wichtigsten anthropogenen Quellen sind die Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie landwirtschaftliche Aktivitäten. Schwefelhaltige Verbindungen werden auch durch natürliche mikrobielle Prozesse gebildet sowie bei vulkanischen Prozessen freigesetzt. Abgesehen vom  $\text{COS}$  ist die horizontale und vertikale Verteilung der schwefelhaltigen Verbindungen in der Troposphäre sehr inhomogen.

DMS und  $\text{H}_2\text{S}$  haben zu kurze Verweilzeiten in der Troposphäre (schneller photochemischer Abbau), um in die Stratosphäre gelangen zu können. Auch das am Boden emittierte  $\text{SO}_2$  wird bereits in der Troposphäre in Sulfataerosol umgewandelt und durch Niederschläge ausgewaschen. Eine Ausnahme bildet das  $\text{COS}$ , dessen Lebenszeit in der Größenordnung von einigen Jahren liegt und das zur Bildung der „Junge-Schicht“ (stratosphärische Aerosolschicht in 15–25 km Höhe) wesentlich beiträgt. Größere vulkanische Eruptionen wie der Ausbruch des El Chichón (1982) oder der Ausbruch des Pinatubo (1991) entwickeln genügend Energie, um größere Mengen von  $\text{SO}_2$  und  $\text{H}_2\text{S}$  bis in die Stratosphäre zu verfrachten. So nimmt der Aerosolgehalt in der „Junge-Schicht“ in Zeiten größerer vulkanischer Aktivität immer deutlich zu. In neuester Zeit wird auch das  $\text{SO}_2$  aus den Abgasen hochfliegender Flugzeuge als Quelle für dieses Sulfataerosol diskutiert (30). Neuere Messungen ergaben für das stratosphärische Hintergrund-Sulfataerosol in Zeiten ohne größere vulkanische Aktivität eine Zunahme von 5 % pro Jahr (31).

An der Oberfläche der hauptsächlich aus Schwefelsäure und Wasser (Verhältnis 3 : 1) bestehenden stratosphärischen Aerosolteilchen scheint das  $\text{NO}_2$  schnell in Salpetersäure umgewandelt zu werden (25,26) und steht dann für eine (temporäre) „Neutralisierung“ der ozonzerstörenden  $\text{Cl}$ - und  $\text{ClO}$ -Radikale nicht mehr ohne weiteres zur Verfügung. Dieses führt zu einem verstärkten Abbau der stratosphärischen Ozonschicht und wirkt auf diese Weise auch auf den Strahlungshaushalt.

### 2.2.1.5 Treibhauspotentiale

Die Klimawirksamkeit eines atmosphärischen Spurengases wird als Treibhauspotential (GWP = Global Warming Potential) bezogen auf  $\text{CO}_2$  (bei seinem gegenwärtigen mittleren troposphärischen Mischungsverhältnis) angegeben. Bei gleicher Anzahl von Molekülen ist das  $\text{CH}_4$ -Molekül etwa 21 mal wirksamer als Absorber von Wärmestrahlung als das  $\text{CO}_2$ -Molekül. Das FCKW 12-Molekül ist sogar etwa 15800 mal wirksamer. Auf diesen Werten basierend sind in Tab. 2.1 die mittleren Anteile der wichtigsten klimarelevanten atmosphärischen Spurengase am zusätzlichen, anthropogenen Treibhauseffekt in den achtziger Jahren aufgeführt. Danach entfallen auf  $\text{CO}_2$  ca. 50 %, auf  $\text{CH}_4$  13 %, auf  $\text{N}_2\text{O}$  5 % und auf troposphärisches Ozon 7 %. Die beiden FCKW 11 und 12 tragen mit 5 bzw. 12 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Der Beitrag aller FCKW beträgt insgesamt 22 %. Der stratosphärische Wasserdampf trägt 3 % bei.

Die aufgeführten GWP-Werte geben die relativen Beiträge der einzelnen klimarelevanten Spurengase zum zusätzlichen, anthropogenen Treibhauseffekt nur in angenäherter Weise wieder. Für eine korrekte Beschreibung der tatsächlichen Verhältnisse müssen auch die unterschiedliche zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Mischungsverhältnisse der einzelnen Spurengase (relativ zum  $\text{CO}_2$ ), ihre unterschiedliche räumliche Verteilung und mögliche Veränderungen ihrer Verweilzeiten in der Atmosphäre (z. B. aufgrund veränderter chemischer Prozesse) berücksichtigt werden. Das gilt natürlich auch für  $\text{CO}_2$ , das bei der Berechnung der GWP-Werte als Normierungsgröße dient. Die GWP-Werte müssen daher laufend nachkorrigiert werden.

Trotz dieser Probleme ist absehbar, daß  $\text{CO}_2$  wegen der hohen Emissionsraten und seiner verhältnismäßig langen Verweilzeit in der Atmosphäre auch weiterhin den zusätzlichen, anthropogenen Treibhauseffekt dominieren wird.

## 2.2.2 Weitere Einflußfaktoren auf das Klima

Außer den direkt und indirekt klimawirksamen Spurengasen, die im Abschnitt 2.1.1. behandelt wurden, soll im folgenden der aktuelle Kenntnisstand hinsichtlich einiger anderer, ebenfalls den Strahlungshaushalt der Erde beeinflussender Parameter wie Aerosolteilchen, Wolken, Oberflächenalbedo und solare Einstrahlung dargestellt werden. Diese Parameter beeinflussen den Strahlungshaushalt der Erde nicht nur durch Änderung der langwelligen terrestrischen Wärmestrahlung, sondern auch durch Änderung des von der Erde absorbierten solaren Strahlungsflusses. Diese Effekte können bisher bestenfalls in Richtung und Größenordnung ihrer Einflußnahme abgeschätzt werden. Nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnis dürfte aber der zusätzliche, anthropogene Treibhauseffekt, wenn man alle Klima-Einflußgrößen betrachtet, in den nächsten 100 bis 200 Jahren die dominierende Rolle spielen.

### 2.2.2.1 Aerosolteilchen

Feste und flüssige luftgetragene Teilchen im Größenbereich von 0,001 bis 100  $\mu\text{m}$  bezeichnet man als Aerosolteilchen. (Wolken-, Nebel- und Niederschlagstropfen sind per Definition keine Aerosolteilchen.) Größere natürliche Aerosolteilchenquellen sind die Winderosion auf den Kontinenten, vor allem in den Wüstenregionen (Staubstürme), und der sog. „sea spray“ über den Weltmeeren. Die verschiedenen menschlichen Tätigkeiten führen ebenfalls zur Emission von Aerosolteilchen – teilweise direkt, aber auch indirekt durch die Emission von Gasen, die in der Atmosphäre in (größere) Teilchen umgewandelt werden (gas-to-particle conversion). Anthropogene Aerosolteilchen-Emissionen werden vor allem in industriellen Ballungsgebieten beobachtet.

Wegen der kurzen troposphärischen Verweilzeiten von einigen Tagen bis Wochen (abhängig von der Injektionshöhe und der Auswaschung durch Niederschläge) und der inhomogenen Verteilung der Quel-

len weist die globale Aerosolteilchen-Verteilung in der Troposphäre starke räumlich-zeitliche Variationen auf. Über zeitliche Trends lassen sich keine verlässlichen Angaben machen. In einigen Industriegebieten wurde jedoch eine deutliche Zunahme der Aerosolteilchen-Konzentration beobachtet. So zeigen die seit 1948 im östlichen Teil Nordamerikas durchgeführten Sichtweitenmessungen, daß die Trübung in den Sommermonaten zugenommen hat (32). In anderen Industriegebieten ist die Aerosol-Belastung der bodennahen Luftschichten aber eher rückläufig oder der Trend zumindest nicht eindeutig.

Der wohl größte Effekt von troposphärischen Aerosolteilchen auf das Klima entsteht durch ihren Einfluß auf die Wolkenbildung, die optischen Eigenschaften von Wolken und auf die Niederschlagsbildung. Während in den bodennahen Luftschichten mit durchschnittlich 500 bis 1000 Teilchen pro  $\text{cm}^3$  über den Ozeanen und 10 000 bis 15 000 Teilchen pro  $\text{cm}^3$  über den Kontinenten meistens genügend Kondensationskerne vorhanden sind, enthält die mittlere und obere Troposphäre nur etwa 100 Teilchen pro  $\text{cm}^3$ . Über den Ozeanen und in der mittleren Troposphäre wird sich eine allgemeine Veränderung der Teilchen-Konzentrationen also besonders stark bei der Wolkenbildung bemerkbar machen. In kondensationskernarmen Luftmassen bewirkt eine Erhöhung der Aerosolteilchen-Konzentrationen nicht nur eine verstärkte Wolkenbildung, sondern oft auch eine Verschiebung des Tropfengrößenspektrums zu kleineren Tropfendurchmessern. Damit erhöht sich die Reflektivität (Albedo) der Wolken (33). Dieser Effekt kann aber den zusätzlichen, anthropogenen Treibhauseffekt durch den Anstieg der Spurengas-Mischungsverhältnisse in der Troposphäre höchstens in einigen Gebieten der nördlichen Hemisphäre kompensieren. Fraglich ist zudem, wie sich die Bewölkung (Bedeckungsgrad, Wolkentypen) insgesamt aufgrund der durch eine Klimaänderung veränderten dynamischen Bedingungen neu einstellen wird.

Die Verteilung der Aerosolteilchen-Konzentrationen in der Stratosphäre ist relativ homogen. Sie wird durch quasi kontinuierliche natürliche und anthropogene Emissionen von gasförmigen Vorläufern (vor allem  $\text{CO}_2$  und  $\text{SO}_2$ ) an der Erdoberfläche, durch die Emissionen des Flugverkehrs (mit steigender Tendenz) und zu bestimmten Zeiten durch größere vulkanische Eruptionen bestimmt. Die mittlere Verweilzeit von Aerosolteilchen in der Stratosphäre beträgt wenige Jahre. Die Ergebnisse von Messungen der sog. Hintergrundkonzentration während Zeiten geringer vulkanischer Aktivität zeigen einen Konzentrationsanstieg von 5 % pro Jahr (31). Wenn sich dieser Trend fortsetzen sollte, wäre in der Stratosphäre in wenigen Jahrzehnten eine Hintergrund-Aerosolteilchen-Konzentration erreicht wie nach einem großen Vulkanausbruch.

Der Ausbruch des Pinatubo auf den Philippinen im Juni 1991 hat nach Satelliten-Messungen (NIMBUS 7) ca. 20 Millionen Tonnen  $\text{SO}_2$  direkt in die Stratosphäre injiziert. Das sind 50 % mehr als durch die Eruption des El Chichón im Jahre 1982 (1).

Die Wirkung von Aerosolteilchen aus großen Vulkanausbrüchen auf den Strahlungshaushalt ist erwiesen.

Bedingt durch die geringe Teilchengröße (mittlerer Durchmesser ca. 0,5  $\mu\text{m}$ ) und die chemische Zusammensetzung (vorwiegend Schwefelsäuretröpfchen) wird das Sonnenlicht durch diese stratosphärischen Aerosolteilchen hauptsächlich gestreut. Die Absorption von langwelliger Strahlung ist dagegen gering. So ergibt sich insgesamt nach großen Vulkanausbrüchen eine Abkühlung an der Erdoberfläche. Neueste Ergebnisse von Modellrechnungen zum Pinatuboausbruch (allerdings ohne eine mögliche Dämpfung durch die Ozeane) prognostizieren eine Abkühlung von 0,3 bis 0,5  $^{\circ}\text{C}$  für die Nordhemisphäre in den nächsten zwei Jahren (34).

### 2.2.2.2 Wolken

Der Einfluß der Wolken und die damit verknüpften Rückkopplungen auf den Strahlungshaushalt und das Klima sind sehr komplex. Einerseits bewirkt die höhere Albedo einer Wolkenoberfläche eine im Vergleich zu den meisten Landoberflächen verstärkte Rückstrahlung der eingestrahelten Sonnenenergie und damit eine Dämpfung des Treibhauseffektes in den wolkenbedeckten Gebieten. Andererseits geben hochreichende Wolken weniger langwellige Strahlung ab und tragen somit zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes bei. Beide Effekte sind also in ihrer Klimawirkung gegenläufig. Bei den hohen Wolken, vor allem bei den Zirren (dünne Eiswolken in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre), überwiegt der Treibhauseffekt. Eine Zunahme der flächenhaften Ausdehnung der Zirren bewirkt daher eine Erwärmung. Hier spielen die Emissionen des Flugverkehrs (Wasserdampf und Partikel) mit großer Wahrscheinlichkeit eine nicht unwesentliche Rolle (35). Tiefliegende Wolken verursachen dagegen eher eine Abkühlung.

Für die Abschätzung der globalen Wirkung der Bewölkung im Strahlungshaushalt ist die Kenntnis der Häufigkeit und der globalen sowie regionalen Verteilung der verschiedenen Wolkentypen von entscheidender Bedeutung. Auswertungen von Satelliten-Meßdaten haben ergeben, daß im globalen Jahresmittel der Albedo-Effekt der Bewölkung und damit die Dämpfung des Treibhauseffektes überwiegt (36). Das gilt in besonderem Maße für die mittleren Breiten beider Hemisphären. In den tropischen Breiten heben sich dagegen Albedo- und Treibhauseffekt der Bewölkung nahezu auf. Daraus folgt, daß die Bewölkung der Erde in ihrer gegenwärtigen Form und Verteilung den mittleren meridionalen Energiebilanzgradienten verstärkt. Es sei an dieser Stelle zusätzlich darauf hingewiesen, daß Wolken auch die vertikale Verteilung der Energie im Klimasystem ändern. So beeinflussen sie im solaren Spektralbereich sehr nachhaltig die an der Erdoberfläche ankommende Sonnenstrahlung, was z. B. bei einer Veränderung der Bewölkungsverhältnisse insbesondere zu einer Veränderung der Erwärmung der Ozeane führen kann. Der Energiegewinn, den die Verminderung der langwelligen Ausstrahlung darstellt, kommt im wesentlichen der Atmosphäre zugute.

Die Frage, wie die Bewölkung auf die fortschreitende Erwärmung der Erdoberfläche reagiert, d. h. wie sich

Häufigkeit und Verteilung bestimmter Wolkentypen regional und global verändern, kann derzeit noch nicht schlüssig beantwortet werden. Prognosen werden dadurch zusätzlich kompliziert, daß nicht nur der Anstieg des Wasserdampfgehaltes in der Troposphäre, sondern auch andere anthropogene Einflußfaktoren wie der vermehrte Eintrag von Aerosolteilchen (Kondensationskernen) und eine möglicherweise vermehrte Zirrenbildung zu berücksichtigen sind.

### 2.2.2.3 Oberflächenalbedo

Die Oberflächenalbedo der Erde nimmt als Folge der Ausdehnung der Wüstengebiete, der Versalzung arider Böden, der Rodung großer Waldgebiete (in den Tropen, Kanada und Sibirien), der Verstädterung und der intensivierten Landwirtschaft zu. Der Effekt dieser Veränderungen wird für die vergangenen 1000 Jahre mit einer Zunahme von 0,6 % und allein für die letzten 20 Jahre mit 0,1 % angegeben (37).

Der daraus resultierende Effekt auf den Strahlungshaushalt der Erde ist aber eher gering. Jedoch wird die Energiebilanz der Erdoberfläche selbst stark beeinflusst. So führen veränderte Oberflächeneigenschaften zu signifikanten Änderungen beim Wasserhaushalt und bei der Bodenrauhigkeit. Jedoch sind diese Veränderungen in ihrer Nettowirkung auf die Energieflüsse an der Erdoberfläche nicht sicher abzuschätzen.

### 2.2.2.4 Solare Einstrahlung

Hauptenergiequelle für die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse an der Erdoberfläche und „Motor“ für die physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre ist die Sonne. Änderungen in der Energie-Einstrahlung können verständlicherweise das Klima nachhaltig beeinflussen. Die Ausstrahlung der Sonne ist zeitlichen Schwankungen mit verschiedenen Zeitskalen unterworfen. Kurzzeitige Schwankungen innerhalb von Tagen aufgrund von physikalischen Prozessen in der Photosphäre der Sonne haben offenbar keinen Einfluß auf das Klima. Der Einfluß des elfjährigen Sonnenfleckenzyklus ist auf seine Klimarelevanz hin untersucht worden. Dabei wurde festgestellt, daß die Einstrahlung am Oberrand der Atmosphäre mit der Anzahl der (dunklen) Sonnenflecken zunimmt (38). So nahm z. B. die mittlere Einstrahlung von 1980 bis 1986, dem elfjährigen Zyklus folgend, um 0,2 Watt pro  $m^2$  ab und anschließend wieder zu. Es ist jedoch auszuschließen, daß der 11jährige Zyklus einen nachhaltigen Einfluß auf das globale Klima hat, da die Strahlungsflußänderungen sehr gering sind – zum Vergleich: die mittlere solare Strahlungsflußdichte beträgt  $1\,368 \pm 10$  Watt pro  $m^2$  (Solarkonstante) – und zum anderen in relativ kurzen Zeitabständen das Vorzeichen wechselt. (Siehe hierzu auch Kap. 4.)

Eine weitere potentielle Einflußgröße für die solare Ausstrahlung ist der Sonnendurchmesser und seine zeitliche Variation. Die Periode für diese Variation liegt bei ca. 80 Jahren (39). Auch ein möglicher

Zusammenhang zwischen den Minima der Sonnenfleckenaktivität und der Veränderung der solaren Strahlungsintensität wird diskutiert. Die Änderung der globalen Mitteltemperatur der Erde in Bodennähe als Folge der Schwankungen der beiden solaren Einflußgrößen wird auf maximal 0,2 Grad Celsius geschätzt (1).

Die Theorie von Milankovic (40) über das Zustandekommen der Eiszeiten zeigt, daß auch verhältnismäßig kleine Veränderungen verschiedener Erdbahnparameter und damit der eingestrahelten Sonnenenergie zu durchaus dramatischen Klimaänderungen führen können, wenn sie auf einer großen Zeitskala (Perioden von 10 000 bis 100 000 Jahren) erfolgen und die primären Effekte im Klimasystem der Erde in geeigneter Weise verstärkt werden (40).

## 2.3 Ursachen und Verursacher

Global betrachtet ist die energetische Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas Ursache für etwa 50 % des zusätzlichen, anthropogen bedingten Treibhauseffekts verantwortlich. Weiterhin tragen verschiedene Produkte der chemischen Industrie, die Vernichtung der Tropenwälder sowie die Landwirtschaft und andere Bereiche mit abnehmender Bedeutung zum Treibhauseffekt bei (vgl. Tab. 2.4).

### 2.3.1 Energie einschließlich Verkehr

#### 2.3.1.1 Energie: Globale Situation

Da die energiebedingten  $CO_2$ -Emissionen zu 80 % zu dem durch energetische Nutzung verursachten Treibhauseffekt beitragen, werden im folgenden zunächst die Quellen der  $CO_2$ -Emissionen untersucht.

Bis zur Einführung der Kohle als erstem verfügbaren fossilen Energieträger in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts beruhte die energetische Versorgung der Menschen auf einer extensiven Nutzung erneuerbarer Energien, wobei vornehmlich Holz, Wasserkraft und Wind als Energiequellen eingesetzt wurden (41). Ab dem Ende des 19. Jahrhunderts gewann Erdöl an Bedeutung, zwei Jahrzehnte später begann die intensive Verwendung von Erdgas (42). Mit der Nutzung der fossilen Energieträger steigt die damit verbundene Emission von Kohlendioxid seither exponentiell an, nur unterbrochen durch die beiden Weltkriege, durch die Weltwirtschaftskrise 1929 und durch die Energiepreissprünge im Gefolge der Ölpreiskrisen 1973 und 1979 (vgl. Abb. 2.8). In den vergangenen zwei Jahrzehnten nahm der weltweite Energieeinsatz jährlich im Durchschnitt um etwa 2 % zu (10). Erste Schätzungen für die Jahre 1990 und 1991 deuten jedoch an, daß die globalen energiebedingten  $CO_2$ -Emissionen – auch unter Einbeziehung der Bohrlochbrände in Kuwait (in Höhe von etwa einem Prozent der jährlichen globalen energiebedingten  $CO_2$ -Emissionen) – stagnieren bzw. sogar abgenommen haben (43).

Tabelle 2.4

**Derzeitige Anteile der verschiedenen Verursacherbereiche weltweit am zusätzlichen, anthropogen bedingten Treibhauseffekt<sup>1)</sup>**

(CO<sub>2</sub>=Kohlendioxid; CH<sub>4</sub>=Methan; NO<sub>x</sub>=Stickoxide; CO=Kohlenmonoxid; NMVOC=flüchtige organische Verbindungen (außer Methan); FCKW=Fluorchlorkohlenwasserstoffe; N<sub>2</sub>O=Distickstoffoxid=Lachgas)

Verursachergruppen	Anteile (grob gerundet)	Aufteilung auf die Spurengase (grob gerundet)	Ursachen
Energie einschließlich Verkehr	50 %	40 % CO <sub>2</sub> , 10 % CH <sub>4</sub> u. O <sub>3</sub> (O <sub>3</sub> wird durch die Vorläufersubstanzen NO <sub>x</sub> , CO und NMVOC gebildet)	Emissionen der Spurengase aufgrund der Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas sowohl im Umwandlungsbereich, insbesondere bei der Strom- und Fernwärmeerzeugung sowie Raffinerien, als auch in den Endenergiesektoren Haushalte, Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungen, öffentliche Einrichtungen etc.), Industrie und Verkehr
Chemische Produkte (FCKW, Halone u. a.) <sup>2)</sup>	20 %	20 % FCKW, Halone etc.	Emissionen der FCKW, Halone etc.
Vernichtung der Tropenwälder	15 %	10 % CO <sub>2</sub> , 5 % weitere Spurengase, insb. N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> und CO	Emission durch die Verbrennung und Verrottung tropischer Wälder einschließlich verstärkter Emissionen aus dem Boden
Landwirtschaft und andere Bereiche (Mülldeponien etc.)	15 %	15 %, in erster Linie CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O und CO <sub>2</sub>	Emissionen aufgrund von: — anaeroben Umsetzungsprozessen (CH <sub>4</sub> durch Rinderhaltung, Reisfelder etc.) — Düngung (N <sub>2</sub> O) — Mülldeponien (CH <sub>4</sub> ), — Zementherstellung (CO <sub>2</sub> ) — etc.

<sup>1)</sup> Die Enquete-Kommission hat diese gerundeten Werte bereits in den vergangenen Monaten angegeben. Im Hinblick auf die Spannweite der Anteile der einzelnen Spurengase am zusätzlichen Treibhauseffekt und auf die großen Unsicherheitsbereiche bei der Zuordnung der einzelnen Treibhausgase zu den verschiedenen Bereichen können gegenwärtig nur grob gerundete Näherungswerte angegeben werden (vgl. dazu auch Tab. 1 und 2, Abb. 3 sowie Abschnitt C, 1. Kapitel). Die hier angegebenen Anteile stimmen im Rahmen der vorhandenen Spannweiten und Unsicherheiten mit den Werten des IPCC-Abschlußberichtes vom Sommer 1990 überein.

Dieser IPCC-Bericht gibt für die einzelnen Bereiche folgende Anteile und Spannweiten an:

- Energie: 46 % (38 bis 54 %),
- chemische Produkte (FCKW, Halone u. a.): 24 % (keine Angabe von Spannweiten, obwohl die Absorptionskoeffizienten im Verhältnis zu denen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O unsicher sind),
- Zerstörung der Wälder: 18 % (9 bis 26 %),
- Landwirtschaft: 9 % (4 bis 13 %),
- andere Bereiche (Mülldeponien, Zementherstellung etc.): 3 % (1 bis 4 %)

<sup>2)</sup> FCKW, Halone und andere Verbindungen, die sowohl zu einem Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre als auch zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen

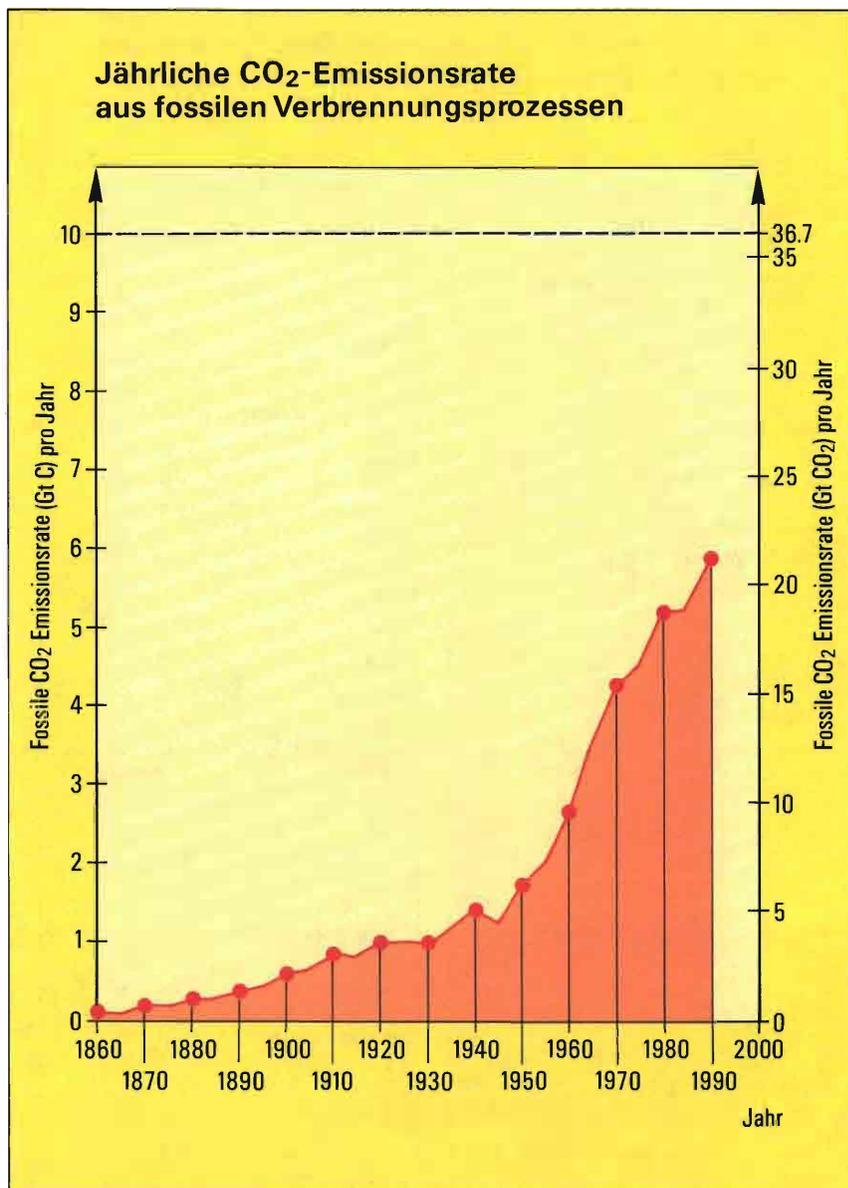


Abb. 2.8: Die weltweite jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionsrate aus fossilen Verbrennungsprozessen seit 1860 (in Gt Kohlenstoff pro Jahr sowie in Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr), nach (1)  
1 t Kohlenstoff (C) entspricht 3,67 t CO<sub>2</sub>

Diese vom Standpunkt der Klimaschutzpolitik wünschenswerte Entwicklung der letzten beiden Jahre ist jedoch nicht das Ergebnis von weltweiten bzw. nationalen Strategien zur CO<sub>2</sub>-Reduktion, sondern hauptsächlich die Folge des politischen und ökonomischen Umbruchs in den Staaten Osteuropas und der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS) sowie der Rezession in den USA, dem weltweit größten CO<sub>2</sub>-Emittenten.

Die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen lagen weltweit im Jahr 1989 bei 21,6 Mrd. t. Die Industrieländer verursachten drei Viertel dieser Emissionen, darunter

die OECD-Staaten mit 10 Mrd. t CO<sub>2</sub>-Emissionen 47 % und die industrialisierten ehemaligen Staatshandelsländer 25 % der Gesamtemissionen (vgl. Abb. 2.9).

Von den über einen Zeitraum von etwa 100 Jahren kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die den Anstieg des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalts auf das heutige Niveau bewirkt haben, stammen sogar über 90 % von den heutigen Industrieländern, was deren Verantwortung zur Ergreifung von Maßnahmen zur Milderung des anthropogen verursachten Treibhauseffekts unterstreicht.

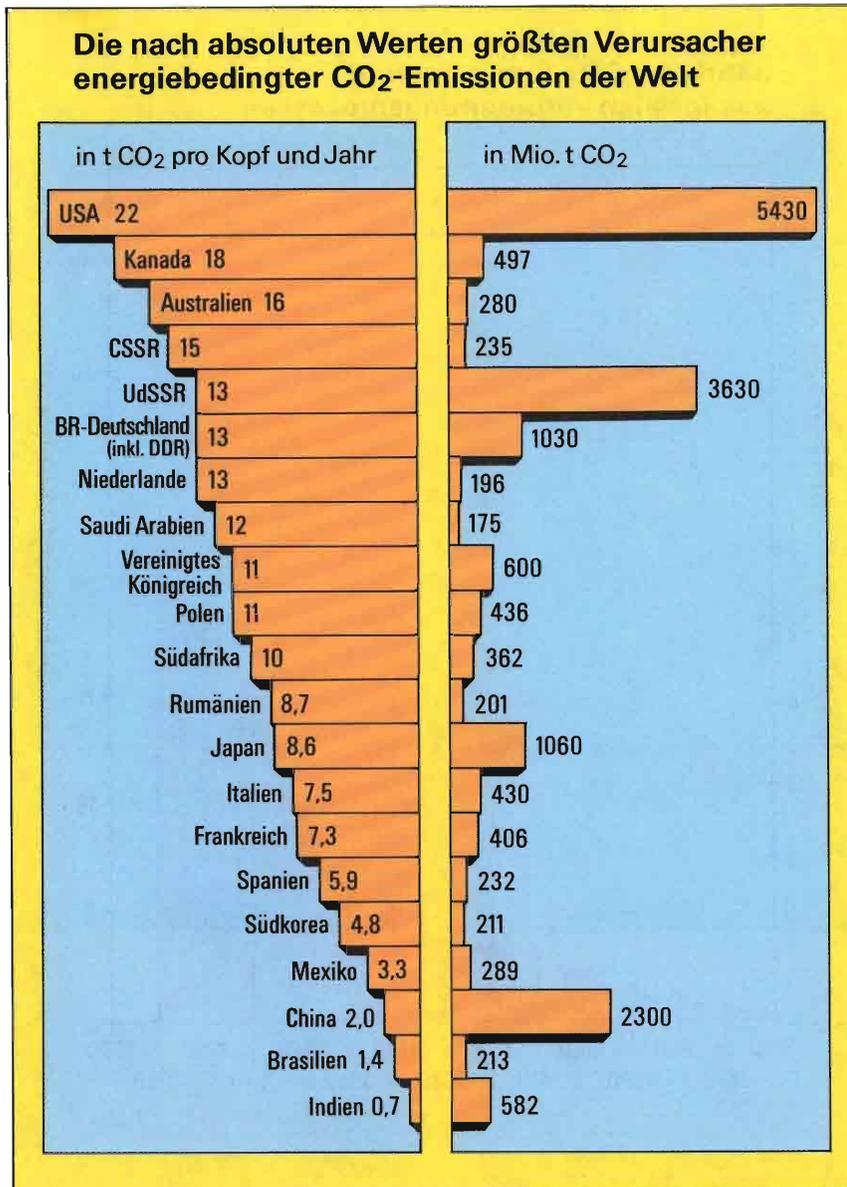


Abb. 2.9: Die 21 größten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emittenten der Welt (1989) (44)  
Wegen unterschiedlicher Abgrenzung und verschiedenen Emissionsfaktoren können die Angaben verschiedener Literaturquellen zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen voneinander abweichen.

Die Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Ländergruppen unterscheiden sich bis zu einem Faktor 20 (vgl. Abb. 2.9). Aus den Werten in Abb. 2.9 wird ersichtlich, daß eine zukünftige CO<sub>2</sub>-Reduktion in erster Linie von den Industrieländern zu erbringen ist, da die Mehrheit der Entwicklungsländer eine Steigerung der Nutzung billiger und im großen Umfang verfügbarer (d. h. im allgemeinen fossiler) Energieträger als notwendig erachtet. Die aktuellen Weltenergieverbrauchsprognosen gehen jedoch noch von einer Verbrauchssteigerung in allen Ländern aus. So erwartet die IEA einen Anstieg des Weltenergieverbrauchs bis 2005 von 40%, der zur Hälfte auf die Entwicklungsländer entfallen soll, zur anderen Hälfte zu etwa gleichen Teilen auf die OECD-Staaten und

die mittel- und osteuropäischen Länder einschließlich der ehemaligen Sowjetunion (45). Die letzte Weltenergiekonferenz 1989 in Montreal erwartete sogar einen Anstieg der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen um 45–70% bis 2020 (46).

In Anbetracht der sich wandelnden Situation in den ehemaligen Staatshandelsländern Osteuropas und Asiens und unter Berücksichtigung der finanziellen Einschränkungen vieler Entwicklungsländer bzgl. des Imports von Energieträgern wäre zu prüfen, inwiefern solche – die Entwicklung der Vergangenheit extrapolierenden – Prognosen für das veränderte weltpolitische Umfeld aufrechtzuerhalten sind.

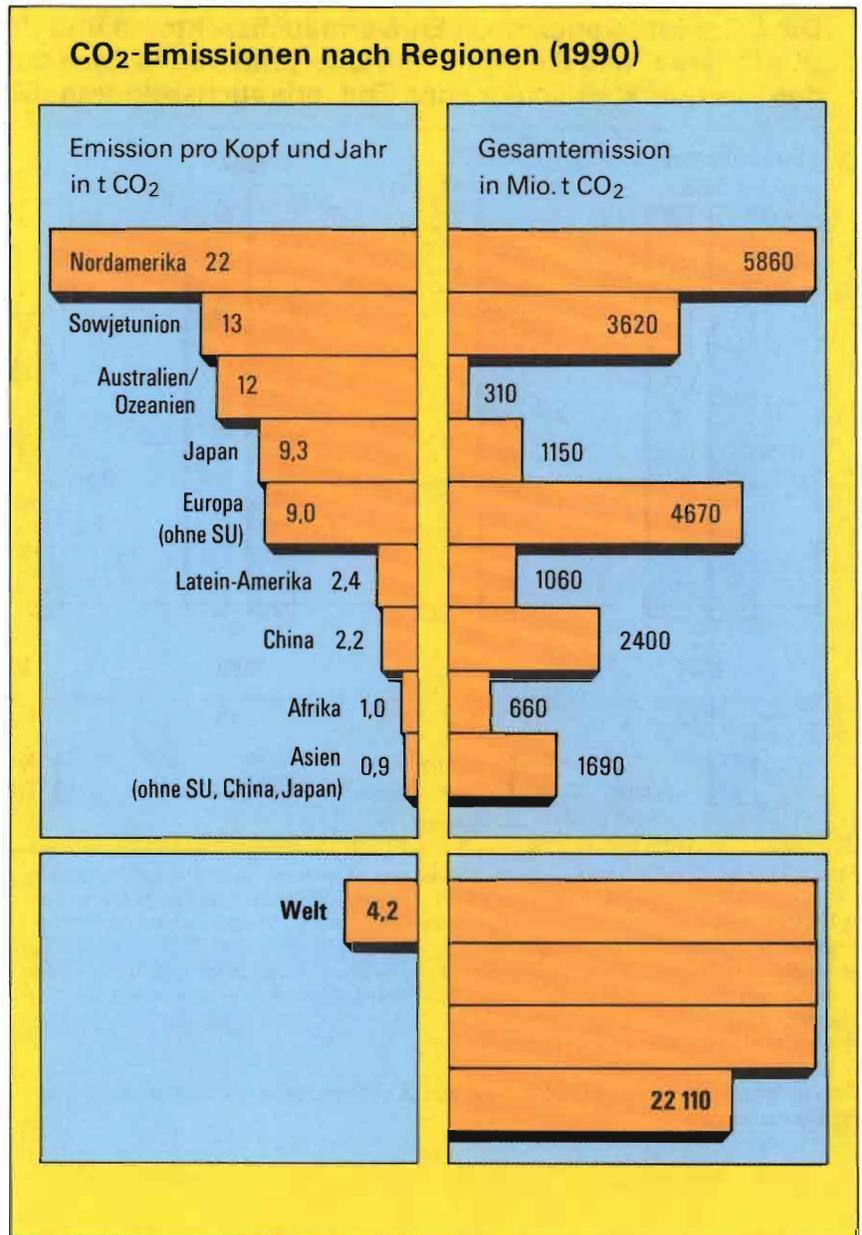


Abb. 2.10: CO<sub>2</sub>-Emissionen (1990) nach Regionen (absolut und pro Kopf) (47)

### Die CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Endverbrauchssektoren und Umwandlungsbereich „Kraftwerke“ und die effektiven CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Auflösung und Anrechnung des Kraftwerksbereichs zu den Endverbrauchssektoren (Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr)

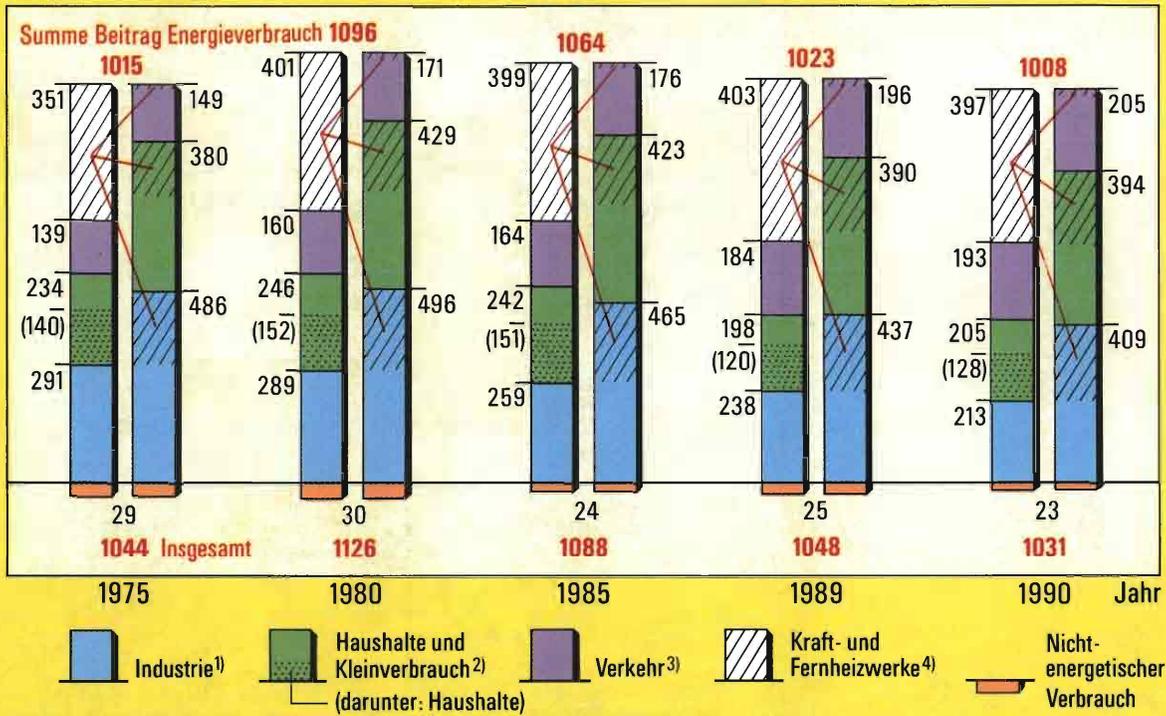


Abb. 2.11: Die CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Endverbrauchssektoren und Umwandlungsbereich „Kraftwerke“ und die effektiven CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Auflösung des Kraftwerksbereichs auf die Endverbrauchssektoren (in Mio. t CO<sub>2</sub>) (49)

1) Übriger Umwandlungsbereich, Verarbeitendes Gewerbe und übriger Bergbau, Industriekraftwerke nur Wärmeerzeugung.

2) Einschließlich militärische Dienststellen.

3) Straßenverkehr einschließlich Land-, Forst- und Bauwirtschaft, Militär-, Schienen-, Wasser- und Luftverkehr; einschließlich des vom bisherigen Bundesgebiet ausgehenden See- und Luftverkehrs entsprechend den in der Energiebilanz ausgewiesenen Treibstoffmengen.

4) bei Industriekraftwerken nur Stromerzeugung.

\*) Vorläufige Werte

Differenzen zu den Werten von Abb. 2.9 und Abb. 2.12 aufgrund unterschiedlicher methodischer Berechnungsverfahren, Datenquellen und Emissionsfaktoren

#### 2.3.1.2 Energie: Nationale Situation

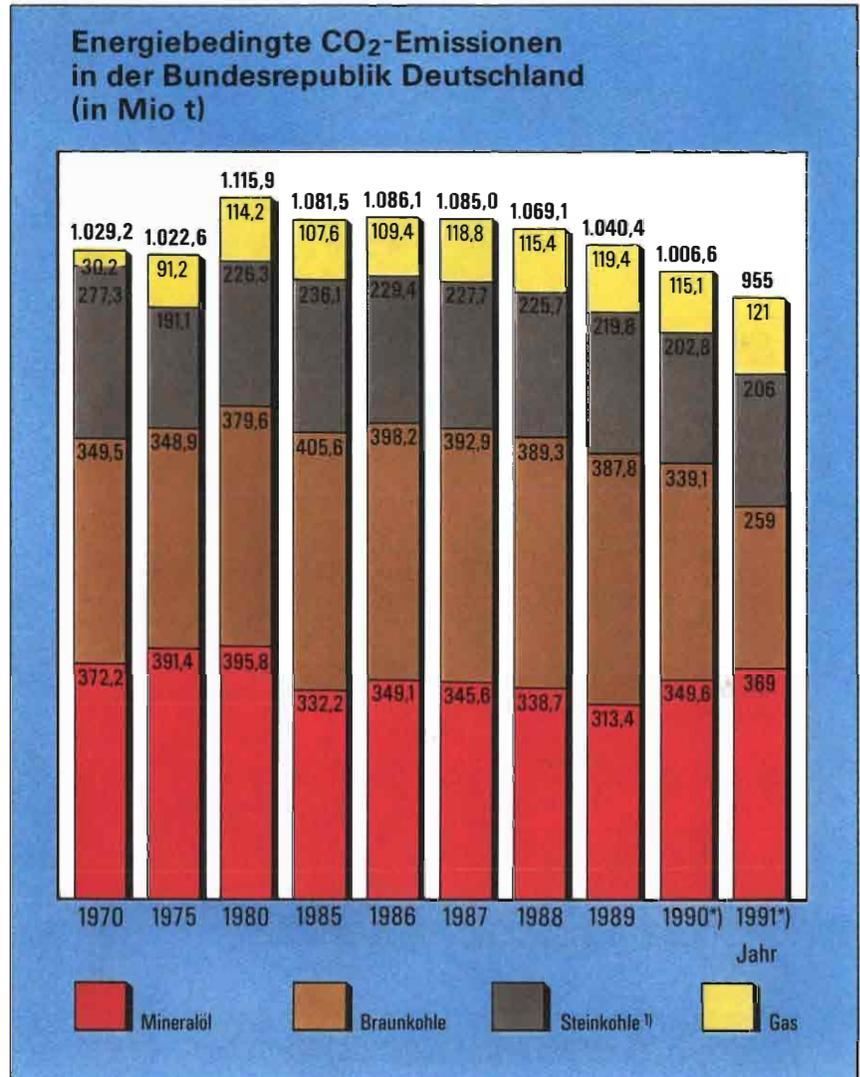
Die Bundesrepublik Deutschland und die DDR emittierten 1990 energiebedingt zusammen rund eine Mrd. t CO<sub>2</sub> (d. h. 13 t CO<sub>2</sub> pro Kopf) und trugen damit zu 32 % zu den Emissionen der EG (inkl. der DDR) bei (48). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland erreichten Ende der 70er Jahre ihren Höhepunkt und bewegten sich im darauffolgenden Jahrzehnt schwankend leicht nach unten, was hauptsächlich durch die über die Energiepreissteigerungen 1979 induzierten Energieeffizienzsteigerungen sowie eine verstärkte Nutzung von Erdgas und Kernenergie zu erklären ist. Seit dem Fall der Mauer am 9. November 1989 sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik (alte und neue Bundesländer) stärker als vorher, da durch den Zusammenbruch der Zentralverwaltungswirtschaft in der ehemaligen DDR und durch innerdeutsche Wanderungsbewegungen die insge-

samt steigende gesamtdeutsche Wirtschaftsleistung durch effizientere Prozesse mit modernen Technologien erbracht wird.

Die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen teilen sich auf den Kraftwerkssektor (als dem größten Energienachfrager des Umwandlungsbereichs) sowie auf die verschiedenen Verbrauchssektoren

- Industrie (inkl. des restlichen Umwandlungsbereichs, z. B. Raffinerien, Kokereien)
- private Haushalte
- Kleinverbrauch (z. B. öffentliche Gebäude, Handwerk, Landwirtschaft) und
- Verkehr

auf (Abb. 2.11, linke Säulen). Betrachtet man die mit dem Energieeinsatz jeweils direkt verbundenen Emissionen, so entfiel auf die Kraft- und Fernheiz-



Hinweis: Berechnet auf der Basis des Primärenergieverbrauchs nach Abzug des Nicht-Energetischen Verbrauchs. Emissionsfaktoren nach Forschungszentrum Jülich. Geringfügige Differenzen zu den Werten in den Abb. 2.9 und 2.11 aufgrund unterschiedlicher methodischer Berechnungsverfahren und Emissionsfaktoren.  
\*) Vorläufige Werte; <sup>1)</sup> einschl. Festbrennstoffe;

Quelle: BMWi, III D 3, Werte für 1991: eigene Berechnungen auf der Basis von Schiffer, 1992;

Abb. 2.12: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland (incl. DDR) nach Energieträgern von 1970 bis 1991 für ausgewählte Jahre (50) (in Mio. t)

werke im Jahr 1990 mit 37 % der größte Anteil. Die anderen Verbrauchssektoren waren an den direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu etwa gleichen Teilen (je 20 %) beteiligt.

Bei dieser Darstellung werden den Verbrauchern jedoch nur die direkt von ihnen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen zugeschrieben. So werden die mit dem Energieeinsatz verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen z. B. bei der Stromerzeugung nicht dem Stromnachfrager, sondern dem Umwandlungsbereich zugeordnet, d. h.,

daß die Stromnachfrage beim Endverbraucher mit Null CO<sub>2</sub>-Emissionen bilanziert wird. Rechnet man zur Darstellung der realen Verursachersituation den von den Endverbrauchern eingesetzten Energieträgern die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu, die bei ihrer Gewinnung und Umwandlung entstehen, so erhält man die in Abb. 2.11 (rechte Säulen) angegebene Verteilung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Abb. 2.11 fächert die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Verbrauchssektoren auf. Außer dieser sek-

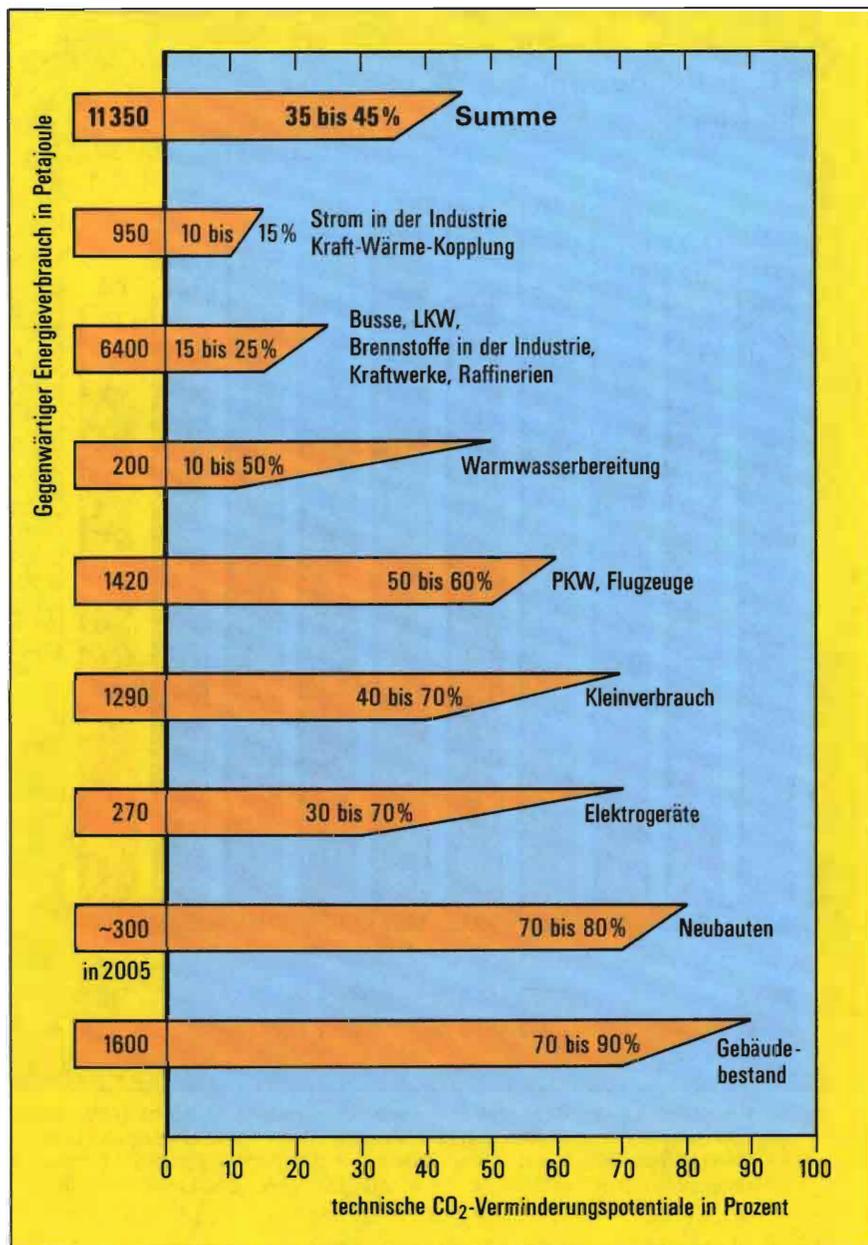


Abb. 2.13: Technische Potentiale der rationellen Energieverwendung in der Bundesrepublik Deutschland ohne ehemalige DDR (in Prozent, bezogen auf den Energieverbrauch des jeweiligen Anwendungsfeldes im Jahr 1987) (10)

toralen Darstellung, die von der Energienachfrage ausgeht, ist es – den Blickwinkel der Energieangebotsseite einnehmend – oft üblich, die CO<sub>2</sub>-Emissionssituation nach Energieträgern aufzuschlüsseln. Abb. 2.12 gibt den Sachverhalt für den Zeitraum 1970 bis 1991 wieder.

Die vom Deutschen Bundestag in der 11. Wahlperiode eingesetzte Enquete-Kommission „Vorsorge zum

Schutz der Erdatmosphäre“ hat angesichts der sich abzeichnenden globalen Klimaveränderungen und unter Berücksichtigung der Höhe der klimarelevanten Emissionen der Bundesrepublik Deutschland empfohlen, den Ausstoß energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 30 % im Vergleich zu 1987 zu senken, bis 2020 um zusätzliche 20 % und bis 2050 um zusätzliche 30 % (10). Zur Erreichung des Emissionszieles 2005 wurden von der Enquete-Kom-

mission drei verschiedene Szenarien entworfen – die Szenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg“ und „Kernenergieausbau“ –, die alle das Emissionsziel unter Anlegung technisch-wirtschaftlicher Kriterien einhalten. Den drei Szenarien ist gemein, daß sie die höchste Priorität auf Erhöhung der Energieeffizienz und Energieeinsparung setzen (10) (vgl. Abb. 2.10).

Seit der Formulierung dieser Empfehlungen haben sich wesentliche Rahmenbedingungen verändert, die die Realisierung des Emissionsziels für die alten Bundesländer bis 2005 erschweren:

- Die zur Erhöhung der Energieeffizienz benötigten Investitionen stehen in Konkurrenz zu dem durch die Vereinigung entstandenen zusätzlichen Investitionsbedarf zur Umstrukturierung der Wirtschaftsstruktur in den neuen Bundesländern.
- Die gleichen Auswirkungen gehen vom gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Umbruch in den Ländern Osteuropas und der ehemaligen UdSSR aus.
- Die Schaffung des EG-Binnenmarktes und insbesondere die in der Diskussion stehende Einführung eines gemeinsamen europäischen Strommarktes engen den Handlungsspielraum für nationale Alleingänge ein.

Unter Einbezug dieser Umstände geht die von der Bundesregierung eingesetzte Interministerielle Arbeitsgruppe „CO<sub>2</sub>-Reduktion“ (IMA) davon aus, daß es bis 2010 bei Durchführung der bislang von der Bundesregierung gemäß den IMA-Empfehlungen vorgesehenen ordnungs- und steuerpolitischen Einzelmaßnahmen ohne zusätzliche Eingriffe seitens der Energiepolitik zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 12 % für Gesamtdeutschland kommen wird (51). Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt die aktuellste von Bundesministerium für Wirtschaft in Auftrag gegebene Energieprognose für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, die eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1076 Mio. t (1987) auf 964 Mio. t (2005) (d. h. um etwas über 10 %) erwartet (52). Um die im Kabinettsbeschluß vom 7. November 1990 (25 % CO<sub>2</sub>-Reduktion für die alten Bundesländer und eine höhere Reduktion für die neuen Bundesländer) sowie im Kabinettsbeschluß vom 11. Dezember 1991 (25–30 % Reduktion für alte und neue Bundesländer zusammen) formulierten Reduktionsziele zu erreichen, besteht daher zusätzlicher Handlungsbedarf, wie ihn die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ der 11. Wahlperiode bereits umrissen hat.

### 2.3.1.3 Verkehr

Zunehmende Verflechtungen im Weltwirtschaftsraum führen zu einem ständig wachsenden Beförderungsbedarf von Personen und Gütern. Weltweit entfallen 27 % des Energieverbrauchs auf den Verkehr. Der Anteil des Verkehrssektors an der Energienachfrage hat sich in der Bundesrepublik Deutschland in den letzten 30 Jahren von ca. 15 % auf über 25 % erhöht, so daß sich folgende Struktur des Endenergie-

verbrauchs (Bundesrepublik Deutschland 1990) nach Sektoren ergibt (53):

Industrie	30,4 %
Verkehr	28,2 %
Haushalte	25,0 %
Kleinverbraucher	16,4 %

Die beim Verkehr auch prozentual im Vergleich zu anderen Energiesektoren steigende Umweltbelastung geht vor allem auf den motorisierten Individualverkehr und die von ihm ausgehenden Veränderungen zurück.

Die Emissionsminderungen durch motor- und fahrzeugtechnische Verbesserungen in den letzten 15 Jahren konnten den Emissionsanstieg durch Verkehrszuwächse aufgrund zunehmender räumlicher Verflechtung der Wirtschaftsstrukturen (z. B. Lage der Produktionsstandorte und Absatzmärkte, Lage der Wohn- und Arbeitsstätten zueinander, Orte der Freizeitaktivitäten etc.), Energieverluste durch Verkehrsballung und Stau, sowie Mehrverbräuche durch erhöhte qualitative Ansprüche an die Fahrzeuge (leistungsstärkere Motoren, Komfortausstattung, höhere Spitzengeschwindigkeiten) nicht kompensieren. Zuwächse aufgrund räumlicher Verflechtung ergeben sich insbesondere durch den Binnenmarkt der Europäischen Gemeinschaft und die Integration Osteuropas.

Innerhalb der Europäischen Gemeinschaft expandiert der Güterkraftverkehr schon seit vielen Jahren und ist einer der wichtigsten Landverkehrsträger. Allein auf den Straßenverkehr entfällt die Hälfte des Güterverkehrsvolumens in Europa. Im Zeitraum von 1984 bis 1989 expandierte der Straßengüterverkehr der Gemeinschaft innerstaatlich um 50,1 % und zwischenstaatlich um 84,4 %. Der Eisenbahnverkehr wuchs im selben Zeitraum innerstaatlich nur um 7,3 % und zwischenstaatlich um 12,8 %.

Im Luftverkehr Europas dürfte die jährliche Zuwachsrate für einige Jahre weiterhin über 6 % liegen. Die spektakulären Zuwachsraten beim Fluggast- und Luftfrachtaufkommen belegen, daß sich der europäische Luftverkehrsmarkt im Umbruch befindet. In den letzten 10 Jahren stieg der Passagierluftverkehr innergemeinschaftlich und mit Drittländern um 65,6 % an. Der Luftfrachtverkehr erhöhte sich sogar um 105,5 % (54).

Die durch den Verkehrssektor verursachten Emissionen umfassen alle klimarelevanten Treibhausgase, wobei die Kohlendioxidbelastung prozentual am Treibhauseffekt den größten Stellenwert einnimmt.

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>): Durch die Verbrennung fossiler Energieträger entfallen weltweit 20 % des emittierten Kohlenstoffs auf den Verkehr. Abb. 2.14 veranschaulicht die prozentuale Verteilung der verkehrsbedingten Kohlendioxidemissionen auf die Länder der Welt. Auf die Industrieländer entfallen zwei Drittel der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor. Die verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Entwicklungsländer tragen dagegen weniger als ein Fünftel bei. Die USA liegt mit einem Drittel der CO<sub>2</sub>-Produktion an der Weltspitze (55).

Wasserdampf (H<sub>2</sub>O): Der durch den Flugverkehr in der Stratosphäre emittierte Wasserdampf beeinflusst

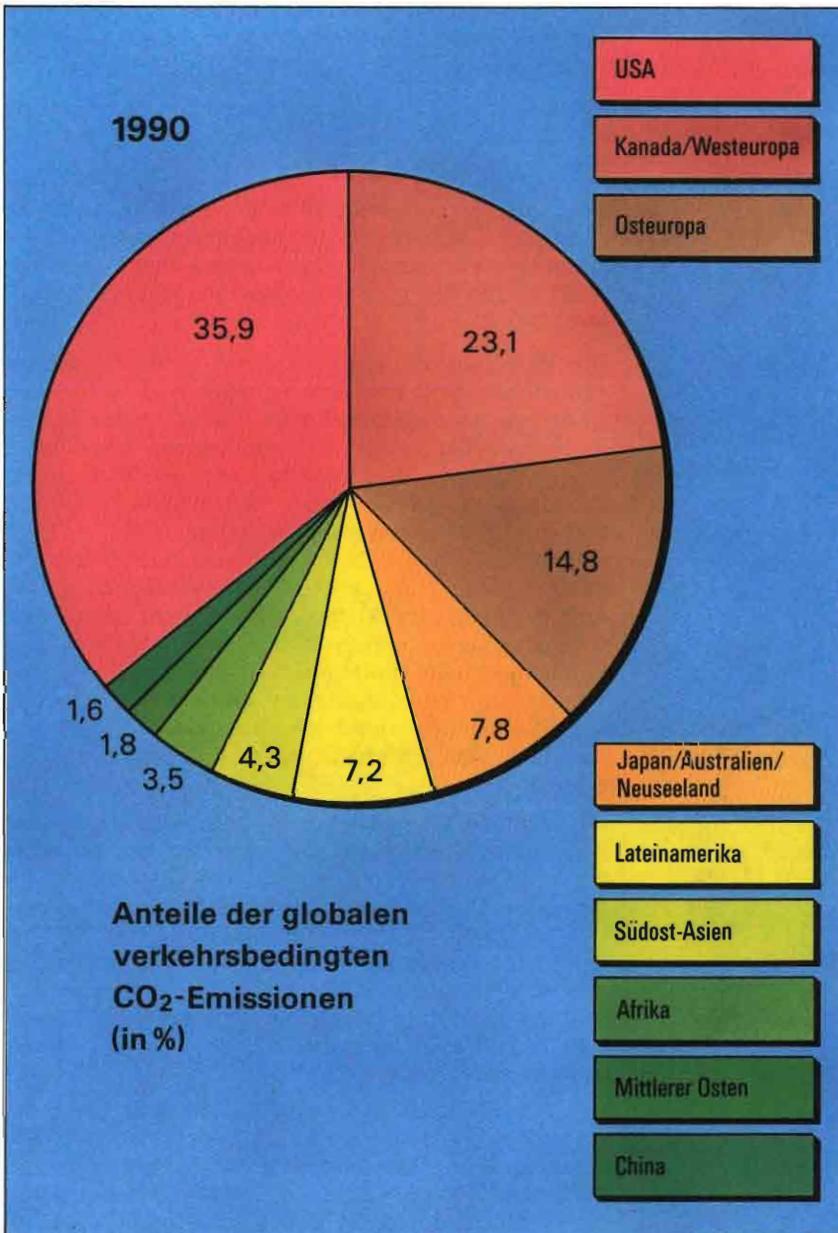


Abb. 2.14: Anteile der globalen verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen (55)

das Klima durch einen zusätzlichen Treibhauseffekt der Erdatmosphäre. Der Flugtreibstoff besteht überwiegend aus Kohlenwasserstoffen, die mit dem Sauerstoff der Luft in den Triebwerken zu Kohlendioxid und Wasserdampf verbrennen. Die Emissionsmasse des Wasserdampfes ist sehr klein im Vergleich zu der Verdunstung an der Erdoberfläche. Sie trägt aber neben der durch Oxidation von Methan produzierten Wasserdampfmenge wesentlich zum Anstieg der ansonsten geringen Wasserdampfkonzentration in der Stratosphäre bei (vgl. Kap. 2.2.1.2). Durch Verkehrsflugzeuge kommt es im Bereich der Tropopause zur Bildung von Kondensstreifen, die aus Eisteilchen bestehen. Diese können bei hinreichender Umgebungsfeuchte zu einer Erhöhung des Wolkenbedeckungsgrades beitragen. Das Sonnenlicht erreicht die Erdoberfläche zwar auch bei dünnen Eiswolken ungestört, aber die terrestrische Wärmeabstrahlung wird

bereits bei dünnen Wolken stark gemindert. Daraus resultiert eine Temperaturzunahme an der Erdoberfläche.

Stickoxide (NO<sub>x</sub>): Weltweit entstehen zwei Drittel der Stickoxide aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe (20 Mio. t.) Während bei der Minderung von Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoff-Emissionen in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erreicht werden konnten, haben die gestiegene Anzahl von Kraftfahrzeugen und die gestiegene Fahrleistung trotz Einbau von Katalysatoren zu einem Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen geführt, der die Verminderung der Emissionen aus Kraftwerken und Industrie überkompensiert hat.

Durch starke Sonneneinstrahlung bilden Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC) bodennahes Ozon (O<sub>3</sub>), das mit 7 % am Treibhauseff-

fekt beteiligt ist. In der Bundesrepublik Deutschland stammen im Sommer etwa 80 % der bodenozonbildenden Schadstoffe aus dem Verkehrsbereich. Der in den Sommermonaten vermehrt von den Behörden gegebene Ozonalarm wirkt sich zudem direkt auf menschliche Aktivitäten aus (z. B. Aufenthaltsbegrenzung im Freien für Kinder und ältere Menschen, Verzicht auf körperliche Anstrengungen u.s.w.).

Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>): Der Flugtreibstoff Kerosin enthält Schwefel, der durch Verbrennung in Form von Schwefeldioxid freigesetzt wird. Für die Wirkung der emittierten Stoffe ist nicht allein die Menge sondern auch die Höhe entscheidend, in der die Emission erfolgt.

In der Reise Flughöhe ist die Wirkung wegen

- großer Verweilzeit
- geringer Hintergrund-Konzentration
- starker Strahlungswirksamkeit

deutlich höher als in Bodennähe.

In den besonders sensiblen Polarbereichen liegt die Flughöhe im Bereich des Ozonabbaugebietes. Die emittierten SO<sub>2</sub>-Mengen sind groß genug, um eine deutliche Erhöhung der Sulfat-Aerosol-Konzentration in der unteren Stratosphäre zu bewirken und damit zum Ozonabbau beizutragen.

Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW): Nicht zu vernachlässigen sind die Emissionen von Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) und FCKW im Verkehrsbereich. 68 % der weltweit produzierten FCKW-Kältemittel werden für Auto-Klimaanlagen eingesetzt, das entspricht 75 000 t FCKW jährlich. Zur Herstellung von Autoteilen werden weitere 120 000 t FCKW verbraucht. Die Einsetzung des Katalysators bei Kraftfahrzeugen verursacht eine 10 mal höhere N<sub>2</sub>O-Bildung und ist damit eine nicht zu vernachlässigende Distickstoffoxidquelle (56).

**2.3.2 Waldvernichtung**

Entsprechend der Definition der FAO ist unter dem Begriff Wald eine Pflanzengesellschaft zu verstehen, die überwiegend aus Bäumen besteht, die im Reifealter mindestens 7 Meter hoch werden und zumindest 10 Prozent des Boden beschatten (10).

Die Wälder gehören neben den Ozeanen zu den für das Überleben der Menschheit wichtigsten Ökosystemen. Sie spielen eine äußerst bedeutsame Rolle in den Stoffflüssen in der Atmosphäre, zum Beispiel dem Kohlenstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffkreislauf und haben damit einen entscheidenden Einfluß auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. Wälder tragen zur Klimaregulation bei und sind an Wasserhaushalt und -kreislauf beteiligt. Sie schützen Böden vor Erosion, fördern in den gemäßigten und nördlichen Breiten die Bodenbildung, sind Quelle für Nahrung und bieten der Menschheit vielfältigen wirtschaftlichen und sozialen Nutzen.

Wälder beherbergen, obwohl sie nur etwa 25 Prozent der Landmasse der Erde bedecken, mehr Tier- und Pflanzenarten und tragen mehr zur Entstehung neuer

Arten bei als jedes andere Ökosystem. Der Erhaltung dieser Artenvielfalt kommt eine besondere Bedeutung zu.

Die von Wäldern und Gehölzen eingenommene Fläche betrug 1980 weltweit 53 Mio. km<sup>2</sup>, die sich regional wie folgt aufteilte (62)

UdSSR .....	9,30 Mio. km <sup>2</sup>
Europa .....	1,78 Mio. km <sup>2</sup>
Asien .....	6,69 Mio. km <sup>2</sup>
Südamerika .....	11,25 Mio. km <sup>2</sup>
Afrika .....	13,39 Mio. km <sup>2</sup>
Nord- und Mittelamerika ....	9,01 Mio. km <sup>2</sup>
Pazifische Inseln .....	1,58 Mio. km <sup>2</sup>
Gesamt .....	53,00 Mio. km <sup>2</sup>

Die flächenhafte Ausdehnung der drei großen Waldökotypen ist in der folgenden Tabelle dargestellt (63):

Tropische Wälder ..		19,0 Mio. km <sup>2</sup>
davon: .....		
Feuchtwälder ....	10,0 Mio. km <sup>2</sup>	
Trockenwälder ...	9,0 Mio. km <sup>2</sup>	
Boreale Wälder ....		9,2 Mio. km <sup>2</sup>
Wälder der gemäßigten Breiten .....		7,7 Mio. km <sup>2</sup>
Gesamtfläche .....		35,9 Mio. km <sup>2</sup>

**Die Wälder außerhalb der Tropen**

Die Wälder der gemäßigten Breiten und die borealen Wälder bilden gegenwärtig eine Senke für CO<sub>2</sub>, da sie als Folge menschlicher Eingriffe den Höhepunkt ihres Wachstums nicht mehr erreichen und somit Biomasse akkumulieren. Zudem haben die Waldflächen in den ECE-Staaten seit Ende des 19. Jahrhunderts um etwa 2,5 % zugenommen. Die Wälder der gemäßigten Breiten speichern heute insgesamt 25 Gt Kohlenstoff, davon etwa die Hälfte in der lebenden Biomasse. Die borealen Wälder speichern insgesamt 190 Gt Kohlenstoff, ein Drittel davon in der lebenden Biomasse (63).

Die Zuwachsraten der Wälder in den gemäßigten Breiten könnten durch den steigenden Anteil geschädigter Bäume in Mitteleuropa und Nordamerika negativ beeinträchtigt werden. Erhebungen der FAO deuten im Widerspruch dazu auf eine Zunahme des Bestandes pro Flächeneinheit und eine Erhöhung der jährlichen Zuwachsraten in den Wäldern der europäischen Länder hin. Im Durchschnitt habe sich die Bestockung zwischen 1970 und 1980 um etwa 12 %, die jährliche Zuwachsrate um etwa 9 % erhöht. Einer der Gründe dafür sei die dichtere Bepflanzung im Rahmen der forstwirtschaftlichen Nutzung. In den Industrieländern außerhalb Europas gibt es keine Hinweise für eine ähnliche Entwicklung. Insgesamt wird von der FAO für die europäischen Wälder eine

Tabelle 2.5

**Biomasse im Baumbestand der geschlossenen Wälder in den ECE-Staaten  
(in Mio. t Trockensubstanz <sup>2</sup>)  
(FAO, 1985)**

	Nutzbare geschlossene Wälder						
	Gesamte Biomasse des Baumbestandes	Stümpfe und Wurzeln	Oberirdische Biomasse des Baumbestandes				
			Gesamt	Erfasste Biomasse			Sonstige oberirdische Biomasse
				Gesamt	Holz	Rinde	
Albanien .....	45	8	57	40	37	4	17
Belgien .....	62	7	55	37	33	4	10
Bulgarien .....	218	35	183	130	104	26	53
Bundesrepublik Deutschland .....	710	91	618	459	408	51	159
Dänemark .....	40	4	36	21	19	2	14
Deutsche Demokratische Republik .....	286	37	249	186	165	21	63
Finnland .....	1 010	148	862	643	545	98	219
Frankreich .....	1 165	77	1 091	840	798	72	251
Griechenland .....	107	28	79	64	57	7	16
Irland .....	19	3	16	13	11	2	3
Island .....	—	—	—	—	—	—	—
Israel .....	2	—	2	1	1	—	—
Italien .....	299	145	355	203	255	28	72
Jugoslawien .....	707	84	625	566	532	34	59
Luxemburg .....	10	1	9	7	6	1	3
Niederlande .....	15	2	13	10	9	1	3
Norwegen .....	294	43	251	201	173	28	50
Österreich .....	504	83	421	362	328	34	59
Polen .....	826	55	771	570	492	78	201
Portugal .....	139	17	122	100	87	13	21
Rumänien .....	942	117	826	590	538	59	23
Schweden .....	1 446	233	1 213	959	844	115	251
Schweiz .....	211	27	184	136	121	15	48
Spanien .....	388	78	309	185	171	14	125
Tschechoslowakei .....	583	104	479	390	357	33	89
Türkei .....	416	12	404	334	205	49	70
Ungarn .....	168	25	143	143	118	25	—
Vereinigtes Königreich .....	143	18	124	93	80	12	32
Zypern .....	2	—	2	1	1	—	—
Europa .....	10 952	1 482	9 499	7 371	6 575	796	2 127
UdSSR .....	41 070	6 290	34 780	28 206	26 280	1 915	6 574
Kanada .....	13 799	1 156	12 612	8 872	7 803	1 069	3 770
Vereinigte Staaten .....	16 931	1 893	15 038	17 014	1 021	1 802	3 073
Nordamerika .....	30 730	3 049	27 680	20 886	18 015	2 871	6 793
Total .....	82 782	10 821	71 952	56 463	50 878	5 585	15 494

jährliche Zunahme der Biomasse von 190 Mio. m<sup>3</sup> angenommen. Dies entspricht einer Kohlenstoff-Speicherung von 60 Mio. t.

Zu bedenken ist die relativ niedrige Qualität der Daten. Nur für wenige Länder liegen konsistente Aufnahmen der Biomasse pro Flächeneinheit vor. In der Bundesrepublik Deutschland wurde beispielsweise nach der Einführung einer neuen Aufnahmemethode im Jahr 1983 eine gegenüber den vorherigen Aufnahmen um 90 % höhere Biomasse ermittelt.

Unklar bleibt, inwieweit vermutete Abholzungen in Kanada und Sibirien, die auf eine Fläche von 1 bis 3 Mio. ha geschätzt werden, zu einer Freisetzung von CO<sub>2</sub> führen. Ebenfalls nicht quantifiziert werden kann die Freisetzung von CO<sub>2</sub> als Folge der Ausdünnung von Kronen geschädigter Bäume und des erhöhten Humusabbaus in Waldböden.

Der Einfluß der außertropischen Wälder auf die globale Klimaveränderung erscheint im Moment gering. Es ist jedoch zu bedenken, daß die zukünftige Erwärmung eine erhebliche Steigerung der Abbaugeschwindigkeit der abgestorbenen organischen Substanz mit sich bringen wird. Dadurch könnte innerhalb der nächsten Jahrzehnte eine zusätzliche Menge von bis zu 200 Gt Kohlenstoff freigesetzt und der Treibhauseffekt verstärkt werden.

**Tropenwälder**

Nach der Tropenwaldinventur der FAO (Forest Resources Assessment 1990 Project) ergab sich eine Gesamtfläche von 18,82 Mio. km<sup>2</sup> (1980: 19,35 Mio. km<sup>2</sup>) und eine jährliche Entwaldungsrate von 169 000 km<sup>2</sup> (1980: 113 000 km<sup>2</sup>). D. h., daß sich die Entwaldungsrate von 1980 bis 1990 von jährlich 0,6 um ca. 50 % auf 0,9 % erhöht hat. Diese Rate variiert in den verschiedenen Tropenwaldländern stark.

Nach Myers (60) nahmen die feuchten tropischen Wälder im Jahr 1989 eine Fläche von 8 Mio. km<sup>2</sup> ein. Die Entwaldungsrate lag im gleichen Jahr bei 142 200

km<sup>2</sup>. Sie wäre damit von 1979 bis 1989 um 90 % auf einen jährlichen Wert von 1,8 % angestiegen. Allein 60 % der Rodungen gehen auf das Konto der „shifting agriculture“, d. h. Einwanderung und vorübergehende Schaffung neuer landwirtschaftlicher Nutzflächen. Für die Zukunft sei eine starke Zunahme zu befürchten.

Es gibt demnach keine Anhaltspunkte dafür, daß sich der von der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ in ihrem 3. Bericht ermittelte Beitrag der Waldvernichtung zum Treibhauseffekt von etwa 10 % (durch CO<sub>2</sub>-Emissionen) zuzüglich 5 % (durch Emissionen anderer Spurenstoffe) wesentlich verändert hat. Die durch die Umwandlung von Wald in Agrarfläche freigesetzte Kohlenstoffmenge wird auf etwa 0,7 bis 1,7 Gt (von insgesamt 7,2 bis 7,6 GtC) geschätzt. Davon werden 0,011 bis 0,053 GtC in Form von Methan emittiert. Zudem werden jährlich zwischen 0,007 und 0,017 Gt Stickstoff freigesetzt. (65). Seit Beginn der industriellen Revolution stieg der Kohlenstoff-Gehalt der Atmosphäre von 275 ppm auf 355 ppm. Etwa die Hälfte dieses Anstiegs geht auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung durch Waldrodungen zurück.

Eine genauere Quantifizierung der durch Waldrodung freigesetzten Menge an klimarelevanten Spurengasen ist abhängig von einer Ermittlung des gespeicherten Kohlenstoffs. Die weltweit in der terrestrischen Biomasse gespeicherte Kohlenstoffmenge wird auf etwa 600 bis 1 000 Gt geschätzt. Je nach physiognomischer und biologischer Ausprägung schwanken die in Waldformationen gespeicherten Kohlenstoffmengen äußerst stark. (57, vgl. Tab. 2.6).

Auch der Grad der anthropogenen Störung wirkt sich auf die freigesetzte Kohlenstoffmenge aus. So werden offene Wälder infolge von Überweidung, zu starkem Einschlag o. ä. meist degradiert, während geschlossene tropische Wälder eher völlig gerodet werden. Ein dritter einschränkender Punkt ist, daß sich die Waldrodungen mittlerweile nicht mehr auf die Tropenwälder beschränken. Großflächige Waldvernichtungen scheinen nunmehr auch in Kanada und Sibirien aufzutreten.

Tabelle 2.6

**Lebende und tote Biomasse, organische Substanz im Boden und mikrobielle Biomasse in den wichtigsten globalen Vegetationstypen (Scharpenseel, 1992)**

	Tropische Wälder	Wälder der gemäßigten Breiten	Boreale Wälder	Savannen	Grasländer der gemäßigten Breiten	Tundra
Fläche (Mio. km <sup>2</sup> ) . . . . .	24,5	12,5	12,0	15,0	9,0	8,0
Lebende Biomasse (g C/m <sup>2</sup> )	18 000	14 000	9 000	1 800	1 440	250
Streu (g C/m <sup>2</sup> ) . . . . .	710	368	250	360	667	75
Böden (g C/m <sup>2</sup> ) . . . . .	13 000	9 000	15 000	5 400	23 000	22 000
Böden (g N/m <sup>2</sup> ) . . . . .	816	640	1 100	333	2 100	1 125
Mikrobielle Biomasse (g C/m <sup>2</sup> ) . . . . .	50	110	35	60	215	20
Mikrobielle Biomasse (g N/m <sup>2</sup> ) . . . . .	2	14	2,5	8,7	51	1
Mikrobielle Umsetzung (Jahre) . . . . .	0,07	0,30	0,14	0,17	0,32	0,27

Tabelle 2.7

**Gesamtmenge der durch Feuer freigesetzten Menge an Kohlenstoff und Stickstoffverbindungen**

(nach Andreae, 1991)

	Freigesetzte Kohlenstoffmenge (Gt/Jahr)	Freigesetzte Stickstoffmenge (Gt/Jahr)
Wanderfeldbau . . . .	0,5–1,0	0,005–0,01
Dauerhafte Entwaldung . . . . .	0,2–0,7	0,002–0,007
Savannenfeuer . . . .	0,3–1,6	0,002–0,01
Brennholz . . . . .	0,3–0,6	0,002–0,003
Landwirtschaftliche Abfälle . . . . .	0,5–0,8	0,005–0,016
Gesamt . . . . .	1,8–4,7	0,015–0,046

Wissenschaftlich nicht eindeutig geklärt ist der direkte Einfluß der Waldrodung auf die Albedo. Ein nennenswerter Beitrag erscheint jedoch nur beim Auftreten heller, vegetationsfreier Rodungsflächen wahrscheinlich. Durch Sukzession der Sekundärvegetation nähert sich die Albedo wieder derjenigen über geschlossenen Wäldern (64).

Es bleibt hervorzuheben, daß sich die Rodung der tropischen Wälder besonders negativ auf das regionale Klima auswirkt. Neben dem Wasser- und Nährstoffhaushalt wird die Bodenfruchtbarkeit und die Entwicklung benachbarter Waldregionen negativ beeinflusst. Ferner treten über den Waldbränden hohe troposphärische Ozonkonzentrationen und zum Teil auch photochemischer Smog auf. Die mit Waldrodungen verbundenen Beeinträchtigungen des regionalen natürlichen Potentials sind wesentlich gravierender als die Auswirkungen auf das globale Klima.

**2.3.3 Landwirtschaft**

Die Landwirtschaft trägt weltweit und zum Teil in erheblichem Umfang zur Emission von treibhauswirksamen Spurengasen bei (vgl. Tab. 2.4). Die Emissionsraten einzelner Spurengase können oft nur unter Schwierigkeiten bestimmt werden, da die Landwirt-

schaft immer sowohl Quelle als auch Senke für die einzelnen Stoffe darstellt.

Bei den durch die Landwirtschaft emittierten klimarelevanten Gasen muß zwischen direkt und indirekt wirksamen Gasen unterschieden werden. Zu ersteren gehören die Kohlenstoffverbindungen  $\text{CO}_2$ , und  $\text{CH}_4$ , sowie  $\text{N}_2\text{O}$  aus der Gruppe der Stickstoffverbindungen. Diese Gase entstehen bei Brandrodung mit nachfolgender landwirtschaftlicher Nutzung der Flächen, in der Tierhaltung, im Reisanbau und nach Verwendung stickstoffhaltiger Dünger. Sie tragen direkt zum Treibhauseffekt,  $\text{N}_2\text{O}$  zusätzlich auch zur Zerstörung der Ozonschicht bei.

Indirekt wirksame klimarelevante Gase wie  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$  entstehen bei Tierhaltung, aber auch nach Stickstoffdüngung durch Mikroorganismen-Tätigkeit in Böden und Gewässern.  $\text{CO}$  wird im wesentlichen bei Biomasseverbrennungen freigesetzt. Es wird zunehmend klarer, daß die gesteigerte und teilweise übermäßige Zufuhr von industriellem und organischem Dünger verantwortlich für die Zunahme der  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen ist (s. Kap. 2.3.3.1).

$\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$  führen zur Versauerung der Böden und zur Eutrophierung terrestrischer und aquatischer Ökosysteme. Stickoxide fördern die Entstehung des phytotoxischen bodennahen Ozons. Die Schädigung und Destabilisierung der Ökosysteme hat wiederum negative Rückwirkungen auf die Erhaltung des Klimas, indem Senken für  $\text{CO}_2$  und andere Gase zerstört werden.

**2.3.3.1 Direkt wirksame klimarelevante Gase****Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )**

Von 1860 bis 1980 war die Landwirtschaft durch Landnutzungsänderungen kumulativ zu ca. 50 % an der weltweiten anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Freisetzung beteiligt. Seitdem überwiegt mit steigender Tendenz auf einem weit höheren Gesamtniveau die  $\text{CO}_2$ -Freisetzung aus dem Energiebereich, während die Landwirtschaft eine untergeordnete Rolle (20–30 % in 1990) spielt (66). Insgesamt werden  $1,6 \pm 1,0$  Gt C pro Jahr (entspricht  $5,86 \pm 3,67$  Gt  $\text{CO}_2$  pro Jahr) aus biotischen Quellen emittiert (67). Dabei wird der weitaus größte Teil durch Biomasseverbrennung und veränderte Landnutzung freigesetzt.

Tabelle 2.8

**Landnutzungsänderungen in der Vergangenheit**(in Mio.  $\text{km}^2$ )

Kategorie	Bestand		prozent. Anstieg von 1882–1991 um
	1882	1991	
Ackerland . . . . .	8,6	15,0	174 %
Grün- und Weideland . . . . .	15,0	32,0	213 %
Wälder und Forste . . . . .	52,0	41,0	-21 %

Quelle: Norse, 1991 (68)

1991 wurden von 130 Mio. km<sup>2</sup> Land 15 Mio. km<sup>2</sup> als Ackerland, 32 Mio. km<sup>2</sup> als Weideland und weitere 41 Mio. km<sup>2</sup> für die Forstwirtschaft genutzt. Die Zunahme der anthropogen genutzten Flächen in den letzten 110 Jahren ist in Tab. 2.8 dargestellt.

Ein Großteil der Biomasseverbrennung kann direkt oder indirekt der Agrar- und Weidewirtschaft zugeordnet werden. Dazu gehören Aktivitäten wie Waldrodung und Waldmanagement, Savannenfeuer, Energieversorgung (Heizen, Kochen usw.) und Abbrennen von landwirtschaftlichen Abfällen.

Im Zusammenhang mit der Umwandlung von Tropenwald in Weidegebiete oder anderweitig landwirtschaftlich genutzte Flächen findet die Biomasseverbrennung in zwei Phasen statt: Zunächst wird während der eigentlichen Brandrodung ein großer Teil der Biomasse des Waldes verbrannt, später werden die Flächen durch landwirtschaftliche Maßnahmen (Erhalt, Schädlingsvernichtung) in regelmäßigen Abständen abgebrannt. Diese Form der Bewirtschaftung ist heute die bei weitem dominierende. In der weltweiten Bilanz sind daher die Bewirtschaftungsbrände (beispielsweise in den Savannen) von erheblich größerer Bedeutung als die Rodungsbrände. In 1990 wurden durch Waldbrände 987 Mio. t CO<sub>2</sub>, durch Savannenbrände hingegen 2047 Mio. t CO<sub>2</sub> emittiert (69).

Bei der Biomasseverbrennung werden außerdem die klimawirksamen Spurengase Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (CH) emittiert.

Von der Brandrodung sind auch die Böden betroffen. Durch die Überführung von natürlichen Waldbeständen in landwirtschaftlich genutzte Flächen wird der pro Flächeneinheit in der Biomasse fixierte Kohlenstoffgehalt um den Faktor 20–100 reduziert und der Differenzbetrag durch Verbrennung oder mikrobielle Zersetzung der gerodeten Biomasse beziehungsweise durch die erhöhte Mineralisation des im Boden vorhandenen Humus als CO<sub>2</sub> freigesetzt. Erosion des freiliegenden Bodens führt zu weiteren Kohlenstoffverlusten. Durch die veränderte Landnutzung wird auch der Austausch von Spurengasen zwischen Böden und Atmosphäre in Art und Menge verändert. Mikroflora und -fauna werden durch Änderungen des Nährstoffzuflusses und des pH-Wertes beeinflusst. Es stellt sich ein neues Gleichgewicht in Abhängigkeit von den landwirtschaftlichen Maßnahmen (Düngung, Beweidung, Erosionskontrolle usw.) ein. Als CO<sub>2</sub>-Senke kann die Landwirtschaft nur in begrenztem Umfang gelten. Zwar wird CO<sub>2</sub> wieder in der pflanzlichen Biomasse und im Humus der Böden festgelegt, in der Bilanz ist der Kohlenstoffgehalt jedoch erheblich geringer als im Primärwald oder in bewirtschafteten Wäldern.

Neben der Biomasseverbrennung und den veränderten Quellen- und Senken-Verhältnissen ist mit zunehmender Intensivierung der Landwirtschaft auch ein Verbrauch von fossilen Energieträgern verbunden. Die Herstellung von mineralischem Dünger, die Nutzung von Landmaschinen, Lagerraum und Kühlketten ziehen in Westdeutschland Energieverbräuche mit 25,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen nach sich. Dies entspricht

3 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus den anderen Wirtschaftssektoren (70).

In der Bundesrepublik Deutschland haben die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verbrennung von Biomasse und Landnutzungsänderungen nur eine untergeordnete Bedeutung. Die Landwirtschaft kann daher nur durch Energieeinsparung in landwirtschaftlichen Tätigkeitsbereichen bzw. durch Gewinnung und Nutzung erneuerbarer Energieträger zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Freisetzungen beitragen.

### Methan (CH<sub>4</sub>)

Der jährliche Anstieg der Methankonzentration von 1–2 % geht im wesentlichen auf anthropogene Aktivitäten zurück. Er folgt dem Anstieg der Weltbevölkerung. Die Angaben über die Höhe der Methanemissionen schwanken auf Grund von methodischen Problemen teilweise noch sehr stark. Die Summe der Emissionen (natürliche und anthropogene Quellen) wurde zuletzt mit 500 Mio. t CH<sub>4</sub> pro Jahr bestimmt (67). Der Anteil der Landwirtschaft soll rund 70–80 % der Gesamtemissionen betragen (71).

In erster Linie sind hier Emissionen aus Naßreisbau, der Tierhaltung und der Verbrennung von Biomasse zu nennen (siehe Tab. 2.9).

Naßreisbau wird überwiegend (90 %) in den tropischen und subtropischen Regionen Asiens, zu weit geringeren Anteilen in Lateinamerika, Afrika und Australien betrieben. In den überfluteten Böden der Reisfelder wird die organische Masse anaerob (unter Luftabschluß) durch bestimmte Bakteriengruppen (methanogene Archaeobakterien) abgebaut. Dabei entsteht Methan. Dieses wird zu einem großen Teil bereits an der Wasseroberfläche durch methanotrophe Bakterien wieder oxidiert, dennoch werden so immer noch 20–100 Mio. t Methan pro Jahr freigesetzt.

Im Hinblick auf das erwartete weitere Bevölkerungswachstum ist in den nächsten Jahrzehnten mit einem stark zunehmenden Bedarf an Reis zu rechnen. Das internationale Reisforschungsinstitut (IRRI, Manila, Philippinen) schätzt, daß die Welt-Reisproduktion von 519 Mio. t im Jahr 1990 auf mindestens 556 Mio. t im

Tabelle 2.9

### Methan (CH<sub>4</sub>)

Verweildauer . . . . .	8–12 Jahre
jährlicher Zuwachs . . . . .	1–2 %
globale jährliche Emission . . . . .	500 Mio. t
anthropogene Quellen:	
Reisfelder . . . . .	20–100 Mio. t
Tierhaltung . . . . .	60–100 Mio. t
Biomasseverbrennung . . . . .	55–100 Mio. t
Abfälle . . . . .	20– 35 Mio. t

Quelle: Bouwman, 1991 (72)

Jahr 2000 und 758 Mio. t im Jahr 2020 steigen muß (entspricht 46 % Steigerung insgesamt oder 1,5 % Steigerung pro Jahr). Dies wird durch Intensivierung des Anbaus zur Erhöhung der Emissionen führen (73).

Methan-Emissionsraten aus Reisfeldern werden jedoch erheblich vom Bewässerungsmanagement, der Anzahl der jährlichen Ernten, den Düngeverhältnissen und nicht zuletzt auch von den verwendeten Reissorten beeinflusst.

Optimistischen Schätzungen zufolge könnte möglicherweise durch neue und verbesserte Anbautechniken, effizienteres Wassermanagement und Züchtung „emissionsarmer“ Reissorten trotz erhöhter Produktion eine Stagnation der Emissionsrate erreicht werden. Zur Umsetzung ist ein schnelles, interdisziplinäres und integriertes Entwicklungskonzept notwendig.

In den entwickelten Ländern werden jährlich 60 bis 100 Mio. t Methan aus der Tierhaltung emittiert. Dieses stammt zum überwiegenden Teil (90 %) aus dem anaeroben Abbau von Zellulose in Wiederkäuermägen. Seit 1950 hat sich die Fleischproduktion auf der Erde vervierfacht, während sich die Erdbevölkerung in diesem Zeitraum nur verdoppelt hat. Ein erheblicher Teil der Futtermittel für die Großtierhal-

tung in den Industrieländern stammt aus Importen aus Entwicklungsländern.

Die für die Bundesrepublik Deutschland kalkulierte Methanemission liegt bei etwa 1,2 Mio. t CH<sub>4</sub> pro Jahr (74). Dies und die Methanemissionsraten weiterer Länder sind in Tab. 2.10 dargestellt.

Die Methanproduktion wird von der Art und Menge des Futtermittels beeinflusst. Intensive (Massen-)Tierhaltung mit entsprechend energiereicher Nahrung hat maximale Methanbildungsraten zur Folge. In Energiebilanzmessungen wurde festgestellt, daß bis zu 12 % der Futterenergie in Form von Methan verloren gingen (76).

In der Bundesrepublik Deutschland liegen in der Anpassung der Tierfütterung, der Verringerung der Stückzahlen und der Massentierhaltung Ansatzpunkte für eine Reduzierung der Methan-Emissionen.

Bei Biomasseverbrennung durch Brandrodung sowie bei natürlichen Wald- und Steppenbränden werden jährlich 55-100 Mio. t Methan emittiert (72). Diese Brände werden auch in Zukunft schwer kontrollierbar sein.

Zusätzliche, bisher wahrscheinlich unterschätzte Methan-Entstehungsquellen sind menschliche und

Tabelle 2.10

**Methan-Emissionen aus der Tierhaltung in 1990**(in 1000 t CH<sub>4</sub> pro Jahr)

	Land / Region	Total	Prozent
1	Belgien .....	168	2,8
2	Dänemark .....	138	2,3
3	Frankreich .....	1 326	22,4
4	Deutschland (Bundesrepublik und DDR) .....	1 218	20,6
5	Griechenland .....	159	2,7
6	Irland .....	353	6,0
7	Italien .....	608	10,3
8	Luxemburg .....	6	0,1
9	Niederlande .....	389	6,6
10	Portugal .....	128	2,2
11	Spanien .....	516	8,7
12	Vereinigtes Königreich .....	905	15,3
	Total .....	5 914	100,0
1-12	EG .....	5 914	8,0
13	OECD Europa ohne EG .....	1 477	2,0
14	OECD-Pazifik .....	3 787	5,1
15	Nicht-OECD Europa .....	2 310	3,1
16	UdSSR .....	7 577	10,2
17	Nord-Amerika .....	6 738	9,1
18	Latein-Amerika .....	12 613	17,0
19	Afrika .....	9 565	12,9
20	Mittlerer Osten .....	1 212	1,6
21	asiatische Länder mit Planwirtschaft .....	6 171	8,3
22	Süd- und Südost-Asien .....	16 736	22,6
	Total .....	74 100	100,0

Quelle: Bouwman, 1991 (75)

tierische Abfälle. Neue Zahlen gehen von einer globalen jährlichen Emission von 20–35 Mio. t Methan aus. Hier trägt insbesondere der anaerobe Abbau von Müll in Deponien wesentlich zur Bildung von Methan bei (67). Einer aktuellen Untersuchung zufolge entweicht jährlich aus bundesdeutschen Müll- und Klärschlammdeponien die nicht unbedeutliche Menge von 1,1–1,6 Mio. t CH<sub>4</sub> (80). Lösungsansätze wären die Abfallvermeidung, -verminderung und -verwertung, sowie moderne Deponiebewirtschaftung, insbesondere durch gasdichte Abdeckung des Deponiekörpers und energetische Nutzung des Deponiegases. Weitere Emissionsquellen sind kommunale Abwasseranlagen, Leckagen aus Biogasanlagen und andere Aufbereitungsprozesse, die unter Anaerobiosis (Luftabschluß) ablaufen.

### Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O)

Die bisher vorliegenden Daten zur Emission von Distickstoffoxid lassen noch keine definitive Zuordnung zu einzelnen Emissionsquellen zu. Fest steht, daß der Beitrag aus der Verbrennung fossiler Energieträger bisher überschätzt wurde. Es ist daher wahrscheinlich, daß die jährliche Freisetzung von 3,0 bis 4,5 Mio. t N<sub>2</sub>O (78) zum überwiegenden Teil von der Landwirtschaft verursacht wird.

N<sub>2</sub>O ist in zweierlei Hinsicht klimawirksam: einmal ist es neben den FCKW der wichtigste Ozonzerstörer. N<sub>2</sub>O-Moleküle haben eine sehr hohe Verweildauer von 130 bis 150 Jahren. In großen Höhen entstehen durch die photolytische Zersetzung des N<sub>2</sub>O reaktive Stickoxide, die zum Abbau des Ozon beitragen. Momentan wird dieser Abbau vorwiegend von den FCKW geleistet. Nach Ausstieg aus der FCKW-Produktion könnte sich durch die kumulative Zunahme der N<sub>2</sub>O-Konzentration ein ähnlich hohes Ozonzerstörungspotential aufbauen (79).

Weiterhin trägt Distickstoffoxid als treibhauswirksames Gas zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei. Bisher wird dieser Beitrag auf 5 % geschätzt (10). Auch hier liegt die besondere Gefährdung in der Langlebigkeit des Gases, so daß mit einem steigenden Beitrag gerechnet werden muß (80). N<sub>2</sub>O entsteht anaerob bei der Denitrifikation und Nitratabmonifikation (Abbau von Nitrat im Boden) sowie aerob in geringerem Ausmaß bei der Nitrifikation (Nitratbildung im Boden). Bestimmte Bakteriengruppen bewirken diese Prozesse.

Es gilt als sicher, daß die Zunahme der N<sub>2</sub>O-Emissionen (im letzten Jahrzehnt von 0,2 % auf 0,3 %) auf die gesteigerte und teilweise übermäßige Zufuhr von industriellem und organischem Stickstoff-Dünger zurückzuführen ist. Seit 1960 stieg der weltweite N-Düngeraufwand jährlich um 6,8 %, allein 1977 bis 1987 insgesamt um ca. 50 % (81, 76). 3,2 % des Düngerstickstoffs werden in Form von N<sub>2</sub>O wieder freigesetzt (78). Auch ein zunehmender Anbau von Leguminosen (Stickstoff-Fixierung durch symbiotische Knöllchenbakterien) trägt zur Steigerung der Emissionen bei.

Weltweit besteht ein erhebliches Ungleichgewicht im Düngereinsatz mit großen N-Bilanz-Überschüssen in

den Industrieländern. Nicht vergessen werden darf, daß überschüssiger Stickstoff auch Oberflächen- und Grundwasser kontaminiert und daher auch aus scheinbar „natürlichen“ Ökosystemen in Form von N<sub>2</sub>O emittiert wird. Letztlich erscheinen die gesamten anthropogenen N-Einträge via Denitrifikation als N<sub>2</sub> oder N<sub>2</sub>O in der Atmosphäre.

Bei weiter steigender Weltbevölkerung ist ein globaler Anstieg des Düngereinsatzes zu erwarten. Die Höhe dieses Anstiegs ist nur sehr schwer einzuschätzen. Wegen des hohen Gefährdungspotentials des N<sub>2</sub>O muß dieser Sektor genau beobachtet werden. Daher ist die Reduzierung der Düngerezufuhr, die Herstellung ausgeglichener Stickstoff-Bilanzen und eine Extensivierung der Landwirtschaft in den Industrieländern nachdrücklich zu fordern.

### Weitere treibhauswirksame Gase

Als weitere treibhauswirksame Gase, die jedoch zum Treibhauseffekt marginal beitragen, sind Kohlenmonoxid (CO) und Carbonylsulfid (COS) zu nennen. Ersteres entsteht bei der Biomasseverbrennung, jährlich werden so 350 Mio. t CO emittiert (82). CO interferiert mit anderen atmosphärischen Komponenten wie CH<sub>4</sub>, OH und O<sub>3</sub> und führt so über Rückkopplungseffekte zu weiteren Störungen des Systems.

Die marine Emission des Carbonylsulfids erfolgt hauptsächlich aus Küsten- und Schelfbereichen der Meere. Hier werden organische Schwefelverbindungen photochemisch abgebaut (83). Der anthropogene Eintrag von Nährstoffen aus Tierhaltung und Düngung könnte über die Steigerung der Biomasseproduktion (Algenblüten) zu einem deutlichen Anstieg der Emissionen führen.

#### 2.3.3.2 Indirekt wirksame Spurengase

##### Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Es ist bereits ausgeführt worden, daß die durch intensive Landwirtschaft und Tierhaltung entstehenden Stickstoffüberschüsse und die damit verbundenen Emissionen zur Klimaänderung beitragen.

Zusätzlich zum Distickstoffoxid entstehen in der Landwirtschaft auch Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) als gasförmige Stickstoffverbindungen.

Beide Gase werden über Luft und Wasser in natürliche und naturnahe, an niedrige Stickstoff-Gehalte angepasste Ökosysteme eingetragen. Dies führt zunächst zur Eutrophierung terrestrischer (Wälder, Heiden, Moore) und aquatischer Gesellschaften (Binnen- und Küstengewässer). Letztlich wird aber auch dieser zusätzlich anthropogen eingetragene Stickstoff denitrifiziert werden und ein Teil in Form von Distickstoffoxid als klimawirksames Gas in der Atmosphäre erscheinen.

Eine weitere schädliche Auswirkung ist die Versauerung der Böden und Gewässer. Die Versauerung sowie erhöhte Stickstoff-Einträge und steigende Konzentrationen von Luftschadstoffen (O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>) sind

inzwischen als maßgebliche Ursachen für das Waldsterben in der nördlichen Hemisphäre identifiziert worden.

Durch diese Effekte werden Ökosysteme nachhaltig geschädigt, eine flexible Anpassung der gestressten Ökosysteme an Klimaänderungen wird erschwert.

### Ammoniak (NH<sub>3</sub>)

National (BRD), kontinental (Westeuropa) und global sind die NH<sub>3</sub>-Emissionen zu 90 % der Landwirtschaft und hier zu 80 % der Tierhaltung zuzuordnen. In der Bundesrepublik Deutschland werden jährlich 528 000 t NH<sub>3</sub> emittiert. Ammoniak entsteht im Stallbereich, der Weidewirtschaft sowie bei Lagerung und Ausbringung von organischem Dünger.

### Stickstoffoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)

NO und NO<sub>2</sub> (zusammen als NO<sub>x</sub> bezeichnet) entstehen bei Waldrodung und Abbrand sekundärer Kultursavannen. Diese Brände können in tropischen Gebieten über hohe Stickoxid-Emissionen zu Ozonkonzentrationen führen, die mit den Photosmoggebieten der Nordhemisphäre vergleichbar sind (83). NO<sub>x</sub> entstehen weiterhin bei den gleichen mikrobiologischen Prozessen, in denen auch N<sub>2</sub>O gebildet wird (Denitrifikation, Nitrifikation). Die Bildungsraten der drei Gase variieren in Abhängigkeit von den Bodenbedingungen. Die NO<sub>x</sub>-Freisetzung wird durch Stickstoffdüngung stark stimuliert.

Durch Minderung der Viehbestände, Fütterungsumstellungen und Reduzierung der Güllewirtschaft würden die Ammoniak- und Stickoxid-Freisetzungen vermindert. Durch Optimierung der N-Düngung sowie der Lagerung und Anwendung von organischem Dünger könnten in der Bundesrepublik Deutschland erhebliche Reduktionen sowohl von NH<sub>3</sub> als auch von NO<sub>x</sub> erreicht werden. Dies wäre nicht nur in ökologischer, sondern auch in ökonomischer Hinsicht wünschenswert.

## 2.3.4 Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Halone und chemisch verwandte Ersatzstoffe

### 2.3.4.1 Allgemeines

Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Halone sind für den Ozonabbau in der Stratosphäre hauptverantwortlich und tragen gleichzeitig als Treibhausgase zu der anthropogen verursachten Erwärmung der Erde bei. Vor dem Hintergrund des sich weiter verschärfenden Ozonabbaus (siehe Kap. 3.1) ist die internationale Staatengemeinschaft in Zusammenarbeit mit der chemischen Industrie aufgefordert, den Ausstieg aus der Produktion ozonrelevanter Substanzen umgehend zu vollziehen (siehe Kap. 5).

Vollhalogenierte FCKW und Halone stellen chemisch sehr inerte Verbindungen dar, die nahezu ausschließlich in der Stratosphäre photolytisch abgebaut wer-

den. Teilhalogenierte Verbindungen (H-FCKW) enthalten neben Kohlenstoff- und Halogenatomen auch Wasserstoffatome. Letztere bewirken, daß die Verbindungen zum größten Teil in der Troposphäre abgebaut werden und somit ein geringeres, aber nicht zu unterschätzendes Ozonzerstörungs- und Treibhauspotential als die bisher eingesetzten FCKW aufweisen.

Fluorkohlenwasserstoffe FKW tragen nicht zum Ozonabbau, wohl aber zum Treibhauseffekt bei. H-FCKW und FKW werden als mögliche Ersatzstoffe für die FCKW diskutiert. Jedoch sind die Umweltverträglichkeitsprüfungen (Toxizität, mutagene und karzinogene Wirkungen) bei den meisten noch nicht abgeschlossen. Ein verstärkter Einsatz teilhalogener H-FCKW ist jedoch wegen des Beitrages zum Treibhauseffekt und zur Ozonzerstörung zu vermeiden.

Die Tab. 2.2 in Kap. 2.2.1.3 gibt für die wichtigsten FCKW, H-FCKW und Halone die momentanen Konzentrationen, die jährlichen Zuwachsraten sowie die mittleren Verweilzeiten in der Atmosphäre an. Außerdem enthält diese Tabelle Abschätzungen der Ozonzerstörungs- und Treibhauspotentiale.

### 2.3.4.2 Produktion und Verbrauch

Die Emissionsraten der FCKW, der Halone sowie chemisch verwandter Ersatzstoffe sind bisher sehr unbestimmt. Die chemische Industrie ist nur in Ausnahmefällen bereit, genaue Angaben über Produktion und Verbrauch zu machen. Damit ist es nicht möglich, eine Bilanzierung zwischen dem Einsatz ozonrelevanter Substanzen, deren Emissionsraten sowie der gemessenen Konzentration in der Atmosphäre aufzustellen.

### Voll- und teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe

Für das Jahr 1989 gibt die Tab. 2.11 einen Überblick über Produktion und Verbrauch der wichtigsten voll- und teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffe innerhalb der EG-Staaten. Danach wurden vorwiegend die Substanzen FCKW 11 und FCKW 12 hergestellt, wobei das FCKW 11 zu ca. 76 % zur Herstellung von Schäumen benutzt worden ist, während das FCKW 12 zum überwiegenden Teil in den Klimaanlagen von Autos Verwendung fand. Der prozentuale Anteil der FCKW Anwendungsbereiche innerhalb der verschiedenen Staaten unterscheidet sich dabei erheblich.

Die Abb. 2.15 gibt den zeitlichen Verlauf der FCKW Produktion weltweit, in der EG und für die Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der neuen Bundesländer) an. Danach hat die FCKW-Produktion bezogen auf 1986 weltweit nur sehr geringfügig abgenommen, während in der EG eine Abnahme um 35 %, in der Bundesrepublik Deutschland um 49 % zu verzeichnen ist.

Tabelle 2.11

**FCKW-Produktions-, Import- und Exportmengen im Jahr 1989 in der EG (in Tonnen)**

FCKW	11	12	113	114	115	H-FCKW
Produktion (tatsächliche Produktion außer Import, Verkauf zwischen EG-FCKW-Produzenten und Zwischenproduktherstellung) . . . . .	165 087	124 073	68 040	6 346	8 944	61 157
Importe von Nicht-EG-Staaten . . . . .	—	46	387	—	1 167	k. A.
Verkauf innerhalb der EG . . . . .	108 507	71 131	44 578	4 123	3 478	32 299
Gesamtexporte in Länder außerhalb der EG (inklusive Verkauf zwischen Nicht-EG-FCKW-Produzenten) . . . . .	53 201	53 467	22 341	1 899	6 559	k. A.
Bestände am 1. Januar 1989 . . . . .	6 865	8 453	7 201	807	766	k. A.
Bestände am 31. Dezember 1989 . . . . .	10 333	8 127	8 799	1 135	849	k. A.
Verhältnis EG/Welt in Prozent						
– Produktion	54		27		63	28
– Verbrauch . . . . .	36		18		25	15

k. A. = keine Angaben

Quelle: BMU, entnommen: EK, 3. Bericht

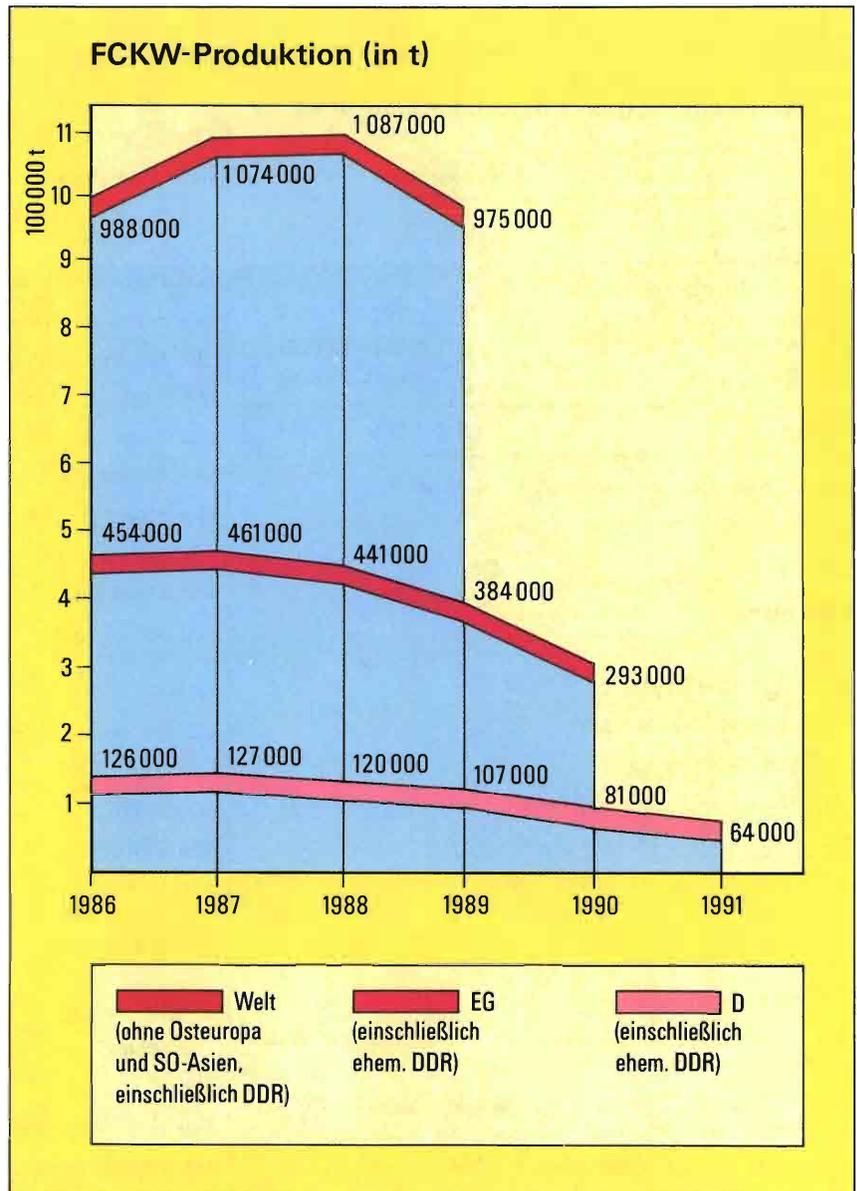


Abb. 2.15: Zeitlicher Verlauf der FCKW-Produktion weltweit, in der EG und für die Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der neuen Bundesländer), Quelle: BMU

**Halone**

Die Halon Produktion ist innerhalb des Zeitraums 1986 bis 1990 von 71 200 t auf 54 300 t im Jahr 1990 gesunken, allerdings nicht kontinuierlich. Für die Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der neuen Bundesländer) gibt das BMU für die Halon Produktion 18 100 t im Jahr 1986 sowie 15 900 t für das Jahr 1990 an. (Diese Daten sind in gewichtete Tonnen umgerechnet, d. h. die jeweiligen Produktionsmengen werden mit dem im Montrealer Protokoll genormten Ozonabbaupotential multipliziert und entsprechen somit einer äquivalenten FCKW-Menge mit dem Ozonabbaupotential 1).

Schätzungen des Halonverbrauches für das Jahr 1986 in der EG, der Bundesrepublik Deutschland, den USA sowie in den übrigen Staaten sind in Tab. 2.12 zusammengefaßt. Es wird angenommen, daß der Haloneinsatz innerhalb der vergangenen 15 bis 20 Jahre drastisch gestiegen ist. Die weitere Verwendung von Halonen für die Löschmittelherstellung soll künftig stark eingeschränkt werden.

Tabelle 2.12

**Weltweiter Halonverbrauch im Jahre 1986**

Staaten	Halonmenge (in Tonnen)
Europäische Gemeinschaften . . . . .	6 700
(davon Bundesrepublik Deutschland) . . . . .	ca. 1 300– 2 000
USA . . . . .	8 000–10 000
Übrige Länder . . . . .	8 000–10 000
Welt . . . . .	ca. 22 700–26 700

Quelle: UBA 1989, entnommen III. EK-Bericht

**Literatur**

- (1) WMO/UNEP (IPCC), 1990 und 1992
- (2) Flohn, H., Januar 1992
- (3) Berz, G., März 1992
- (4) Halpert, M. S., und Ropelewski, C. F. (Hrsg.), 1991
- (5) Bradley et al., 1987
- (6) Patzelt, G. und M. Aellen, 1990
- (7) Kuhn, M., März 1992
- (8) Zwally, H. J., 1989
- (9) Weidick, A., 1984
- (10) Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, 1990
- (11) Gaffen, D. J., Barnett, T. B., Elliot, W. P., 1991 Hense, A., Krahe, P., Flohn, H., 1988
- (12) Raval, A., und Ramanathan, V. 1990
- (13) Rind, D. et al., 1991 Del Genio, A., Lacis, A. A., und Ruedy, R. A., 1991
- (14) Kohlmaier, G. H., Januar 1992
- (15) Tans, P. P., Fung, I. Y., und Takahashi, T., 1990
- (16) Keeling, C. D., Piper, S. C., und Heimann, M., 1989
- (17) Vaghjiani, G. L., und Ravishankara, A. R., 1991
- (18) Crutzen, P. J., 1991
- (19) Steele, L. P. et al., 1987
- (20) Khalil, M. A. K., Rasmussen, R. A., und Shearer, M. J., 1989
- (21) Khalil, M. A. K., und Rasmussen, R. A., 1990
- (22) Zellner, R., Januar 1992
- (23) WMO/UNEP Global Ozone Research and Monitoring Project, Nr. 25, 1992
- (24) WMO/UNEP Global Ozone Research and Monitoring Project Nr. 18, 1989
- (25) Mather, J. H., und Brune, W. H., 1990
- (26) Pitari, G., Visconti, G., und Rizi, V., 1991
- (27) Volz-Thomas, A. und Kley, D., 1988
- (28) Lacis, A. A., Wuebbles, D. J. und Logan, J. A., 1990
- (29) Brunke, E.-G., Scheel, H. E. und Seiler, W., 1990
- (30) Hofmann, D. J., 1990 Hofmann, D. J., 1991
- (31) Jäger, H., 1991 Jäger, H., Januar 1992
- (32) Husar, R. B. et al., 1979
- (33) Graßl, H., 1992 Coakley, J. A., Bernstein, R. L. und Durkee, P. A., 1987
- (34) Hansen, J. et al., 1992
- (35) Schumann, U., 1992
- (36) Harrison, E. F. et al., 1990
- (37) Sagan, C., Toon, O. B. und Pollack, J. B., 1979
- (38) Foukal, P. und Lean, J., 1990
- (39) Gilliland, R. L., 1982
- (40) Milankovic, M., 1941 Berger, A., 1980
- (41) Siefert, 1982
- (42) Marchetti, 1980
- (43) BMWi, 1991 GECR (Global Environmental Change Report), 1991
- (44) IEA, 1991
- (45) Süddeutsche Zeitung, 3. Juni 1991
- (46) WEC, 1989
- (47) BMWi, 1991 Statistisches Bundesamt, 1990
- (48) BMU/IMA, 1991
- (49) Linke Säulen: Bundesregierung 1992; rechte Säulen: BMWi, 1991; DIW, 1991; eigene Berechnungen
- (50) BMWi, 1991; Werte für 1991: Schiffer, 1992; eigene Berechnungen
- (51) BMU/IMA, 1991
- (52) Prognos, 1991
- (53) BMWi, 1991
- (54) Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 1991
- (55) United Nations, 1990

- (56) BUND, 1992
- (57) Scharpenseel, 1992
- (58) Schumann, U., 1990
- (59) Schumann, U., 1992
- (60) Myers, 1991
- (61) FAO, 1985
- (62) FAO, 1988
- (63) FAO, 1992
- (64) Graßl, H., 1992
- (65) WMO/UNEP (IPCC), 1992
- (66) Bouwman, A. F., 1991, S. 207
- (67) WMO/UNEP (IPCC), 1992
- (68) Norse, D., 1991
- (69) Bouwman, A. F., 1991, S. 248
- (70) Haider, K., Sauerbeck, D., 1991
- (71) Bouwman, A. F., 1990
- (72) Bouwman, A. F., 1991, S. 216
- (73) Neue, H. U., 1991, IRRI, 1990
- (74) FAL, 1990
- (75) Bouwman, A. F., 1991, S. 239
- (76) FAL, 1990
- (77) Graßl u. a., 1991
- (78) WMO/UNEP (IPCC), 1992
- (79) Crutzen, P., Heinloth, K., 1991
- (80) Bouwman, A. F., 1991, S. 216
- (81) Bouwman, A. F., 1991, S. 219; Sauerbeck, D., 1991, S. 271
- (82) Bouwman, A. F., 1991, S. 248
- (83) Andreae, M., 1991, S. 4

### 3 Darstellung des zukünftigen Gefährdungspotentials

#### Zusammenfassung

Der durch den Menschen verursachte Abbau des stratosphärischen Ozons ist weitaus stärker als dies noch vor wenigen Jahren angenommen worden ist. Der Ozonverlust ist am stärksten während der Winter- und Frühjahrsmonate mit etwa 6 % pro Jahrzehnt. Dies entspricht einer Verstärkung des Trends um weitere 2 % pro Jahrzehnt gegenüber vorangehenden Analysen und ist auf die verstärkte Ozonabnahme im Verlauf der 80iger Jahre zurückzuführen. Das antarktische Ozonloch 1991 war hinsichtlich der „Tiefe“ und Ausdehnung vergleichbar mit den Ozonlöchern der Jahre 1987, 1989 und 1990.

Im Winter 1991/92 wurden über weiten Bereichen der Nordhemisphäre ungewöhnlich niedrige Ozon-Gesamt mengen gemessen, wobei in Europa die Werte in den Monaten Dezember, Januar und Februar um bis zu 10 % unter dem langjährigen Mittel lagen.

Nach heutiger Erkenntnis sind alle chemisch bedingten Ozonverluste auf den Gehalt der Stratosphäre an Chlor- und Bromverbindungen zurückzuführen. Der Anstieg der Konzentrationen dieser beiden Elemente in der Stratosphäre wird überwiegend durch anthropogene Emissionen verursacht.

Es wird erwartet, daß sich die beobachteten Ozone Trends in den kommenden Jahrzehnten weiter verstärken werden. Ein sofortiger Ausstieg aus der Produktion der FCKW ist unbedingt erforderlich.

Das globale Klima der kommenden 100 bis 200 Jahre wird maßgeblich durch den anthropogenen Treibhauseffekt beeinflusst. Unter der Annahme, daß keine wesentlichen Reduktionen der anthropogenen Emissionen treibhausrelevanter Spurengase erfolgen, muß für das kommende Jahrhundert von einem mittleren Anstieg der globalen Mitteltemperatur von 0,3 °C pro Jahrzehnt ausgegangen werden. Zum Zeitpunkt der Verdopplung der äquivalenten CO<sub>2</sub>-Konzentration (etwa 2025) wird dann die globale Mitteltemperatur gegenüber heute um etwa 1,5 °C höher sein.

Die Erwärmung über den Kontinenten wird stärker sein als über den Ozeanen. In den hohen Breiten werden die Niederschläge generell zunehmen, während in den mittleren Breiten im Winter eine Zunahme der Niederschläge und im Sommer eine Abnahme erwartet wird.

Die Folgen der globalen Klimaveränderung können inzwischen zum Teil durch Messungen belegt werden. Zudem wurden bei der Abschätzung der regionalen Gefährdungspotentiale wesentliche Fortschritte erzielt. Es ist zu befürchten, daß die Länder des Südens von der Veränderung des Klimas stärker betroffen sein werden als die Industrieländer.

Die unmittelbarste Bedrohung geht von der bereits festzustellenden Häufung klimabedingter Katastro-

phen, wie z. B. tropischen Wirbelstürmen, aus. Auch langanhaltende Dürren im Wechsel mit Starkniederschlägen werden in Zukunft weit häufiger auftreten und vor allem die semi-ariden Gebiete gefährden.

Der zu erwartende Anstieg des Meeresspiegels um 70 bis 100 cm im kommenden Jahrhundert wird zu einer Verstärkung von Flutkatastrophen und zur permanenten Überflutung von fruchtbaren und z. T. dichtbesiedelten Küstenebenen führen. Besonders gefährdet sind die Delta- und Ästuarmündungen großer Flüsse. Darüber hinaus werden einige pazifische Inselstaaten erhebliche Flächenverluste zu beklagen haben und drohen, zum Teil unbewohnbar zu werden.

Die Anpassungsfähigkeit der Wälder und der natürlichen Ökosysteme wird sowohl durch das Ausmaß als auch durch die Schnelligkeit der Klimaveränderungen überschritten werden. Es droht ein großflächiger Zusammenbruch der Ökosysteme mit drastischen ökologischen und sozioökonomischen Folgen.

Insbesondere die landwirtschaftliche Produktion wird durch die Klimaverschiebungen gefährdet. Vor allem in den semi-ariden Klimaten ist mit einer Austrocknung der Böden und den daraus resultierenden Degradationserscheinungen (z. B. Versalzung, Erosion) zu rechnen. Eine Häufung von klimatischen Extremereignissen sowie die stärkere Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten und -schädlingen im wärmeren Klima werden sich negativ auf die Erträge auswirken. Der mit einem erhöhten CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre einhergehende Düngeneffekt wird sich dagegen kaum auf das Pflanzenwachstum auswirken. Angesichts einer rapide anwachsenden Bevölkerung sind drastische Auswirkungen auf die weltweite Ernährungssituation zu befürchten.

Eine zusätzliche Gefährdung des Klimas kann durch die Beschleunigung des mikrobiellen Abbaus der abgestorbenen organischen Substanz in einem wärmeren Klima ausgehen. Die dadurch hervorgerufene zusätzliche Freisetzung von Kohlendioxid in die Atmosphäre könnte ein Ausmaß annehmen, das mit dem aus der Verbrennung fossiler Energieträger vergleichbar ist und zu einer dramatischen Verstärkung des Treibhauseffektes führen kann.

#### 3.1 Stratosphärischer Ozonabbau

##### 3.1.1 Gegenwärtige Situation und zukünftige Entwicklung

Das antarktische Ozonloch 1991 war hinsichtlich „Tiefe“ und Ausdehnung vergleichbar mit den Ozonlöchern der Jahre 1987, 1989 und 1990. Die minimale vertikale Ozon-Säulendichte betrug 110 Dobson-Ein-

heiten. Das entspricht einem Ozon-Verlust von 60 % gegenüber den Werten Ende der 70er Jahre. Das Ozonloch 1991 nahm etwa 6,5 % der Gesamtfläche der Südhemisphäre ein.

Das mittlere Chlor-Mischungsverhältnis in der Stratosphäre, das überwiegend durch anthropogene Emissionen in Form von FCKW bestimmt ist, wird mit 3,3 bis 3,5 ppbv angegeben (1). Der weitere Anstieg auf einen Wert von 4,1 ppbv bis zum Jahre 2000 ist auch dann nicht mehr zu vermeiden, wenn alle Staaten das verschärfte Montrealer Protokoll (2. Vertragsstaatenkonferenz, London 1990) befolgen. Wird dieses Protokoll strikt befolgt, so dauert es nach den auf Modellrechnungen basierenden Prognosen noch bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts bis das mittlere stratosphärische Chlor-Mischungsverhältnis

wieder auf 2 ppbv – ein Wert, wie vor dem Auftreten des antarktischen Ozonloches – abgesunken ist.

Das stratosphärische Ozon hat in den letzten 10 Jahren um ca. 5 bis 10 % pro Jahrzehnt abgenommen (1). Die Abb. 3.1 zeigt die aus Satellitendaten (TOMS) für den Zeitraum November 1978 bis März 1991 bestimmten Ozonabbauraten in Prozent pro Jahrzehnt nach geographischer Breite und verschiedenen Jahreszeiten. Bemerkenswert sind die saisonalen Unterschiede in den Ozontrends auf der Nordhalbkugel, während auf der Südhalbkugel die saisonalen Unterschiede (abgesehen von der Antarktis) geringer ausfallen. Die Ozonabnahme ist auf der Südhalbkugel stärker als auf der Nordhalbkugel. In den Tropen dagegen sind keine nennenswerten Verluste zu erkennen. Der Abbau des stratosphärischen Ozons wird sich in den

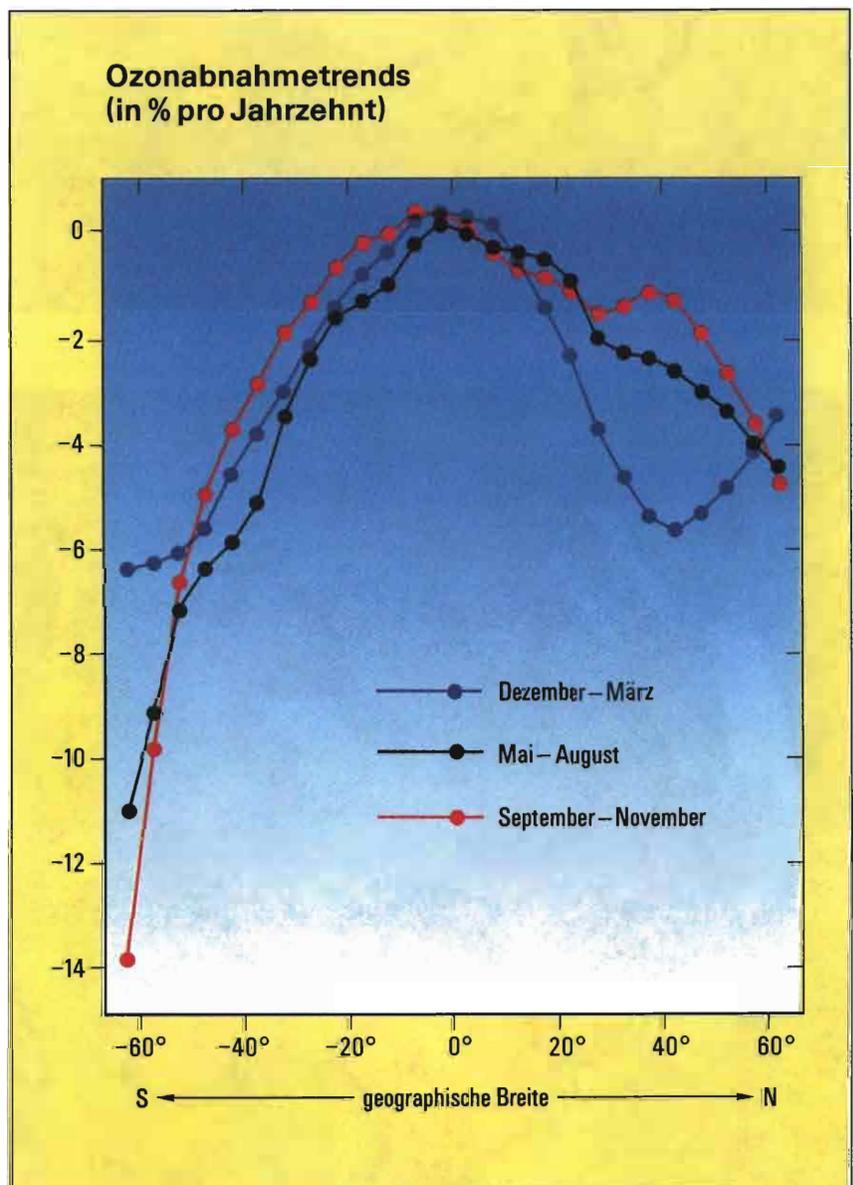


Abb. 3.1: Ozonabnahmetrends in % pro Jahrzehnt nach geographischer Breite und verschiedenen Jahreszeiten, bestimmt aus TOMS-Messungen für den Zeitraum November 1978 bis März 1991.  
(Quelle: WMO-Report 25, 1992)

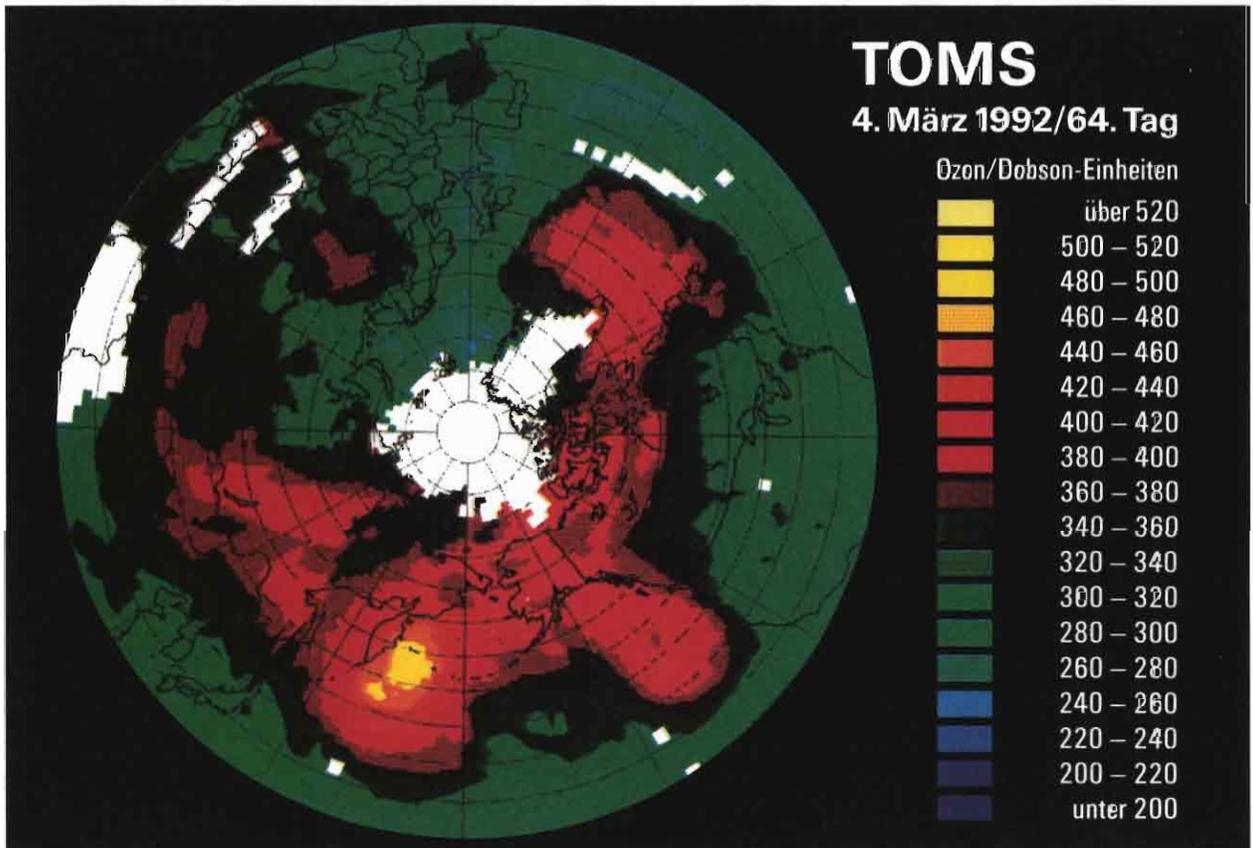
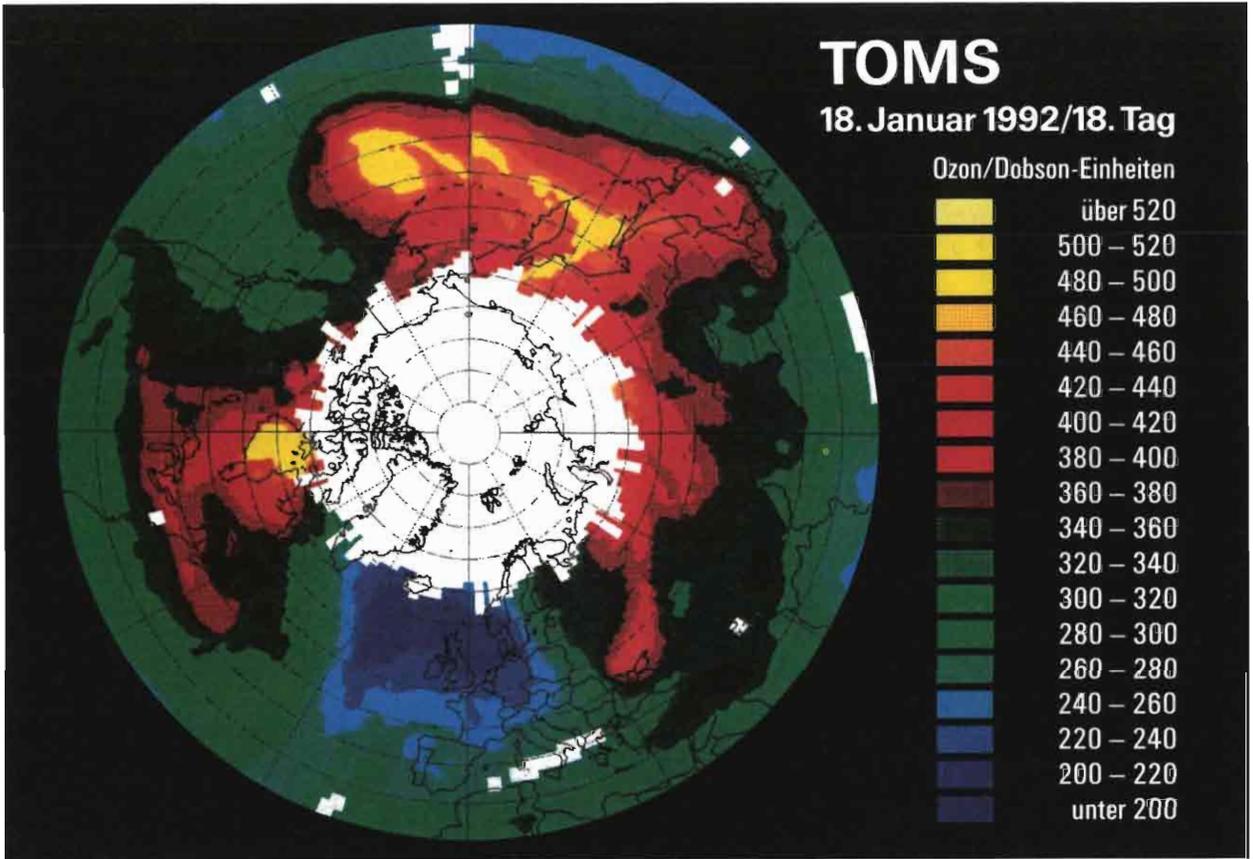


Abb. 3.2: TOMS-Daten der Gesamtozonsäulendichten der Nordhemisphäre am 18. Januar 1992 und am 4. März 1992  
(Krueger, A. J., 1992, private Mitteilung)

kommenden Jahren weiter fortsetzen und mit größter Wahrscheinlichkeit zu einer Verdopplung der Ausdehnung des antarktischen Ozonlochs in den nächsten 10 bis 20 Jahren führen (2).

Die Ergebnisse von Szenarienrechnungen zeigen, daß ein z. B. um drei Jahre vorgezogener Ausstieg aus der FCKW-Produktion sowohl den zu erwartenden Spitzenwert für das mittlere stratosphärische Chlor-Mischungsverhältnis von 4,1 auf 3,9 ppbv vermindert als auch das Abklingen der Chlorwerte auf 3 ppbv um 10 Jahre und auf 2 ppbv um 7 Jahre beschleunigt (1).

Im Winter 1991/92 wurden über weiten Bereichen der Nordhemisphäre ungewöhnlich niedrige Ozon-Gesamt mengen beobachtet. Die niedrigsten Ozon-Gesamt werte traten über Europa auf (3), wo die vertikalen Säulendichten nach einem „normalen“ Verhalten im November in den nachfolgenden Monaten (Dezember, Januar, Februar) um 10 % unter dem langjährigen Mittel lagen (Hohenpeißenberg). Ähnliche Beobachtungen wurden auch an den Stationen Lindenberg und Ny Ålesund (Spitzbergen, 79 °N) im Rahmen des „European Arctic Stratosphere Ozone Experiment (EASOE)“ gemacht. Die Veränderungen der Ozonkonzentration traten in allen Höhen der Stratosphäre auf, wobei die stärksten Verluste in der unteren Stratosphäre, d. h. im Höhenbereich zwischen 13 und 18 km festgestellt wurden.

Die Abb. 3.2 zeigt die aus TOMS-Messungen bestimmte Ozonsäulendichte über der Nordhemisphäre am 18. Januar 1992 sowie am 4. März 1992. Am 18. Januar 1992 betrug die Ozonsäulendichte im Kern dieser Ausdünnung nur 200 bis 220 Dobson-Einheiten und erreichte auch in Zentraleuropa einschließlich der Lage der Bundesrepublik Deutschland nur Werte bis zu 260 Dobson-Einheiten. Außerhalb dieses Gebietes lagen die Ozonwerte aber bei dem langzeitlichen Mittel von etwa 400 Dobson-Einheiten. Anfang März (siehe Abb. 3.2) existierte immer noch ein relatives Minimum in der Ozonsäulendichte über Europa; im Verlaufe des Februar 1992 lag aber auch eine zeitweise Rückkehr zu Normalwerten vor (3).

Die Ozon-Niedrigwerte über Europa fielen zeitlich und räumlich mit dem Auftreten eines ausgeprägten und lang andauernden Hochdruckgebiets über den britischen Inseln zusammen, was bereits auf einen unmittelbaren Einfluß meteorologisch bedingter dynamischer Prozesse hindeutet. Diese Prozesse sind in Verbindung mit heterogenen chemischen Prozessen mit größter Wahrscheinlichkeit für die Veränderung der Verteilung und Konzentration des stratosphärischen Ozons verantwortlich. Dieses steht im Einklang mit der Beobachtung einer nahezu normalen Verteilung der Ozon-Gesamtmenge in der nördlichen Nordhemisphäre außerhalb des Gebiets, in dem die Ozon-Niedrigwerte festgestellt wurden. Nach den TOMS-Satelliten-Daten lagen die über den gesamten betroffenen Bereich gemittelten Ozon-Gesamt mengen um 5–10 % unter dem entsprechenden Mittelwert der Jahre 1987/88. Interessant ist dabei, daß die Tagesminima in beiden Perioden vergleichbar, die Tagesmaxima 1992 aber erheblich niedriger lagen.

Es ist allgemein akzeptiert, daß die im Frühjahr über der Antarktis beobachteten starken Ozonverluste auf

heterogene chemische Prozesse zurückzuführen sind, die sich an den Oberflächen der „Polar Stratospheric Clouds (PSC's)“ abspielen. Dabei werden Stickstoffoxide (vor allem NO<sub>2</sub>) gebunden und reaktive Chlorverbindungen freigesetzt. Durch Letztere wird bei der Wiederkehr des Sonnenlichts im Frühjahr das Ozon in der antarktischen Stratosphäre katalytisch zerstört. Voraussetzung für die Bildung von PSCs sind Temperaturen von oder unterhalb von –80 °C, die allerdings in der Stratosphäre über Europa nicht beobachtet worden sind. Der verstärkte Ozonabbau über Europa im Winter 1991/92 ist deshalb ein Hinweis darauf, daß noch weitere Ozon-Abbauprozesse in der Stratosphäre existieren müssen. Eine Möglichkeit sind heterogene chemische Reaktionen an den Oberflächen der Schwefelsäure-Aerosolteilchen, die in der „Junge-Schicht“ global verteilt sind und deshalb auch weltweit wirksam werden können (4) (5).

Durch Laboruntersuchungen konnte nachgewiesen werden, daß heterogene chemische Reaktionen an Schwefelsäuretröpfchen, speziell die Reaktion N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (gas) + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O(liq) → 2 HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(liq) zu einer Entfernung von NO<sub>x</sub> aus der Gasphase (Denoxifizierung der Stratosphäre) und damit zu einer Erhöhung der Konzentrationen von reaktiven Chlorverbindungen führen. Diese Laborresultate wurden durch Beobachtungen stark erhöhter ClO-Konzentrationen in der winterlichen Stratosphäre über Europa außerhalb der „Pinatubo-Wolke“, die auf der Basis der bisher angenommenen reinen Gasphasen-Chemie nicht erklärt werden können, bestätigt. Es ist daher davon auszugehen, daß die durch die Eruption des Pinatubo verursachte Erhöhung der Anzahl der Schwefelsäure-Partikel den Ozonabbau in der Stratosphäre und damit den bisher beobachteten Trend weiter verstärken wird. Diese Annahme ist konsistent mit der in diesem Winter beobachteten 10%igen Abnahme der stratosphärischen Ozonkonzentrationen über den Tropen (10° S bis 20° N), wo signifikante Änderungen der Ozon-Gesamtmenge bisher nicht aufgetreten waren (s. o.). Aufgrund der Denoxifizierung und gleichzeitigen Chlor-Aktivierung wird sich auch der über den hohen Breiten der Nordhemisphäre beobachtete Trend mit Minimalwerten der Ozon-Gesamtmenge im Winter/Frühjahr weiter verstärken. Der Effekt der Pinatubo-Eruption wird aber wegen der Sedimentation der Aerosolpartikel nach wenigen Jahren wieder abklingen.

### 3.1.2 Auswirkungen

Die Bedeutung des stratosphärischen Ozonabbaus kann nicht hoch genug eingeschätzt werden. Während in Kap. 2.2.1.3 die Wirkungen auf den Strahlungshaushalt der Erde ausführlich behandelt wurden, werden im folgenden die Auswirkungen des stratosphärischen Ozonabbaus auf die Dynamik der Stratosphäre und auf die UV-B-Strahlung an der Erdoberfläche erläutert.

Bei dem Prozeß der Ozonbildung wird kurzweilige solare Strahlung in Wärme umgesetzt. Auf diese Weise und aufgrund seiner vertikalen Verteilung bestimmt das Ozon die vertikale Temperaturstruktur und damit die Dynamik der Stratosphäre. Die Tempe-

ratur steigt von einem Minimum von ca.  $-50$  bis  $-80$  °C in der Tropopause (Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre) mit zunehmender Höhe an und erreicht in 50 km Höhe maximale Werte von ca.  $0$  °C. Die damit verbundene stabile Schichtung läßt nur einen relativ geringen vertikalen Transport von Luftmassen in der Stratosphäre zu. Die Abnahme des stratosphärischen Ozongehalts ist somit gleichbedeutend mit einer Abnahme der Stabilität, d. h. mit einer Zunahme des vertikalen Luftmassenaustauschs in der Stratosphäre (7).

Bedrohlicher ist aber ein anderer Effekt des abnehmenden stratosphärischen Ozons: In Höhen von 20 bis 30 km erreicht die stratosphärische Ozonschicht ihre größte „Dicke“. Sie bildet einen sehr effektiven Schutzschild gegen die ultraviolette Strahlung der Sonne, indem sie nahezu die gesamte Einstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 230 und 320 nm (Nanometer) absorbiert. Der extrem kurzwellige Anteil der UV-Strahlung ( $<290$  nm) ist tödlich für niedrige Organismen und für die Oberflächenzellen höherer Organismen. Die sog. UV-B-Strahlung (Wellenlängenbereich 290–320 nm) führt bei ausreichend langer Exposition zu schwerwiegenden Schädigungen bei Mensch, Tier und Pflanzen. Beim Menschen führt die Zunahme der Intensität der UV-B-Strahlung an der Erdoberfläche zu einer Zunahme der Erkrankungen an Hautkrebs und grauem Star sowie zu einer Zunahme der Immunschwäche. In Staaten wie Argentinien, Chile, Australien und Neuseeland, die von dem heterogenen Ozon-Abbau über der Antarktis unmittelbar betroffen sind, sind die Effekte einer zunehmend intensiveren UV-B-Bestrahlung bereits seit einigen Jahren deutlich erkennbar.

Der zunehmende Abbau des stratosphärischen Schutzschildes kann auch das an der Meeresoberfläche lebende Phytoplankton schädigen. Da das Phytoplankton ein wichtiges Glied in der marinen Nahrungskette darstellt, ist auch mit erheblichen Auswirkungen auf die höher entwickelten Meeresbewohner zu rechnen.

Der durch die Abnahme des stratosphärischen Ozons bedingte Anstieg der UV-B-Strahlungsintensität ist durch Messungen an der Hochgebirgsstation Jungfrauajoch in der Schweiz ( $47$  °N,  $3576$  m ü.N.N.) nachgewiesen worden, wo die Intensität dieser Strahlung innerhalb des Zeitabschnitts von 1981 bis 1989 linear mit ca.  $1$  % pro Jahr zugenommen hat (7).

Die tatsächlich an der Erdoberfläche auf Meereshöhe ankommende UV-B-Strahlung kann mit Hilfe von Modellen unter Berücksichtigung der vertikalen Verteilung der Spurengase  $O_3$ ,  $SO_2$  und  $NO_2$  sowie der Aerosolteilchen in der unteren Troposphäre und der mittleren Bewölkungsverhältnisse abgeschätzt werden (8). Danach hat die Intensität der UV-B-Strahlung in den mittleren Breiten beider Hemisphären in dem Zeitabschnitt von 1979 bis 1989 um 4 bis 12 % zugenommen. Für die Antarktis ergibt sich sogar eine mittlere Zunahme um 50 %. Für die Monate September und Oktober (der Zeit der geringsten vertikalen Ozonsäulendichten) werden Zunahmen um 140 % errechnet. Für einige in den mittleren Breiten gelegene industrielle Ballungsgebiete mit hohen Luftschadstoffbelastungen ergaben sich entgegen dem

allgemeinen Trend geringfügige Abnahmen der UV-B-Intensität in Bodennähe. Diese Abnahmen sind auf vermehrte Streuprozesse an Aerosolteilchen und relativ hohe Ozon-Mischungsverhältnisse in den Luftmassen direkt über den Ballungsgebieten zurückzuführen. Hier ist anzumerken, daß das Ozon in höherer Konzentration toxisch wirkt und deshalb die weitere Zunahme der Konzentrationen des Ozons in der Troposphäre (auch wegen seiner Klimawirksamkeit) unter allen Umständen verhindert werden muß.

Die heute während sommerlicher „Photo-Smog-Perioden“ auftretenden Ozonkonzentrationen führen beim Menschen zu Reizungen der Augen und der Atemwege und bewirken eine merkliche Reduzierung des Atemvolumens. Noch empfindlicher als der Mensch reagieren Pflanzen auf ansteigende  $O_3$ -Mischungsverhältnisse. In den Niederlanden werden die gegenwärtig durch Photooxidantien-Einwirkung bedingten Ertragsminderungen in der Landwirtschaft auf immerhin 3–5 % geschätzt (9).

### 3.2 Globale Klimaänderung

Klimamodelle erlauben Prognosen über den Verlauf und Umfang der weltweiten Klimaänderung sowie über ihre regionalen Ausprägungen. Solche Prognosen sind jedoch, je nach den Eigenschaften des verwandten Modells, seiner „Maschenweite“ und den Annahmen bezüglich der zeitlichen Entwicklung der Emissionen klimarelevanter Stoffe in die Atmosphäre, mit mehr oder weniger großen Unsicherheiten behaftet. Die besten zur Zeit im Gebrauch befindlichen Klimamodelle sind die globalen, gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodelle (10). Es gibt derzeit vier verschiedene gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle, mit denen Klimasimulationen über eine Zeitspanne von bis zu 100 Jahren durchgeführt worden sind (GFDL, Princeton, USA; NCAR, Boulder, USA; Hadley Centre, England; MPI für Meteorologie, Hamburg, Bundesrepublik Deutschland). Die Simulationen mit Hilfe dieser Modelle führten zu ähnlichen Resultaten. Das ist bemerkenswert, da die vier Modelle sich hinsichtlich ihrer Formulierung, Parametrisierung und Versuchsdurchführung unterscheiden (11). Im folgenden werden die Ergebnisse der Simulationsläufe kurz skizziert.

Alle vier Modelle gehen von einem mehr oder weniger stetigen Anstieg des atmosphärischen  $CO_2$  aus, der von Modell zu Modell unterschiedlich ist, jedoch im Mittel etwa  $1$  % pro Jahr über die gesamte Zeitspanne der Simulationen beträgt. Das Hamburger Modell ist für zwei der fünf IPCC-Emissionsszenarien gerechnet worden (A und D). Die Abbildung 3.3 gibt den zeitlichen Verlauf dieser fünf Szenarien für  $CO_2$  sowie für die Summe aller Treibhausgase wieder (10). Das Szenario A („business as usual“) nimmt an, daß keine Maßnahmen zur Begrenzung der Emissionen von Treibhausgasen ergriffen werden. Die folgenden Szenarien (B,C,D,E) enthalten Annahmen über (von B bis E zunehmend) einschneidende Reduktionsmaßnahmen.

Mit dieser Annahme prognostizieren die Modelle für die global und jahreszeitlich gemittelte Lufttemperatur in Bodennähe einen mittleren Anstieg von ca.

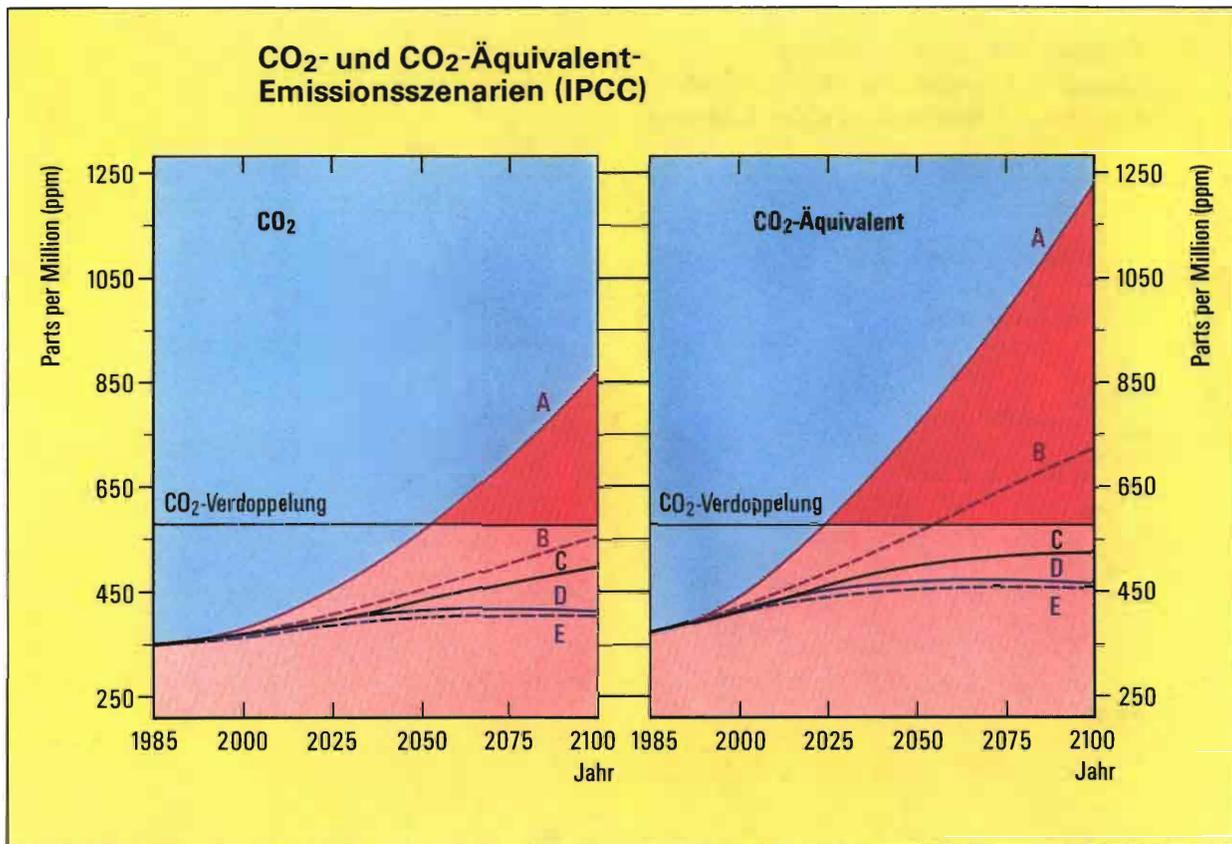


Abb. 3.3: CO<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionsszenarien des IPCC von A („business as usual“) bis zu D und E („draconic reductions“) (entnommen IPCC W6 I)

0,3 °C pro Jahrzehnt in den nächsten 100 Jahren. Während der ersten Jahrzehnte der Simulationszeitspanne, die 1985 beginnt, sagen die Modelle einen relativ langsamen Temperaturanstieg voraus (Abb. 3.4). Dieses Ergebnis kann z. T. auf die spezielle Simulationsbedingung, die die atmosphärischen Veränderungen in den Jahren vor 1985 bei der Berechnung der Erwärmungsraten nicht berücksichtigt (Kaltstart), zurückzuführen sein. Dieser Kaltstart bewirkt u. a. auch eine unrealistische Verzögerung des durch die thermische Ausdehnung des Oberflächenwassers verursachten Anstiegs des Meeresspiegels. Nach der Kaltstartphase kommen die Modelle auf einen mittleren Meeresspiegelanstieg von 2–4 cm pro Jahrzehnt.

Das Potential der Klimaänderung in Abhängigkeit von der zukünftigen Entwicklung der Emission von Treibhausgasen wird wesentlich deutlicher in der regionalen Verteilung der bodennahen Lufttemperatur zum Ende des Simulationszeitraums (Jahr 2085). Die Abb. 3.5 zeigt die Ergebnisse des Hamburger Klimamodells (MPI) für die beiden IPCC Emissionsszenarien A („business as usual“) und D (sehr drastische Reduktion der Emission von Treibhausgasen).

Wegen der in allen vier Modellen verwendeten Horizontalauflösung von 500 bis 1 000 km sind jedoch

regionale Voraussagen noch ziemlich unsicher. Die Simulationsergebnisse stimmen aber bei folgenden Voraussagen recht gut überein:

- Der Anstieg der oberflächennahen Lufttemperaturen ist über den Landflächen größer als über dem Meer. Das führt wegen der unterschiedlichen hemisphärischen Verteilung der Kontinente auch zu einer unterschiedlichen Erwärmung beider Hemisphären. In der Stratosphäre sinken die Temperaturen dagegen allgemein ab.
- In den Meeresgebieten der südlichen hohen Breiten und im Nordatlantik wird die Erwärmung am geringsten ausfallen. Für diese Gebiete wird eine, verglichen mit den Ergebnissen von Gleichgewichtsrechnungen mit einer (schlagartigen) Verdopplung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Pegels, um mindestens 60 % geringere Erwärmung der oberflächennahen Luftschicht prognostiziert.
- Zunächst werden sich die tropischen Breiten stärker erwärmen als die höheren Breiten. Dann holen aber die höheren Breiten bei fortschreitender Erwärmung auf. Bei Erreichen des Zeitpunkts der Verdopplung des vorindustriellen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Pegels wird die stärkste Erwärmung in den hohen Breiten der Nordhemisphäre zu beobachten sein.

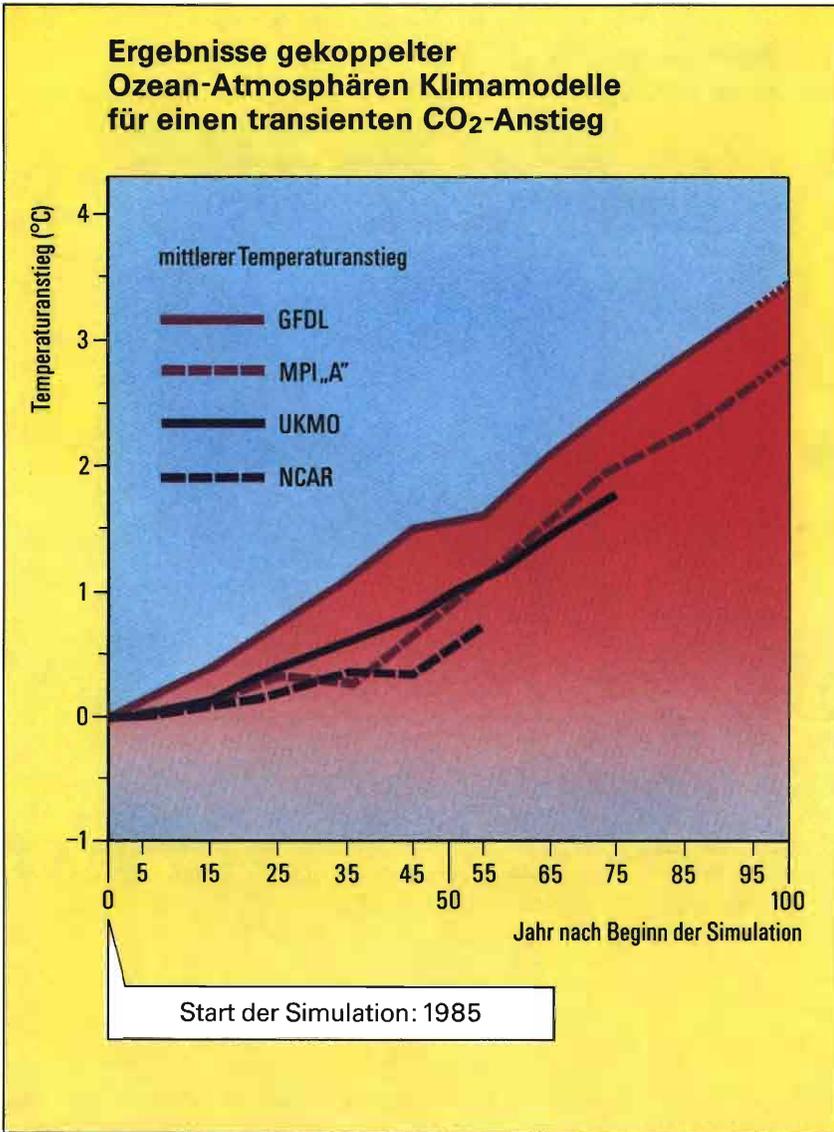


Abb. 3.4: Ergebnisse gekoppelter Ozean-Atmosphären Klimamodelle für einen transienten CO<sub>2</sub>-Anstieg über einen Zeitraum von maximal 100 Jahren (siehe Text).

Start der Simulation: 1985

(a) mittlerer Temperaturanstieg (°C)

Die Zeichnungen des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI) sind für die IPCC Szenarien A und D durchgeführt worden (entnommen Cubasch, 1992)

- Durch die globale Erwärmung und die daraus resultierende stärkere Verdunstung von Oberflächenwasser entsteht eine Tendenz zu allgemein zunehmenden Niederschlägen. Das gilt vornehmlich für die höheren Breiten beider Hemisphären, in der Nordhemisphäre im Winter auch für die mittleren Breiten.
- Im Sommer nehmen die Niederschläge über den Landgebieten jedoch im allgemeinen ab, was eine merkliche Verringerung der Bodenfeuchtigkeit und

nachteilige Auswirkungen für das Pflanzenwachstum zur Folge haben wird.

Die Simulationsläufe mit dem Hamburger Klimamodell ergaben ferner, daß bei Erreichen des Zeitpunkts der Verdopplung des äquivalenten CO<sub>2</sub>-Gehaltes die Eisbedeckung in der Arktis stark zurückgegangen sein wird. Bei einer einfachen Extrapolation der bereits zu beobachtenden Entwicklungen (Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfes und stärkere Erwärmung der tropischen Breiten, Verstärkung der

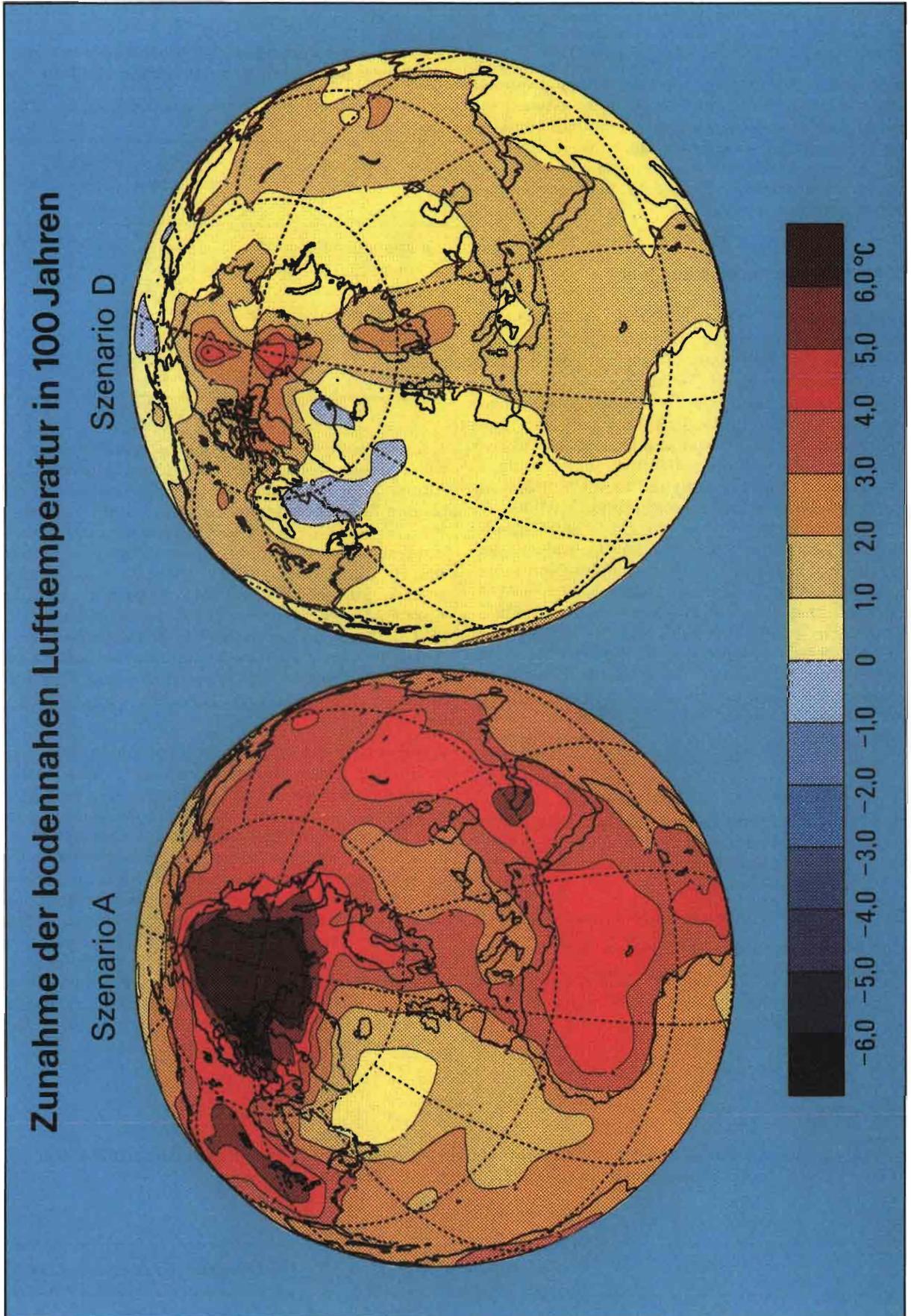


Abb. 3.5: Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur (bis 2085) für die IPCC Emissionsszenarien A und O  
 Quelle: MPI u. DRRZ, Hamburg

allgemeinen Zirkulation und damit auch Verstärkung des atmosphärischen Wärmetransports polwärts) kommt man zu ähnlichen Ergebnissen (12).

Auch wenn die atmosphärischen Konzentrationen klimarelevanter Stoffe auf dem heutigen Niveau stabilisiert werden könnten, würde die bodennahe Lufttemperatur wegen des durch die hohe Wärmespeicherkapazität der Ozeane bewirkten Nachlaufs weiter ansteigen und erst nach 20 bis 30 Jahren einen neuen Gleichgewichtswert erreichen.

### 3.3 Anstieg des Meeresspiegels

Der Meeresspiegel ist je nach Luftdruck-, Wind- und Gezeitenverhältnissen kurzfristigen und regionalen Schwankungen unterworfen. Durch Mittlung der zeitlich differierenden Pegel läßt sich der mittlere Meeresspiegel berechnen. Dieser ist langfristig nicht konstant, sondern zeigt im Verlauf der jüngeren Erdgeschichte erhebliche Schwankungen. So ist er zwischen dem Klimaxstadium der letzten Vereisungsphase (vor ca. 18 000 Jahren) und dem Übergang zur anschließenden Warmzeit innerhalb von 10 000 Jahren um etwa 120 m angestiegen. Diese beträchtliche Erhöhung ist auf das Abschmelzen der großen Gletscher und der Inlandeisflächen auf der Nordhemisphäre bei einem Temperaturanstieg von 3 bis 4 °C zurückzuführen. Da heute auf der nördlichen Halbkugel nur noch geringe Teile der Landoberfläche vereist sind, wird der Meeresspiegel in Zukunft weit weniger sensibel auf die Erhöhung der globalen Temperatur reagieren. Wie stark der zu erwartende Anstieg sein wird, läßt sich anhand der seit etwa 100 Jahren beobachteten Entwicklung des Meeresspiegels abschätzen. In dieser Zeitspanne, in der die globale Temperatur um ca. 0,6 °C zugenommen hat, ist der Meeresspiegel jährlich um etwa 1 bis 2 mm angestiegen. Auf der Grundlage zahlreicher empirischer Untersuchungen lassen sich die folgenden Parameter als entscheidende Einflußgrößen für die Veränderung des Meeresspiegels ansehen:

- Die Wärmeausdehnung des Meereswassers
- Das Abschmelzen der Gebirgsgletscher
- Das Abschmelzen kleinerer Inlandvereisungen. (z. B. in Grönland) und die Zunahme des antarktischen Festlandeises

Tabelle 3.2

#### Anteile der verschiedenen Einflußfaktoren am vorhergesagten Meeresspiegelanstieg 1985–2030 entsprechend dem IPCC-Szenario „Business as Usual“

(Oerlemans, 1990)

	Wärmeausdehnung	Gebirgsgletscher	Grönland	Antarktis	Gesamt
Hoch . . . . .	14.9	10.3	3.7	0.0	28.9
Wahrscheinlichster Wert . . . . .	10.1	7.0	1.8	-0.6	18.3
Niedrig . . . . .	6.8	2.3	0.5	-0.8	8.7

Tabelle 3.1

#### Anteile der verschiedenen Einflußfaktoren am Meeresspiegelanstieg der letzten 100 Jahre

(in cm) (Oerlemans, 1990)

	Niedrig	Wahrscheinlichster Wert	Hoch
Wärmeausdehnung . . . . .	2	4	6
Gletscher / Kl. Inlandmessungen . . . . .	1.5	4	7
Grönländische Eisschicht . . . . .	1	2.5	4
Antarktische Eisschicht . . . . .	-5	0	5
Gesamt . . . . .	-0.5	10.5	22

Keinen Einfluß hat dagegen das Abschmelzen des Meereseises. Auch die sehr langsam ablaufende Verformung der Erdkruste wirkt sich in dem zu betrachtenden Zeitintervall von etwa 100 Jahren nicht spürbar auf den Meeresspiegel aus. Im wesentlichen ist der festgestellte Meeresspiegelanstieg der vergangenen 100 Jahre auf die beiden erstgenannten Faktoren zurückzuführen, während der Rückgang des grönländischen Eises relativ wenig dazu beigetragen hat (s. Tab. 3.1). Die Vereisung der antarktischen Landmasse hat im Zuge des Temperaturanstiegs wahrscheinlich zugenommen und weist somit eher eine negative Rückkopplung auf den Meeresspiegelanstieg auf (13).

Auf der Grundlage der gewonnenen Daten, die einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur und dem Meeresspiegel zeigen, lassen sich im Zusammenhang mit den Aussagen der Klimamodelle Abschätzungen der zukünftigen Meeresspiegelentwicklung herleiten. Dabei konnte zunächst nur versucht werden, die Auswirkungen der durch die nichtgekoppelten Klimamodelle vorhergesagten Temperaturentwicklung auf die Eismassen und die Ausdehnung der Meere grob abzuschätzen. Auf der Basis des IPCC-Szenarios A (Verdopplung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes bis 2050) wurde bis zum Jahr 2050 ein Anstieg von etwa 30 bis 50 cm, bis zum Jahr 2100 von etwa 70 bis 100 cm ermittelt. Den

jeweiligen Einfluß der eingangs genannten Faktoren gibt die Tabelle 3.2 wieder. Aus der Berechnung ausgeklammert wurde das in manchen Prognosen vorhergesagte Auseinanderbrechen des unter der Meeresoberfläche verankerten westantarktischen Eisschildes. Für die kommenden 100 Jahre gibt es keine Anzeichen dafür, daß eine derartige Entwicklung eintreten kann. Es ist jedoch zu bedenken, daß hier ein großes Gefahrenpotential für spätere Jahrhunderte liegen kann. Ein Abschmelzen des westantarktischen Eisschildes könnte den Meeresspiegel in 200 Jahren um bis zu 40 cm, in 300 Jahren um weitere 30 cm ansteigen lassen (14). Während der Eem-Warmzeit vor 125 000 Jahren führte das Abschmelzen des westantarktischen Schelfeises zu einem Meeresspiegelanstieg von etwa 6 m. Damals lag die globale Mitteltemperatur um 2 °C über dem vorindustriellen Wert.

Neuere Berechnungen auf der Basis gekoppelter Ozean-Atmosphären-Modelle sagen für die kommenden 100 Jahre einen Anstieg von 6 bis 25 cm voraus. Auffällig ist zudem das Anwachsen der jährlichen Anstiegsraten im Verlaufe des kommenden Jahrhunderts. Hierbei ist allerdings nur die Wärmeausdehnung des Meereswassers berücksichtigt, so daß die Vorhersagen des IPCC im wesentlichen bestätigt werden. Bei beiden Szenarien ist ferner zu beachten, daß im untersuchten Zeitraum kein Gleichgewichtszustand zwischen Temperaturerhöhung und Meeresspiegelanstieg erreicht wird, sondern eine Fortsetzung des ansteigenden Trends auch nach dem Jahr 2100 zu erwarten ist. Eine genauere Berechnung wäre jedoch aufgrund der unsicheren Datenlage wissenschaftlich nicht haltbar.

Ein Anstieg des Meeresspiegels um etwa 50 cm stellt eine ernsthafte Bedrohung für Millionen von Menschen dar und wird erhebliche ökologische und sozioökonomische Folgewirkungen hervorrufen, so z. B.:

- Überflutung küstennaher Feuchtgebiete und Tiefen
- Erosion der Küstenlinie
- Verstärkung von Sturmfluten
- Versalzung von Ästuar- und Deltamündungen, Grundwasservorkommen und weitere negative Beeinträchtigungen der Wasserqualität
- Veränderung des Gezeitenpegels
- Veränderung der Sedimentationsverhältnisse
- Abnahme leicht zugänglicher Grundwassersohlen

Bereits eine Erhöhung des Meeresspiegels um einige Dezimeter wird weite, oftmals dicht besiedelte Küstenebenen überfluten. Als besonders gefährdet sind z. B. die Mündungsbereiche der Flüsse Nil, Ganges, Jangtze, Mekong, Irrawaddy, Indus, Niger, Parana, Amazonas, Mississippi und Po sowie verschiedene pazifische Inselstaaten wie Kiribati, Takelau, Tuvalu, die Malediven u. a. anzusehen. Letztere verfügen über weite Flächen, die nur wenige Meter über den heutigen Meeresspiegel ragen und drohen, durch die prognostizierten Veränderungen unbewohnbar zu werden. Doch werden auch die USA (geschätzter Verlust bei Meeresspiegelanstieg von 1 m etwa

20 000 km<sup>2</sup> Land) und Europa von einem Anstieg des Meeresspiegels direkt betroffen sein (s. Abb. 3.4). Insgesamt wird davon ausgegangen, daß weltweit ca. 350 000 km Küstenlinie, ca. 6 400 km städtische Küstenlinie, 10 700 km touristisch genutzte Sandstrände und 1 800 km<sup>2</sup> Hafenfleichen vor dem drohenden Meeresspiegelanstieg geschützt werden müssen. Dabei sind nur die Küstenabschnitte erfaßt, die eine Einwohnerdichte von über 10 Einwohner/km<sup>2</sup> aufweisen. Die entstehenden Kosten werden für viele Länder kaum aufzubringen sein. Erste Schätzungen ergeben z. B. für die pazifischen Inselstaaten nur für Schutzmaßnahmen jährliche Ausgaben in Höhe von 5 bis 34 % des Bruttosozialprodukts. Aber auch in einigen afrikanischen (Gambia, Liberia, Mosambik u. a.) und lateinamerikanischen Ländern (Guyana, Surinam, Belize u. a.) werden entsprechende Schwierigkeiten auftreten.

Neben der permanenten Überflutung bewirkt die Erhöhung des Meeresspiegels die Häufung und Verstärkung von großflächigen Überschwemmungskatastrophen. Dabei wirkt sich nicht nur der höhere Meeresspiegel sondern auch die Zerstörung natürlicher Barrieren wie Korallenriffs, vorgelagerte Sandbänke, Lagunen u. ä. und die verringerte Drainage des Binnenlandes durch die Flüsse und Kanäle aus. Es werden also auch die Flüsse häufiger über die Ufer treten und beispielsweise in Bangladesch, China, dem Südosten der USA oder Indien großflächige Überschwemmungen hervorrufen, die durch Änderungen im Feuchteregime (z. B. Verschiebung des Monsuns oder der Schneeschmelze) noch verstärkt werden können. Sie werden nicht nur den Menschen existenziell bedrohen, sondern auch die landwirtschaftliche Produktion auf den ertragreichen Schwemmlandböden stark beeinträchtigen. So würde z. B. Bangladesch etwa 20 %, Ägypten 15 % der Ackerflächen verlieren. Auch andere Entwicklungsländer wie Thailand, China, Gambia, Senegal, Nigeria und Mosambik wären in ähnlichem Maße gefährdet.

In einigen Regionen wird eine Häufung von Überschwemmungen und die damit verbundenen erosiven Prozesse an der Küstenlinie die touristisch wichtigen Sandstrände bedrohen. In vielen Ländern muß daher mit erheblichen Rückwirkungen auf den Tourismus gerechnet werden (Mittelmeerländer, Brasilien, Portugal, USA u. a.).

Erhebliche sozioökonomische Auswirkungen sind auch durch das Eindringen von Salzwasser in die Flußmündungen und die küstennahen Grundwasserkörper zu erwarten. Insbesondere während ausgedehnter Trockenzeiten werden die oftmals dicht besiedelten Mündungsbereiche betroffen sein. Eine Untersuchung ergab, daß bei einem Anstieg des Meeresspiegels um ca. 50 cm Salzwasser etwa 10 bis 20 km weit in die Mündung des Delaware-Flusses (USA) eindringen und erhebliche Konsequenzen für die Wasserversorgung der Millionenstadt Philadelphia verursachen würde. Ähnliche Folgen hätte das Einsickern von Salz- und Brackwasser in die grundwasserführenden Schichten oder oberflächennahen Süßwasserlinsen. So droht einigen pazifischen Atollen durch den Meeresspiegelanstieg ein Verlust von ca. 50 % ihres Süßwasserreservoirs.

## Gefährdung der europäischen Küstenzonen durch einen Meeresspiegelanstieg und das Eindringen von Salzwasser in die Flußmündungen und Grundwasserkörper<sup>1)</sup>

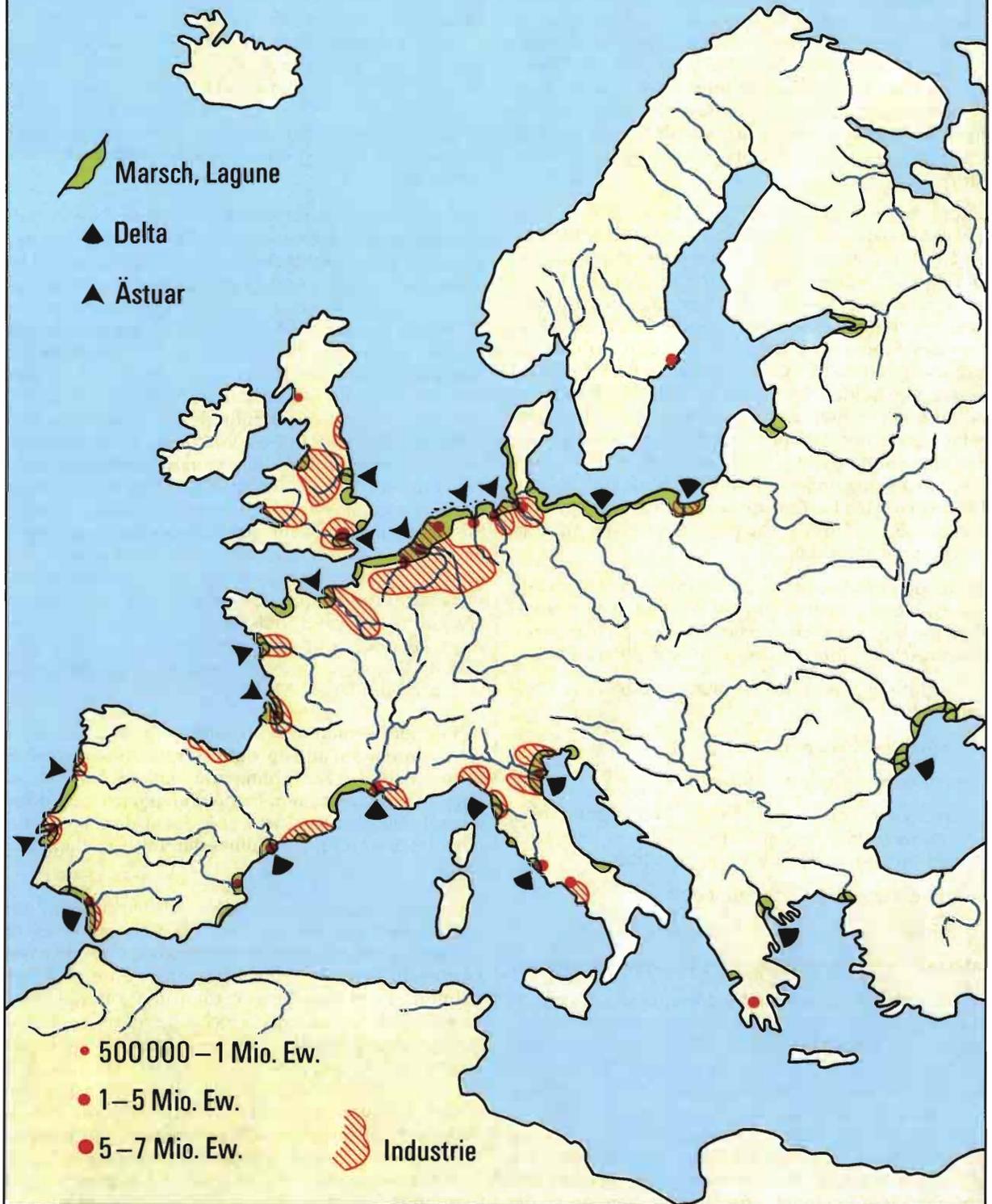


Abb. 3.6: Gefährdung der europäischen Küstenzonen durch einen Meeresspiegelanstieg und das Eindringen von Salzwasser in die Flußmündungen und Grundwasserkörper<sup>1)</sup>

Quelle: European Workshop on Interrelated Biochemiate and Land Use Change

Eine noch nicht abschätzbare Gefährdung der Grund- und Oberflächengewässer geht auch von Deponien im zukünftigen Überschwemmungsbereich und Schadstoffakkumulationen in den Sedimenten der Deltas und Ästuare stark verschmutzter Flüssen aus. Durch die Veränderung der Sedimentationsbedingungen und das Eindringen von Salzwasser können giftige Stoffe mobilisiert werden. Die Folgen können zum heutigen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden. Das Gefahrenpotential dieser „chemischen Zeitbombe“ ist jedoch angesichts der zum Teil hochtoxischen Kontaminationen erheblich (15).

Vom Meeresspiegelanstieg gehen Gefahren für eine Vielzahl z. T. einmaliger Ökosysteme aus. Besonders bedroht werden die Feuchtgebiete sein, die

- die Kinderstube für ein Drittel der vom Menschen genutzten Fischarten,
- einen einzigartigen Lebensraum für eine Vielzahl von Tier- und Pflanzenarten (z. B. Watt, Mangrove) und
- natürliche Schutzwälle vor Überschwemmungen darstellen.

Zwar ist eine landeinwärts gerichtete Verlagerung der Feuchtgebiete möglich. Die maximale Wanderungsgeschwindigkeit für nicht durch Barrieren behinderte Feuchtgebiete könnte aber nur einen Meeresspiegelanstieg von jährlich bis zu 1 cm ausgleichen. Dieser wäre Ende des nächsten Jahrhunderts erreicht. Inwieweit sich die polwärtige Wanderung dieser Ökosysteme auswirken wird, ist offen. In der Regel wird es jedoch für die Ökosysteme in den küstennahen Feuchtgebieten nicht möglich sein, mit dem Vordringen des Meeres Schritt zu halten. So wird für die USA geschätzt, daß bis zu zwei Drittel der Feuchtgebiete verloren gingen, wenn der Meeresspiegel um etwa 1 m steigt und alle dicht besiedelten Küstenabschnitte mit Schutzbauwerken versehen werden müßten (13). Ähnlich stark betroffen werden Gebiete mit niedrigem Tidenhub sein (z. B. Schwarzmeer- und Mittelmeerküste, Golf von Mexiko). In den Ländern Mexiko, Brasilien, Argentinien, Kuba, Indonesien, Papua-Neuguinea, Vietnam und Malaysia befinden sich über die Hälfte der etwa 750 000 km<sup>2</sup>, die weltweit von Feuchtgebieten sowie der 165 000 km<sup>3</sup>, die von Mangroven eingenommen werden. Etwa 88 % dieser Flächen sind von mehr als 10 Einwohnern pro km<sup>2</sup> besiedelt und müssen geschützt werden. Die Vernichtung dieser ökologisch wichtigen Gebiete kann bereits als „vorprogrammiert“ angesehen werden. Allein 5 bis 10 % der Feuchtflächenverluste würden direkt durch den Bau der Schutzanlagen hervorgerufen.

Die globale Artenvielfalt wird durch die Vernichtung der Feuchtgebiete, Dünenflächen und das Ausbleichen von Korallenriffen reduziert werden. Die Folgen sind bereits heute spürbar (16). Zudem sind drastische Rückwirkungen auf die Fischereiwirtschaft zu befürchten (s. 3.4.2 Marine Ökosysteme).

### 3.4 Auswirkungen auf die natürlichen Ökosysteme

Die Biosphäre spielt im Wasser-, Nährstoff- und Kohlenstoffkreislauf eine entscheidende Rolle und steht in einem komplexen Austauschverhältnis mit den Böden und der Atmosphäre. Die zu erwartenden Veränderungen des Klimas und der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre werden sich daher deutlich in der räumlichen Verteilung und Zusammensetzung der natürlichen Lebensgemeinschaften niederschlagen. Dabei lassen die Aussagen der Klimamodelle befürchten, daß zahlreiche Ökosysteme nicht in der Lage sein werden, sich den rasch verändernden Bedingungen anzupassen. Dies wird sowohl ökologische als auch drastische sozioökonomische Folgen haben.

#### 3.4.1 Terrestrische Ökosysteme

Etwa ein Drittel der Landoberfläche wird von nicht bzw. nur extensiv durch den Menschen genutzten Ökosystemen eingenommen. Hierunter sind die Naturwälder sowie zahlreiche, äußerst unterschiedliche Landschaftsformen zu verstehen, z. B. montane Ökosysteme, Savannen, Wüsten etc. (17). Durch die fortschreitende Zunahme des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre und die Verschiebung der Klimazonen wird das über lange Zeiträume entstandene Gleichgewicht zwischen den natürlichen Lebensgemeinschaften und den Standortbedingungen beeinflusst. Welche Konsequenzen dies im einzelnen nach sich ziehen wird, kann zum heutigen Zeitpunkt kaum abgeschätzt werden, da:

- Ökosysteme über ein Puffervermögen verfügen, das sie zwar befähigt, Witterungsextreme zu überstehen, das aber bei Andauer oder rascher Folge extremer Ereignisse erschöpft wird und zusammenbricht,
- die natürlichen Lebensgemeinschaften durch ein komplexes Netz von Wechselwirkungen zwischen den Lebewesen untereinander sowie den Lebewesen und den physikalischen und chemischen Umweltfaktoren aufrechterhalten werden,
- synergistische Modelle und Versuche, welche das Zusammenwirken von CO<sub>2</sub>-Zunahme und Klimaveränderung mit anderen sich verändernden Umweltparametern (z. B. erhöhte UV-B-Strahlung, bodennahe Ozonkonzentration etc.) untersuchen, weitgehend fehlen.

Dessen ungeachtet zeichnen sich die im folgenden betrachteten zwei Faktoren für die zukünftige Entwicklung der terrestrischen Ökosysteme als entscheidend ab.

##### 3.4.1.1 Nettoprimärproduktion und Speicherung von Kohlenstoff in der Biosphäre

Von den Pflanzen an Land werden jährlich etwa 60 GtC in der neugebildeten Biomasse gespeichert. Im gleichen Zeitraum fallen etwa 40 bis 50 GtC in der abgestorbenen Biomasse an. Die global im biotischen

Tabelle 3.3

**Jährliche und kumulierte Kohlenstoffströme in die terrestrische Biomasse und die Ozeane – Globale Entwicklung im Zeitraum 1860–1980 anhand der Ergebnisse des „Osnabrücker Biosphären Modells“<sup>1)</sup>**

(Esser, 1989)

Jahr	Kohlenstoffströme							
	Kumulierte Kohlenstoffströme (seit 1860)				Jährliche Kohlenstoffströme			
	Fossile Quellen	Ozeane	Rodungen	CO <sub>2</sub> -Düngeeffekt	Nettoprimärproduktion	Streu	organische Bodensubstanz	Biomasseverbrennung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1860	– 0	0	– 0	0	44	–33	–11	–0.0
1870	– 1	1	– 7	2	44	–33	–11	–0.3
1880	– 3	3	–15	5	44	–34	–11	–0.3
1890	– 6	4	–22	8	44	–33	–11	–0.1
1900	– 10	8	–30	12	44	–34	–11	–0.3
1910	– 17	12	–37	15	44	–34	–11	–0.2
1920	– 26	17	–44	19	44	–34	–11	–0.2
1930	– 36	23	–54	25	44	–34	–11	–0.2
1940	– 47	30	–63	31	45	–34	–11	–0.2
1950	– 61	37	–73	38	45	–34	–11	–0.3
1960	– 82	47	–81	47	45	–33	–11	–0.2
1970	–115	59	–89	58	45	–34	–11	–0.2
1980	–163	76	–96	73	46	–34	–11	–0.1

<sup>1)</sup> Das Modell berücksichtigt die im Berechnungszeitraum aufgetretenen klimatischen Veränderungen nicht

Abfall gespeicherte Kohlenstoffmenge beträgt etwa 60 GtC (7). Im Prinzip besteht also eine weitgehend ausgeglichene Kohlenstoffbilanz zwischen Atmosphäre und Biosphäre. Diese wird jedoch dadurch gestört, daß jährlich etwa 6 bis 7 GtC durch die Verbrennung fossiler Energieträger und etwa 1 bis 2 GtC durch die Rodung tropischer Wälder freigesetzt werden. Der größte Teil dieser zusätzlichen Kohlenstoffmenge verbleibt in der Atmosphäre (ca. 3,5 bis 4,0 GtC), der Verbleib der restlichen Kohlenstoffmenge ist dagegen umstritten. Während Tans et al. (1990) die jährlich durch die Ozeane aufgenommene Menge auf etwa 0,5 bis 1,0 GtC schätzen, geht IPCC von einer Speicherung von jährlich  $2,0 \pm 0,8$  GtC aus. Die in der terrestrischen Biomasse gespeicherte Kohlenstoffmenge wird auf jährlich 1,6 bis zu 4 GtC geschätzt (18).

Vergleicht man die Stoffflüsse zwischen Atmosphäre, Ozeanen und Biosphäre seit 1860 anhand der Ergebnisse des „Osnabrücker Biosphären Modells“, fällt auf, daß sich die jährliche Nettoprimärproduktion (NPP) der Biomasse leicht erhöht und der „CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt“ innerhalb von 120 Jahren eine zusätzlichen Speicherung von 73 GtC in der Biomasse bewirkt hat. (s. Tab. 3.3). Trotz der fortschreitenden Vernichtung von Tropenwäldern mit einer Freisetzung von jährlich 1 bis 2 GtC wird die terrestrische Biomasse deshalb insgesamt als Kohlenstoffsene angesehen, die auch in Zukunft einen Teil des CO<sub>2</sub>-Anteils in der Atmosphäre aufnimmt und somit die Klimaveränderungen abmildert. Dies gilt insbesondere für die gemäßigten Breiten der nördlichen Hemisphäre.

Tatsächlich wurde auch in zahlreichen Versuchen ein positiver Zusammenhang zwischen dem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre und der Nettoprimärproduktion verschiedener Pflanzen festgestellt. Bei einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 600 ppm wurden die Atmungsverluste um bis zu 50 % reduziert und eine Zunahme der gebildeten Biomasse um bis zu 30 % festgestellt. Zudem zeigte sich eine spürbare Effizienzsteigerung in der Wassernutzung der Pflanze. Die beobachteten Effekte waren jedoch keineswegs eindeutig, sondern abhängig von der Versorgung mit Wasser, Licht und Nährstoffen sowie vom jeweiligen chemischen Prozeß der Kohlenstoffbindung in den Pflanzen. Dabei sind die C3- von den C4-Pflanzen zu unterscheiden. Erstgenannte binden den Kohlenstoff zunächst an einen Zucker, der fünf C-Atome enthält. Die entstandene Verbindung mit 6 C-Atomen zerfällt in zwei Ketten mit je drei C-Atomen (C3). C4-Pflanzen binden dagegen CO<sub>2</sub> zunächst an eine C3-Verbindung. Der so entstandene C4-Körper ist Ausgangspunkt weiterer Umwandlungen.

Entsprechend wurde bei Versuchen in den Feuchtgebieten der amerikanischen Ostküste bei einer einjährigen C3-Pflanze (Binse) ein anhaltender Zuwachs der Nettoprimärproduktion bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 700 ppm ermittelt. Dagegen war dieser Effekt im gleichen Versuch bei einer C4-Pflanze kaum festzustellen, so daß sie bei der direkten Konkurrenz deutlich unterlegen war. Aufgrund der überdurchschnittlich guten Wasser- und Nährstoffversorgung im Versuchsgebiet sind die Ergebnisse jedoch nicht ohne weiteres auf andere Regionen übertragbar (13).

Ein deutlich geringerer Zuwachs der Nettoprimärproduktion war bei einem ähnlichen Versuch in der Tundra zu verzeichnen. Hier flachte die Steigerungskurve mit der Zeit deutlich ab. Die bei steigender Temperatur zunehmende Abbaugeschwindigkeit der abgestorbenen organischen Substanz könnte den CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt überkompensieren, so daß hier eine Netto-CO<sub>2</sub>-Quelle entstünde (13).

Wieder andere Reaktionsmuster wurden im mexikanischen Regenwald beobachtet, wo nur bei einigen C3-Baumarten bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration eine Zunahme der Nettoprimärproduktion, bei anderen C3-Bäumen jedoch ein gegenteiliger Effekt auftrat. Hier schien insbesondere der begrenzte Lichteinfall das Ergebnis maßgeblich zu beeinflussen (20).

Die Aussagekraft dieser Versuche sollte grundsätzlich vorsichtig bewertet werden, da in der Regel ausschließlich der Effekt einer höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration beobachtet wurde. Tatsächlich werden die Ökosysteme zahlreichen, sich überlagernden Veränderungen ausgesetzt sein, so z. B. Temperaturerhöhung, Veränderung des Niederschlagsregimes, erhöhte UV-B-Strahlung etc. Zudem wird mehr und mehr klar, daß ein Anstieg der Nettoprimärproduktion nur stattfindet, wenn gleichzeitig die Wasser-, Licht- und Nährstoffversorgung über die gesamte Vegetationsperiode hinweg gesichert ist. Dies ist nach den Vorhersagen der Klimamodelle jedoch nur in wenigen Regionen der Erde zu erwarten. Nach den bisherigen Abschätzungen kommen hierfür nur die nördlichen und Teile der mittleren Breiten in Frage (s. 3.6 Landwirtschaft). In den mediterranen Gebieten sowie den Tropen und Subtropen ist eher ein Überwiegen der negativen Beeinträchtigungen der Ökosysteme anzunehmen.

Die Wirksamkeit des CO<sub>2</sub>-Düngeeffektes wird ferner maßgeblich von der Entwicklung des Abbaus der organischen Substanz im Boden abhängen. Insgesamt ist in den Böden mit etwa 1 500 GtC wesentlich mehr Kohlenstoff gespeichert als in der lebenden Biomasse. In Abhängigkeit vom Wasserangebot, der chemischen Zusammensetzung der Streu sowie verschiedener bodenspezifischer Eigenschaften steigt die Abbaugeschwindigkeit bei steigender Temperatur an. Wie das Beispiel Tundra zeigt, kann die dadurch zusätzlich freigesetzte CO<sub>2</sub>-Menge den Biomassenzuwachs infolge der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre übersteigen. Es ist zu befürchten, daß sich auch global die in der lebenden und toten Biomasse gespeicherte Kohlenstoffmenge verringert. Dabei würden erhebliche Mengen Kohlenstoff zusätzlich zu den Emissionen durch die Verbrennung fossiler Energieträger an die Atmosphäre abgegeben, was zu einer dramatischen Forcierung des Treibhauseffektes führen könnte.

Neuere Untersuchungen weisen zudem darauf hin, daß sich eine höhere Nettoprimärproduktion auf die Nährstoffaufnahme auswirkt. So wurde zum Beispiel bei erhöhter Biomassebildung ein Rückgang des Stickstoffgehaltes in den Blättern festgestellt. Dies würde sich auf die pflanzenfressenden Insekten insofern auswirken, als sie mehr Blattmaterial aufnehmen müßten, um ihren Eiweißbedarf decken zu können (20).

Inwieweit ein CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt tatsächlich eintreten wird, erscheint fraglich. Aussagekräftige Ergebnisse könnten nur durch synergistische Versuche und Modelle erzielt werden. Dazu ist es jedoch notwendig, das Wissen über die Stoffflüsse innerhalb der Ökosysteme sowie zwischen den natürlichen Lebensgemeinschaften und der Atmosphäre zu erweitern. Zudem müßten präzise regionale Vorhersagen über die zu erwartenden klimatischen Veränderungen vorliegen, in denen auch die Jahressgänge von Temperatur und Niederschlag berücksichtigt werden.

#### 3.4.1.2 Verschiebung der Vegetationszonen und der Artenzusammensetzung

Aufschlüsse über die zu erwartenden Verschiebungen der Vegetationszonen als Folge globaler Klimaänderungen vermitteln die Ergebnisse der Auswertung paläoklimatischer Daten sowie das Wissen um die Verletzbarkeit von natürlichen Ökosystemen.

In der jüngeren Erdgeschichte ist es häufig zu Verschiebungen der Vegetationszonen als Folge von Klimaveränderungen gekommen. So wurde Europa während der letzten Kaltzeit vor 70 000 bis 10 000 Jahren weitgehend von Tundravegetation eingenommen. Bei ansteigenden Temperaturen erfolgte dann die Wiederbewaldung. Derartige Verschiebungen liefen ohne menschliche Eingriffe in die natürlichen Kreisläufe ab. Dennoch waren zahlreiche Pflanzenarten nicht in der Lage, sich den wechselnden Klimabedingungen anzupassen und sind ausgestorben. So geht die im Vergleich mit anderen Kontinenten geringe Baumartenzahl Europas auf den häufigen Wechsel von Warm- und Kaltzeiten zurück.

Diese natürlichen Verschiebungen sind jedoch nicht vergleichbar mit den anthropogen hervorgerufenen Veränderungen, die in Zukunft auftreten werden. Es scheint fragwürdig, ob die Ökosysteme schnell genug auf die vom Menschen verursachte CO<sub>2</sub>-Anreicherung in der Atmosphäre und die erwarteten Klimaveränderungen reagieren können. Bei einer erwarteten Erwärmungsrate von 2–5 °C ist für das kommende Jahrhundert mit den höchsten Temperaturen der letzten 200 000 Jahre zu rechnen. Die schnell vor sich gehenden klimatischen Veränderungen bedrohen eine Vielzahl der Pflanzenarten. Es wird angenommen, daß eine um 1 °C höhere Temperatur zu einer polwärtigen Verschiebung der Vegetationszonen von 200 bis 300 km führen wird. Als sicher gilt, daß die Samen von Bäumen maximal in einer Entfernung von 100 bis 200 m vom Stamm zu Boden gehen und die aus ihnen hervorgehenden Bäume erst Jahre oder Jahrzehnte später neue Samen bilden. Eine Ausbreitung des Verbreitungsgebietes einer Baumart über mehrere Hundert Kilometer innerhalb eines Jahrhunderts ist daher ausgeschlossen. Die Gefährdung natürlicher Ökosysteme wird zusätzlich dadurch erhöht, daß sie zum Teil infolge anthropogener Einwirkungen (Grundwasserabsenkung, Luftbelastung, Bodenversauerung, Überweidung, Veränderung des Lokalklimas etc.) bereits ökologischem Streß ausgesetzt sind. Eine besondere Bedrohung geht auch von der in Zukunft zu erwartenden Zunahme der Windgeschwindigkeiten aus. Eine Häufung und Verstärkung katastrophaler Sturmereignisse (Sturmtiefs und tropi-

sche Wirbelstürme) wird auch die natürlichen Ökosysteme stark schädigen.

Grundsätzlich werden die terrestrischen Ökosysteme einerseits durch die global ansteigende CO<sub>2</sub>-Konzentration und andererseits durch die damit verbundenen regionalen Klimaveränderungen gefährdet werden. Eine Abwägung von überwiegend positiven (CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt) und überwiegend negativen Wirkungen (durch Klimaveränderungen) erscheint im Falle der natürlichen Ökosysteme nicht angebracht, da jede kurzfristige Veränderung der Umweltparameter das über lange Zeiträume entstandene natürliche Gleichgewicht in einem Ökosystem stört. So würden durch den CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt lediglich bestimmte Pflanzen profitieren, die sich zu Lasten anderer Arten ausbreiten könnten. Eine derart veränderte Konkurrenzsituation innerhalb einer natürlichen Lebensgemeinschaft kann sich destabilisierend auf die betroffenen Ökosysteme auswirken.

Die Anpassung an die klimatischen Veränderungen werden sicher zu räumlichen Verlagerungen der Ökosysteme führen. Es gilt jedoch als sicher, daß sie nicht als Einheit wandern, sondern artenspezifische Reaktionsmuster zeigen werden. Einige Arten werden relativ profitieren und andere Arten verdrängt werden. Die Folgen dieses Selektionsdruckes sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschätzbar. Es wird jedoch beispielsweise eine rasche Ausbreitung von Krankheitserregern und Schädlingen befürchtet.

Auch eine regionale Vorhersage der Vegetationsverschiebungen fällt äußerst schwer. Sowohl die Auswertung paläoklimatischer Daten als auch die Klimamodellierung erlauben es bislang nicht, regionalspezifische Veränderungen der Klimaparameter vorherzusagen. Zudem bieten sie ausschließlich Aussagen über die zu erwartenden durchschnittlichen Temperatur- und Niederschlagsveränderungen. Tatsächlich werden Ökosysteme auch durch die Jahresgänge der einzelnen Klimafaktoren sowie das Auftreten von Extremereignissen (z. B. Dürren, Frosteinbrüche u. ä.) geprägt. Entsprechend vielfältig ist ihre spezifische natürliche Elastizität. Generell erscheinen die relativ labilen Ökosysteme in den semi-ariden bis ariden bzw. den kalten Klimaten besonders gefährdet. So kann z. B. eine leichte Verlängerung der Trockenperiode in den Savannengebieten zu folgenschweren Degradationserscheinungen führen. Auch die alpinen Ökosysteme drohen durch eine Veränderung des Temperatur- und Niederschlagsregimes irreversibel geschädigt zu werden (21).

Allgemein droht durch die Verschiebungen in den natürlichen Ökosystemen eine Abnahme der globalen Artenvielfalt. Besonders gefährdet erscheinen Regionen mit einem hohen Kulturlandanteil (z. B. Mitteleuropa) und entsprechend geringen Ausgleichsräumen. Die Folgen können zum jetzigen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden (16).

### 3.4.1.3 Sozioökonomische Folgen

Die Beeinträchtigungen der natürlichen und naturnahen Ökosysteme werden mit weitreichenden sozioökonomischen Folgewirkungen verknüpft sein. Ins-

besondere in den Entwicklungsländern sind die meisten Menschen direkt von intakten natürlichen Ökosystemen abhängig. Neben Brennholz bieten sie ihnen Baumaterialien, Nahrungs- und Arzneimittel. Zudem stellen sie die Weideflächen für die extensive Viehhaltung nomadischer Stämme dar. Bereits leichte Verschiebungen im Niederschlagsregime könnten zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung und zunehmenden Degradationserscheinungen in den ohnehin bereits gefährdeten Ökosystemen der semi-ariden Gebiete führen und zahlreichen Menschen die Existenzgrundlage entziehen (s. 3.6 Landwirtschaft).

Doch auch die Industriegesellschaften nutzen natürliche und naturnahe Ökosysteme. Sie sind meist von hohem ästhetischem Wert und dienen vornehmlich der Erholung. Diese Funktion wird durch die zukünftigen Klimaveränderungen gefährdet. So könnten beispielsweise Verschiebungen in der Artenzusammensetzung den Charakter der für die touristische Nutzung wichtigen Naturparks stark verändern. Dies gilt auch für die vom Tourismus besonders abhängigen Regionen außerhalb der Industrieländer.

Intakte natürliche und naturnahe Ökosysteme erbringen darüber hinaus auch indirekten Nutzen. Sie dämpfen Wetterextreme, bieten Schutz vor Lawinen, verhindern Wind- und Wassererosion und sind Senken für zahlreiche Spurenstoffe. Ein Verlust dieses Nutzens hätte auch in den Industrieländern weitreichende Konsequenzen, so z. B. die Häufung von Lawinen, Muren und Erdstürzen in Gebirgsregionen.

## 3.4.2 Marine Ökosysteme

### 3.4.2.1 Gefährdungspotential

Jährlich werden etwa 40 GtC von den marinen Lebewesen aufgenommen. Etwa 2,0 ± 0,8 GtC verbleiben in den lebenden Algen, deren Population durch eine sehr hohe Dynamik gekennzeichnet ist.

Die Primärproduktion von Biomasse in den Ozeanen wird im wesentlichen durch die Licht- und Nährstoffverhältnisse gesteuert. Die Temperatur spielt eine deutlich geringere Rolle. So befinden sich etwa 45 % der marinen Biomasse in den hohen Breiten, weitere 20 % in den küstennahen Schelfgebieten (13). Die Nährstoffversorgung hängt entscheidend vom Auftreten aufquellender Tiefenwasser ab. Dieser mit der allgemeinen Zirkulation der Ozeane gekoppelte Vorgang ist vom klimatischen Geschehen (Temperatur und Wind) gesteuert. Eine Klimaveränderung ist somit von großer Bedeutung für die marinen Ökosysteme.

Der Zusammenhang zwischen Klima und der Ozeanzirkulation schlägt sich in den Klimamodellen nieder und ist auch durch paläoklimatische Untersuchungen bestätigt worden. So hat sich die Zirkulation seit der letzten Eiszeit (vor 70 000 bis 10 000 Jahren) deutlich verringert und die Produktivität insbesondere in den höheren Breiten absinken lassen. Durch die erwarteten zukünftigen Klimaveränderungen ist folglich mit deutlichen Verschiebungen der räumlichen Verteilung und der Struktur der Meeresökosysteme zu rechnen.

Die bereits festzustellende Temperaturerhöhung des oberflächennahen Meereswassers hat zu einer polwärtsigen Wanderung verschiedener mariner Lebensgemeinschaften geführt. Dieser Trend wird sich in Zukunft verstärken. Dabei wird es – analog zu den Verschiebungen der terrestrischen Ökosysteme – nicht allen Arten im gleichen Maße gelingen, sich den veränderten Verhältnissen anzupassen, so daß es zu Änderungen in der Artenzusammensetzung kommen wird (13).

Besonders gravierend wird sich die zu erwartende Abnahme der Ozeanzirkulation auswirken. Die heute nährstoffreichen und durch hohe Produktivität gekennzeichneten Gebiete werden erheblich in ihrem ökologischen Gleichgewicht gestört. Die Folgen können am Beispiel des El-Niño-Effektes vor der Westküste Südamerikas beobachtet werden, der in unregelmäßigen Zeitabständen zu einem Absterben zahlreicher Meereslebewesen führt. Derartige Anomalien könnten sich in Zukunft verstärken und neben ökologischen auch gravierende sozioökonomische Auswirkungen hervorrufen (13).

Wesentlichen Einfluß auf die marinen Ökosysteme wird auch der Rückgang der Meeresvereisung haben. Durch ihn werden die im Eisrandbereich wachsenden Algen genauso betroffen sein, wie die dort lebenden großen Säugetiere. Zwar ist eine Reduktion der Produktivität durch die verlängerte Wachstumsphase nicht unbedingt zu erwarten, doch werden sich voraussichtlich deutliche strukturelle Veränderungen innerhalb der Energie- und Stoffflüsse zwischen den Ökosystemen im Grenzbereich zwischen Meer und Eis ergeben. So sind z. B. negative Rückkopplungen auf die hohe Produktivität der Algen in diesem Bereich zu erwarten, die ihrerseits die Hauptnahrungsquelle für die höheren Lebewesen darstellen.

Von Bedeutung sind auch im Falle der marinen Ökosysteme synergistische Effekte. So werden sich die durch übermäßiges Fischen hervorgerufenen ökologischen Störungen bei der zukünftigen Entwicklung der Artenzusammensetzung unter sich verändernden Bedingungen niederschlagen. Außerdem könnten erhöhte Temperaturen die Wirkungen der zunehmenden Verschmutzung der Meere verstärken. Auch die zu erwartende Zunahme der UV-B-Strahlung wird sich negativ auf die Produktivität und die Anpassungsfähigkeit mariner Ökosysteme auswirken. Dies könnte zum einen zu einer Verminderung der Senkenfunktion der Meere und einer entsprechenden positiven Rückkopplung auf den Treibhauseffekt führen. Zum anderen sind durch eine höhere UV-B-Strahlung in den höheren Breiten wichtige Ökosysteme im Küsten- und Eisrandbereich gefährdet, die als Kinderstube für eine Vielzahl von Fischarten von besonderer Bedeutung für deren Reproduktionsrate sind. Über die Folgen derartiger synergistischer Effekte bestehen noch erhebliche Forschungslücken.

#### 3.4.2.2 Sozioökonomische Folgen

Es ist davon auszugehen, daß die Klimaveränderungen die Artenzusammensetzung und Produktivität der marinen Ökosysteme beeinträchtigen und erheb-

liche Folgewirkungen für die Fischerei und die nachgeschalteten Industriebereiche haben werden. Zwar ist zu erwarten, daß bestimmte Fischarten durch die Veränderungen begünstigt werden und sich zu Lasten anderer Arten ausbreiten werden. Insgesamt muß jedoch von einer massiven Gefährdung der Fischerei insbesondere in den Gebieten mit starker Zirkulation und hoher Produktivität ausgegangen werden. Das Ausmaß der klimabedingten Veränderungen zeigen die Einbrüche in der Fischereiwirtschaft Perus im Zusammenhang mit dem El-Niño-Effekt. Derartige Erscheinungen drohen insbesondere den Küstenstaaten entlang der Zonen mit starkem Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers, die oftmals nicht in der Lage sein werden, die wirtschaftlichen Folgen zu kompensieren (z. B. Namibia, Mauretanien, Peru, Somalia) (13).

### 3.5 Auswirkungen auf die Forstwirtschaft

Etwa ein Drittel der Landoberfläche wird von Wäldern und Gehölzen eingenommen. Einen großen Teil dieser Vegetationsformen nutzt der Mensch auf unterschiedliche Weise. Dabei ergeben sich gleitende Übergänge zwischen den natürlichen und naturnahen Waldökosystemen und den intensiver genutzten Wäldern, so daß eine eindeutige Definition der forstwirtschaftlich genutzten Wälder schwerfällt. In Anlehnung an IPCC sollen im folgenden diejenigen Wälder betrachtet werden, die der Mensch geplant nutzt. Im Zentrum stehen dabei Wälder, die einem gezielten Management unterliegen.

Waldökosysteme sind aufgrund der Langlebigkeit des Baumbestandes relativ wenig anpassungsfähig an sich verändernde ökologische Bedingungen. Sie werden daher durch die zu erwartenden Klimaveränderungen besonders betroffen sein. So wird die Zunahme der Temperatur zu einer Erhöhung der Evapotranspiration führen, die nur bei gleichzeitig ansteigender Niederschlagsfrequenz und -intensität zumindest teilweise ausgeglichen werden kann. Weiterhin wird sich die Respirationsrate der Bäume bei zunehmender Temperatur erhöhen und dort, wo die Nettoprimärproduktion heute schon maximal ist, zu Zuwachseinbußen führen. Dagegen könnte in Zonen, wo die Temperatur limitierender Wachstumsfaktor ist, eine Zunahme der Nettoprimärproduktion eintreten. Ein wärmeres Klima wird zudem die Konkurrenzverhältnisse innerhalb der Waldökosysteme verändern sowie die Ausbreitung von Schädlingen und Krankheiten fördern. Besonders betroffen werden die semi-ariden Gebiete sein, die ohnehin unter Wasserstress stehen.

Außerdem sind forstwirtschaftlich genutzte Monokulturen stärker gefährdet als Mischwälder. Gefahren für die Forstwirtschaft gehen auch von der zu erwartenden Häufung von extremen Wetterereignissen aus. Hierbei sind neben Stürmen auch langanhaltende Trockenperioden und vereinzelte Frosteinbrüche in ansonsten milderem Klima zu nennen. Ein wärmeres Klima wird die Frostanfälligkeit der sommergrünen Wälder in den mittleren Breiten erhöhen, da der zum Überwintern notwendige Blattabwurf sich in das Winterhalbjahr hinein verschieben würde. Ein wichtiger

Tabelle 3.4

**Anteil der Waldflächen an der gesamten Landoberfläche im Jahr 1980  
(IPCC-WGII, 1990)**

Region	Gesamte Landoberfläche (Mio. ha)	Waldfläche (Mio. ha)	Anteil der Waldflächen an der gesamten Landoberfläche (%)	Anteil an der weltweiten Waldfläche (%)	Waldfläche pro Einwohner (ha/EW)
Weltweit . . . . .	13 075	4 094	31,3	100,0	0,9
Industrieländer . . . . .	5 485	1 829	33,3	44,7	1,6
Nordamerika . . . . .	1 835	611	33,3	14,9	2,4
Westeuropa . . . . .	373	126	33,8	3,1	0,3
Osteuropa . . . . .	100	29	29,0	0,7	0,3
UdSSR . . . . .	2 227	920	41,3	22,5	3,5
Japan . . . . .	37	25	67,6	0,6	0,2
Sonstige *) . . . . .	913	118	12,9	2,9	2,3
Entwicklungsländer . . . . .	7 591	2 264	29,0	55,3	0,7
Afrika . . . . .	2 331	642	27,5	15,7	1,7
Naher Osten . . . . .	1 192	98	8,2	2,4	0,5
China . . . . .	931	116	12,5	2,8	0,1
Asien/Sonstige . . . . .	1 028	356	34,6	8,7	0,3
Lateinamerika . . . . .	2 020	1 015	50,2	24,8	2,8
Sonstige **) . . . . .	88	37	42,0	0,9	7,2

\*) Australien, Israel, Neuseeland, Südafrika

\*\*) Pazifische Inseln und Grönland

Tabelle 3.5

**Waldressourcen und Waldnutzung in forstwirtschaftlich bedeutenden Staaten  
(IPCC-WGII, 1990)**

	Indonesien	China	Indien	Brasilien	Kenia
Waldflächen (Mio. ha) . . . . .	122	135	67	565	3,7
Produktive Waldflächen (Mio. ha) . . . . .	45	122	45	350	1,1
Forstflächen (Tsd. ha) . . . . .	1 918	12 733	2 062	3 855	181
	Sambia	Finnland	Neuseeland	Chile	
Waldflächen (Mio. ha) . . . . .	29,5	23,3	10,6	15,5	
Produktive Waldflächen (Mio. ha) . . . . .	4,1	18,2	2,8	4,7	
Forstflächen (Tsd. ha) . . . . .	38	145	1 200	817	
	Kanada	USA	Österreich	Bundesrepublik Deutschland	
Waldflächen (Mio. ha) . . . . .	452	265	3,2	7,3	
Produktive Waldflächen (Mio. ha) . . . . .	244	210	3,0	7,3	
Forstflächen (Tsd. ha) . . . . .	450	917	25	70	

Punkt wird auch das verstärkte Auftreten von Bränden sein, die den Selektionsdruck noch erhöhen und die Stoffflüsse zwischen Bio- und Atmosphäre verändern.

Ob die negativen Folgen zumindest teilweise durch den sog. CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt kompensiert werden, erscheint nach dem heutigen Wissensstand fraglich. Ein Anstieg der Nettoprimärproduktion in Wäldern als Folge eines erhöhten CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre konnte unter Freilandbedingungen nicht nachgewiesen werden. Die von der FAO ermittelten ansteigenden Zuwachsraten der Biomasse in den Wäldern Europas sind eher auf den starken Stickstoffeintrag aus der Luft zurückzuführen (22).

Das Auftreten der oben aufgeführten Folgewirkungen für die Wälder wird regional stark variieren. Es ist davon auszugehen, daß sich die Vegetationszonen verschieben, wobei angenommen werden kann, daß eine Zunahme der Temperatur um 1 °C zu einer polwärtigen Verschiebung von 200 bis 300 km führen wird (13). Bei einer Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration entsprechenden Temperaturanstieg wird sich z. B. die Zone der borealen Wälder in die heutige Tundra verlagern und dabei um etwa 40 % verkleinern. Die Fläche der subtropischen Wälder dürfte sich um etwa 20 % verringern, während sich die mit tropischen Wäldern bestockten Flächen um ca. 30 % ausweiten. Inwieweit sich die Wälder einer derartigen Verschiebung der klima-ökologischen Bedingungen tatsächlich anpassen können, hängt in erster Linie von ihrer maximalen Wanderungsgeschwindigkeit ab. Obwohl artenspezifische Untersuchungen noch fehlen, wird allgemein angenommen, daß die Bäume in der Regel ihr Verbreitungsgebiet nicht rasch genug erweitern können und somit mehr und mehr in ein asynchrones Verhältnis zu ihrer Umwelt geraten. Dabei wirken einerseits die landwirtschaftlich genutzten Flächen als Barrieren für die Wanderung der natürlichen Ökosysteme. Andererseits wird die Verlagerung des Ausbreitungsgebietes auch durch unzureichende Bodenqualitäten, die sich über Jahrtausende unter bestimmten Klimabedingungen entwickelt haben, behindert werden. Es ist davon auszugehen, daß sich innerhalb der nächsten Jahrzehnte die Flächen der unter ökologischem Streß stehenden Wälder drastisch erhöhen wird. In den USA wird ein Rückgang der Waldflächen im trockenen zentralen und westlichen Teil in etwa 30 Jahren, im mittleren Westen in etwa 30 bis 60 Jahren und im Südosten in etwa 60 bis 70 Jahren erwartet (13). In Australien könnten die Verbreitungsgebiete von *Pinus radiata* und *Eucalyptus regnans* vollkommen verschwinden. In vielen Regionen der Erde sind zudem negative synergistische Effekte zu befürchten. So werden die erhöhten bodennahen Ozonkonzentrationen in der Nähe von industriellen Ballungsgebieten den klimatischen Streß noch deutlich verstärken. Eine ähnliche Wirkung hat die insbesondere in Europa auftretenden großflächige Versauerung der Waldböden. In den wechselfeuchten Tropen kommt zu dem klimatischen der bereits heute in dramatischer Form auftretende Streß durch Übernutzung hinzu. Zudem werden hier bereits relativ geringe Veränderungen der Niederschlagsmuster zu gravierenden Folgen für die Ökosysteme führen. Besonders gefährdet sind

auch die Wälder in montanen und alpinen Vegetationsstufen. Zwar wird die Zunahme der Temperatur die alpine Baumgrenze insgesamt ansteigen lassen, doch reagieren die labilen Ökosysteme in dieser Vegetationsstufe empfindlich auf jede Störung, so daß bereits leichte Abweichungen vom heutigem Klima deutliche Schäden hervorrufen können.

Die ökologischen Veränderungen betreffen unmittelbar die Nutzbarkeit der Wälder. Zwar können forstwirtschaftliche Maßnahmen Einfluß nehmen auf die Verschiebungen der Waldökosysteme – als Möglichkeiten bieten sich beispielsweise die Erhöhung der Artenvielfalt in Forsten, die Kultivierung widerstandsfähiger Baumarten oder die Verkürzung der Umtriebszeiten. Es ist jedoch unstrittig, daß mit schwerwiegenden Rückwirkungen auf die Forstwirtschaft zu rechnen ist. So werden sich in der borealen Zone, in der der Holzeinschlag während des Winters erfolgt, wenn der Boden gefroren und leicht befahrbar ist, die Erntezeiten verkürzen. Zunehmender ökologischer Streß wird den Erfolg bei der Anpflanzung von Setzlingen reduzieren und insgesamt eine intensivere Bewirtschaftung notwendig machen. Auch hier werden regional unterschiedliche Auswirkungen eintreten. So werden die borealen Wälder insgesamt wesentlich geringeren Schaden nehmen als die Wälder der ariden und semi-ariden Regionen und in den Gebirgsräumen. Für die kanadische Forstwirtschaft werden daher eher positive sozioökonomische Effekte, für die US-amerikanische eher negative Effekte erwartet.

Neben den ökologischen Bedingungen wird der Grad der Beeinträchtigungen der Forstwirtschaft auch von der vorhandenen Infrastruktur abhängen. Eine gut ausgebaute Infrastruktur erleichtert waldbauliche Gegenmaßnahmen. Zu bedenken ist hierbei auch, daß eine räumliche Verschiebung der Wälder den Aufbau der notwendigen Infrastruktur in den neu-besiedelten Gebieten erforderlich machen wird. Hier sind erhebliche Kosten zu erwarten.

### 3.6 Auswirkungen auf die Landwirtschaft

Inzwischen liegen hinreichende Belege vor, daß die Landwirtschaft in vielfacher Hinsicht von den Klimaveränderungen betroffen sein wird. Die Nahrungsmittelproduktion wird durch veränderte Klimaparameter (Temperatur, Niederschläge, Wolkenbildung) und eine veränderte chemische Zusammensetzung der Atmosphäre erheblich beeinflußt werden. Die Verschiebung der Klimagürtel wird gravierende Änderungen in der Bewirtschaftungsweise notwendig machen. Auch der prognostizierte Anstieg des Meeresspiegels ist zu berücksichtigen, Überschwemmungen werden wertvolle Anbauflächen vernichten (s. Kap. 3.3).

Ausschlaggebend für die Höhe der landwirtschaftlichen Erträge ist die Verteilung der Niederschläge und die Bodenfeuchte. Großen Einfluß hat auch die Temperatur, wobei nicht so sehr die durchschnittliche Temperaturerhöhung, sondern eher die Temperaturmaxima und -minima von Bedeutung sind. Diese Faktoren können mit den bisherigen Klimamodellen

nur schlecht und ungenau vorhergesagt werden. Obwohl in den letzten Jahren Fortschritte erzielt wurden, wird noch wissenschaftlich diskutiert, wie sich Niederschläge und Temperaturen regional ändern werden. Deshalb konnte beispielsweise bisher nicht geklärt werden, ob die Nahrungsmittelproduktion, global gesehen, infolge der Klimaänderung zu- oder abnehmen wird.

Einigkeit herrscht jedoch darüber, daß die Folgen der Klimaänderungen ungleich verteilt sein werden. Bestimmte gefährdete Regionen werden erheblich unter erhöhten Temperaturen leiden, andere Regionen werden wiederum die Produktion steigern können. Gerade im Bereich der Landwirtschaft sind die direkten sozioökonomischen Folgen von veränderten Produktionsbedingungen schwerwiegend, da insbesondere den Entwicklungsländern technische und finanzielle Anpassungsmöglichkeiten fehlen.

Alle Überlegungen müssen vor dem Hintergrund der Probleme gesehen werden, die eine rapide wachsende Weltbevölkerung auch ohne Klimaänderungen verursachen wird. Die Bevölkerung wird von jetzt 5 Milliarden auf 8,5 Milliarden im Jahr 2025 wachsen. Bei der bereits bestehenden Unterversorgung in vielen Regionen der Erde müßte die landwirtschaftliche Produktion um mindestens 75 % (entspricht 2,5 %/Jahr) in den nächsten 30 Jahren wachsen (23). Die Zuwachsraten betragen seit 1960 jährlich 2–3 %, gingen aber 1991 erstmals zurück (24). Neben der Nahrungsmittelproduktion werden weiterhin zusätzliche große Anforderungen an die Bereitstellung von Land, Frischwasser und Brennmaterial gestellt werden.

### 3.6.1. Direkte physiologische Auswirkungen von CO<sub>2</sub>, erhöhter UV-B-Strahlung und Luftschadstoffen auf Pflanzen, Böden und Tiere.

Das Pflanzenreich gliedert sich in zwei große Pflanzengruppen, die auf biochemisch unterschiedlichen Wegen das CO<sub>2</sub> in der Photosynthese fixieren. C3-Pflanzen binden das CO<sub>2</sub> an einen Zucker, der 5 Kohlenstoffatome enthält. Die entstandene Verbindung mit 6 Kohlenstoffatomen zerfällt in zwei je 3 Kohlenstoffatome enthaltende Zucker (= C3). C4-Pflanzen binden dagegen das CO<sub>2</sub> zunächst an eine C3-Verbindung. In dem so entstandenen C4-Körper wird das CO<sub>2</sub> zwischengespeichert und der Photosynthese in einer effizienten Form zugeführt.

Die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration hat in einem komplexen System wie der Pflanze zahlreiche verschiedene Folgen, die nicht isoliert voneinander betrachtet werden können. Eine monokausale Vorgehensweise ist prinzipiell nicht aufschlußreich.

Für die C3-Pflanzen gilt, daß die bisherigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (355 ppm in 1991) für die Photosynthese-Rate suboptimal sind. Das heißt, eine erhöhte Konzentration an CO<sub>2</sub> würde eine erhöhte Aufnahme durch die Pflanze mit sich bringen und über die Verbesserung der Photosynthese-Rate zu einer Steigerung der Biomasseproduktion führen. Hinzu kommt eine gesteigerte Wassereffizienz, da die Pflanzen unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration die Spaltöffnungen

schließen und weniger Wasser durch Transpiration verlieren. Einzelne Arten variieren in ihrer Reaktion, bei der überwiegenden Mehrheit der untersuchten Pflanzen war ein CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt zu verzeichnen. Bei einer Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind Steigerungen von 10–50 % Zuwachs an Biomasse gemessen worden (13) (25).

Zu den C4-Pflanzen gehören Mais, Hirse, Zuckerrohr und andere Nutzpflanzen der Tropen. Diese Pflanzen haben zur Optimierung der Photosynthese bereits einen CO<sub>2</sub>-Anreicherungsmechanismus entwickelt. Sie profitieren daher nur wenig oder gar nicht von der Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration.

Der CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt wurde bislang als eine der wenigen positiven Folgen der CO<sub>2</sub>-Erhöhung angesehen: erhöhte Biomasseproduktion könnte einen Beitrag zur Lösung der Ernährungsprobleme leisten. Außerdem könnte durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Fixierung mehr Kohlenstoff in Form von Biomasse gespeichert und daher der Treibhauseffekt abgepuffert werden.

Es sind jedoch auch zahlreiche Effekte festgestellt worden, die nicht zur Erhöhung der Biomasseproduktion führen. So zeigten Langzeit-Freiland-Versuche eine baldige Gewöhnung an erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Die Pflanzen waren nur bedingt in der Lage die akkumulierten Kohlehydrate zu transportieren und weiterzuverarbeiten. Oftmals wirkten fehlende Nährstoffe wie z. B. Phosphor wachstumsbegrenzend. Weiterhin ist nachgewiesen worden, daß sich das Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis der gebildeten Biomasse bei Zunahme des CO<sub>2</sub>-Gehalts verändert. Somit sind Einbußen in der Futtermittel- und Nahrungsmittelqualität zu befürchten. Problematisch ist auch die stärkere Bevorzugung von C3-Pflanzen gegenüber den C4-Pflanzen zu beurteilen. Dadurch könnten völlig veränderte Konkurrenzverhältnisse beispielsweise durch stärkeres Wachstum von Wildkräutern entstehen. Limitierung des Wasserangebots in vielen Böden macht eine Erhöhung der Photosynthese-Rate unmöglich. Bisher wird über Art und Ausmaß der negativen Folgen noch kontrovers diskutiert (20). Es steht zu befürchten, daß die positiven Folgen der CO<sub>2</sub>-Düngung durch Streßfaktoren wie zunehmende UV-B-Strahlung und Luftschadstoffe kompensiert oder überkompensiert werden könnten.

Die Abnahme der stratosphärischen Ozonschicht wird zu einer Erhöhung der UV-B-Strahlung und einer Verschiebung der Absorptionskante zu niedrigen Wellenlängen führen. UV-B-Strahlen wirken mutationsauslösend und beeinträchtigen den photosynthetischen Apparat, die Keimungsrate und das allgemeine Pflanzenwachstum.

Bisherige Untersuchungen über die Auswirkungen der UV-B-Strahlen konzentrierten sich auf landwirtschaftliche Nutzpflanzen. Von den ca. 200 untersuchten Arten reagierten etwa zwei Drittel UV-empfindlich. Bei diesen Pflanzen ist eine Abnahme der Biomasseproduktion beobachtet worden, die sich bisher noch nicht allgemein quantifizieren läßt. Die Reduktionen waren teilweise beträchtlich, sie betragen bei Soja beispielsweise 25 % bei simulierter 25 %iger Ozonabnahme (26).

In Gebieten, die durch das antarktische Ozonloch beeinflusst wurden, wurde eine Reduktion der Bio-

masse des Phytoplanktons von 6–12 % festgestellt. Sollten sich Vermutungen bestätigen, daß sich die Biomasseproduktion infolge erhöhter UV-B-Strahlung um 10 % verringern wird, muß mit einer zusätzlichen Emission von einigen Gt Kohlenstoff pro Jahr gerechnet werden. Dieses würde der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emission aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe entsprechen (27) (28).

Wegen des sehr hohen Gefährdungspotentials müssen die Folgen erhöhter UV-B-Strahlung genauer untersucht werden, vorab sind exakte Messungen der Strahlungs-dosis notwendig.

Schwerwiegende Folgen wird die stetige Zunahme der Luftschadstoff-Konzentration haben. Wegen des erwarteten global ansteigenden Verkehrsaufkommens wird mit steigenden Stickoxid-Emissionen gerechnet, die zusammen mit den gleichzeitig emittierten Kohlenwasserstoffen zur Bildung von bodennahem Ozon beitragen. Das Ozon verursacht bei Pflanzen Schäden am Photosynthese-Apparat, Blattschäden sowie Wachstums-, Ertrags- und Qualitätsveränderungen. Ozon senkt die Empfindlichkeitsschwellen gegenüber anderen biotischen und abiotischen Streßfaktoren. In immer größeren Bereichen der nördlichen Hemisphäre treten regional hohe Ozonkonzentrationen auf, wobei Dauer, Höhe und Frequenz dieser „O<sub>3</sub>-Episoden“ stark variieren können. Obwohl auch hier arten- und sortenspezifische Empfindlichkeitsunterschiede bei Pflanzen vorliegen, gilt bodennahes Ozon wegen seiner Phytotoxizität mittlerweile in den USA und auch in Europa als der bedeutendste Luftschadstoff (29). Es beeinträchtigt außerdem die Gesundheit von Menschen und Tieren.

Obgleich die einzelnen Effekte von erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration, UV-B-Strahlung und Luftschadstoffen prinzipiell bekannt sind, ist es sehr schwierig einzuschätzen, wie sich das Zusammenwirken der Faktoren auf Pflanzen, Tiere und Böden auswirken wird. Quantitative Aussagen können derzeit wegen des unzureichenden Kenntnisstandes nicht gemacht werden. Hier besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf.

### 3.6.2 Folgen veränderter Klimaparameter (Temperatur, Niederschläge, Wolkenbildung u. a.)

Für die landwirtschaftliche Produktion von Bedeutung sind folgende Prognosen, die aus Klimamodell-Rechnungen abgeleitet wurden (s. Kap. 3.3). Bei globaler Erwärmung wird/werden:

- die für den Landbau geeigneten Klimazonen pro Grad Celsius um ca. 200–300 km polwärts und im Bergland um 200 m in die Höhe verschoben,
- die Frequenz und Intensität starker Regenfälle in fast allen Breitengraden zunehmen,
- die Anzahl von Regentagen in den mittleren Breitengraden abnehmen (13),
- die Temperatur in niedrigen und mittleren Breiten stärker zunehmen als in hohen Breitengraden,
- die Häufigkeit extremer Wetterereignisse wie Dürren, Stürme und Fluten zunehmen.

Die Klimaveränderungen und ihre Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion werden starke regionale Unterschiede aufweisen. Besonders betroffen sind die semi-ariden Vegetationszonen, die bereits auf eine geringe Verschiebung der Niederschlagsmengen empfindlich reagieren. Hier werden die Klimaänderungen auch absolut gesehen die gravierendsten sein. Im einzelnen sind folgende Regionen als besonders sensibel bezeichnet worden:

in Afrika: Maghreb, West-Afrika, Horn von Afrika, südliches Afrika

in Asien: westliches Arabien, Südostasien

in Amerika: Mexiko, Zentralamerika, östliches Brasilien, Peru.

Diese Regionen werden zusätzlich große Anpassungsprobleme haben, weil es hier an fruchtbarem Land, Bewässerung, dürrerotolerantem Saatgut, technischen Adaptionsmöglichkeiten sowie nicht zuletzt Kapital auf Seiten der Bauern und angemessenen Preisen für ihre Produkte mangelt (13).

Profitieren könnten hingegen die hohen Breitengrade, insbesondere der nördlichen Hemisphäre. Hier würde eine Temperaturerhöhung, solange die Wasser- und Nährstoffversorgung gesichert ist, die Vegetationsperiode verlängern und die Produktion steigern. Der hohe technische Standard wird eine Anpassung an veränderte Wirtschaftsbedingungen erleichtern. In Europa könnten die skandinavischen Länder, Polen und die nördlichen Teile der ehemaligen UdSSR positive Auswirkungen erfahren, wohingegen die Mittelmeerländer möglicherweise größere Probleme mit der Wasserversorgung bekommen werden.

In Australien und Neuseeland wird eine Verschiebung der Vegetationszonen zu veränderten Anbaumethoden, aber nicht zu größeren Einbußen führen.

Die veränderte Abfolge der Wetterkonstellationen im Tages- und Jahreslauf kann das Artenspektrum der Tier- und Pflanzenschädlinge sowie das Auftreten von Tier- und Pflanzenkrankheiten verändern. Obwohl im einzelnen durch höhere Temperaturen oder größere Trockenheit auch Schädlinge zurückgedrängt werden können, wird generell mit verbesserten Lebensbedingungen für Schadorganismen gerechnet. So werden bei höheren Temperaturen die Generationszeiten verkürzt und die Fraßaktivitäten vermehrt. Hitzegestresste Pflanzen werden anfälliger für Befall durch Schädlinge, mildere Winter fördern frostempfindliche Schadinsekten. Dies gilt in ähnlicher Weise für Tierschädlinge und -krankheiten.

Falls eine ähnlich intensive Landwirtschaft wie bisher betrieben werden wird, muß mit dem gesteigerten Einsatz von Agrochemikalien gerechnet werden.

Schließlich müssen auch die Folgen einer Klimaänderung auf symbiotische Beziehungen, wie sie zwischen Leguminosen und Knöllchenbakterien und beispielsweise Bäumen und Mycorrhiza-Pilzen vorliegen, betrachtet werden. Bei diesen Lebensgemeinschaften werden die Bodenorganismen von den Pflanzen mit Kohlehydraten versorgt und liefern im Gegenzug verwertbaren Stickstoff und andere Nährstoffe an die

Pflanzen. Es ist nicht auszuschließen, daß eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration die Aktivität der symbiotischen Organismen fördert. Dies könnte sich auf die Biomasseproduktion, z. B. beim Grünland, positiv auswirken (29). Einen negativen Effekt scheinen aber erhöhte Temperaturen und auch erhöhte Luftschadstoffkonzentrationen (O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>) auf die Stickstoff-Fixierung zu haben (13). Die gegenläufigen Richtungen der dargestellten Wirkungen verdeutlichen die Schwierigkeiten, mit dem heutigen Kenntnisstand, selbst bei Berücksichtigung von nur zwei Einflußgrößen, verlässliche Vorhersagen zu treffen.

Die *Tierproduktion* wird nur mittelbar von der Klimaänderung betroffen werden. Säugetiere und Vögel sind prinzipiell in der Lage, ihre Körpertemperatur unabhängig von der Außentemperatur konstant zu halten. In der Viehhaltung müßten die Ställe möglicherweise mehr gekühlt bzw. weniger beheizt werden. Auswirkungen auf die Tierproduktion könnte auch eine durch Temperaturerhöhung veränderte Futterzusammensetzung haben. Auch die Fischproduktion wird betroffen werden. (s. 3.4.2 Marine Ökosysteme). In höheren Breitengraden könnte eine Steigerung erreicht werden (30). Allerdings werden Probleme eintreten, wenn der Sauerstoffgehalt des Wassers in Folge höherer Temperaturen zu sehr sinkt (13) (31).

Im Hinblick auf die Bodenfruchtbarkeit sind positive Effekte nur über die CO<sub>2</sub>-Düngung zu erwarten. Eine größere Pflanzenmasse könnte zu vermehrten Pflanzenrückständen im Boden und damit zu verstärkter Humusbildung beitragen. Ein erwärmungsbedingt beschleunigter Humusumsatz verbessert vorübergehend die Nährstoffverfügbarkeit.

Auf der anderen Seite ist mit sehr zahlreichen, durch den Treibhauseffekt bedingten Prozessen zu rechnen, die die Böden qualitativ und quantitativ schwerwiegend beeinträchtigen könnten. Eine Temperaturerhöhung kann durch erhöhte mikrobielle Aktivität den Humusumsatz verstärken und beschleunigen. Der im Boden gebundene organische Kohlenstoff könnte in erheblichem Umfang abgebaut und freigesetzt werden. Möglicherweise wird so eine neue Quelle eröffnet, aus der sehr große Mengen an CO<sub>2</sub> emittiert werden könnten. Quantitative Aussagen über diesen Effekt sind noch nicht möglich. Verminderte Humusgehalte wirken sich negativ auf die Bodenfruchtbarkeit aus, indem die physikalische Beschaffenheit der Böden verschlechtert wird. Höhere Temperaturen beschleunigen die Bodendegradation. Die Böden werden vermehrt durch Wind- und Wassererosion gefährdet. Um das Ausmaß der Probleme zu demonstrieren sei erwähnt, daß die landwirtschaftliche Produktion in Afrika zwischen 1975 und 2 000, auch ohne Klimaänderung, durch Bodenerosion um ein Viertel reduzieren wird (32).

Aber auch die veränderte chemische Zusammensetzung der Böden durch erhöhte Bodenatmung und Mineralisation bringt langfristig die Gefahr einer Nährstoff-Auswaschung und Mobilisierung von toxischen Schwermetallen mit sich. Dies belastet wiederum die Grundwasser-Reserven.

Wenn durch die globale Erwärmung die künstliche Bewässerung steigt, erhöht sich automatisch auch die

Versalzungsgefahr. Mitte der 80er Jahre waren bereits 24 % des weltweit bewässerten Kulturlandes durch Versalzung geschädigt und infolge von Flächenvergrößerung und Knappheit an qualitativ gutem Wasser wird diese Schädigung weiter fortschreiten (32) (33) (34).

Die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Fruchtbarkeit und Stabilität der Böden dürfen nicht unterschätzt werden. Sie können aber durch eine vorausschauende Bodenpflege und -bearbeitung gemildert werden. Im Hinblick auf die Bedeutung, die die Böden nicht nur als landwirtschaftliche Nutzungskörper, sondern auch als Teile der natürlichen Ökosysteme haben, ist die Entwicklung und Durchführung von *Bodenschutzkonzeptionen* dringend erforderlich.

### 3.6.3 Sozioökonomische Folgen

Bisher sind nur relativ wenige Untersuchungen über sozioökonomische Folgen eines veränderten Klimas durchgeführt worden. Bei der Beurteilung der Folgen läßt sich auch hier das Konzept der „gefährdeten Regionen“ anwenden. Dazu gehören große Regionen in Brasilien und Peru sowie die Sahelzone Afrikas, Südostasien, die asiatischen Regionen der ehemaligen UdSSR und China.

Die Volkswirtschaften dieser Länder sind im hohen Maße von der Agrarproduktion abhängig, der Anteil der Landwirtschaft am Bruttosozialprodukt ist hoch. Die Länder mit großer Bevölkerungsdichte haben bereits heute erhebliche Schwierigkeiten in der Bereitstellung von Nahrung, Wasser und Flächen. Wie negativ sich die einzelnen Folgen in einem Land auswirken werden, hängt sehr stark davon ab, welche technischen und politischen Anpassungsmöglichkeiten vorhanden sind. Bereits heute herrscht in den gefährdeten Regionen ein Ungleichgewicht zwischen Bevölkerung und landwirtschaftlichem Potential, die Mittel zur Anpassung sind nicht vorhanden. Den Bauern fehlt es an Land, Kapital, technischem Know-how und angemessenen Preisen für ihre Produkte. Wegen der geringen Niederschlagsmengen sind schon jetzt in diesen Regionen die landwirtschaftlichen Erträge besonders klimaabhängig. Jede weitere Störung wird zu großen gesellschaftlichen Problemen, Nahrungsmittelknappheit, Hungersnöten und Flüchtlingsströmen führen.

Wie im Vorhergehenden dargestellt, gibt es keine zwingenden Beweise, daß die Klimaänderung sich negativ auf die globale Nahrungsmittelproduktion auswirkt. Es wird aber zweifelsfrei zu Verschiebungen und Umschichtungen der Bewirtschaftungsweise kommen. Dies wird zunächst direkt die Einkommen der Bauern und die ländliche Beschäftigungsstruktur beeinflussen. Auf höherer Ebene können die nationale Nahrungsmittelsicherheit und die Exporte gefährdet werden. Letzteres könnte die Verteilungsmuster und Preise der internationalen Nahrungsmittelmärkte verschieben. Es muß auch berücksichtigt werden, daß die Produktionskosten regional verändert werden können. So würden beispielsweise die Kosten für Bewässerungsmaßnahmen im Getreidegürtel der USA bei einer Erwärmung um 4 °C um 20–25 % steigen. Andererseits würde ein Temperatur-

anstieg von 1 °C die Produktionskosten für Winterweizen in zentralen Regionen der ehemaligen UdSSR um 22 % verringern (13).

In vielen Ländern werden sich neue soziale Strukturen einstellen müssen. So wird beispielsweise eine Verknappung oder Verschlechterung der Futtermittel bei nomadisierenden Völkern in Afrika einen erhöhten Flächenbedarf zur Folge haben (35).

Letztlich bleibt festzuhalten, daß die sozioökonomischen Folgen die Entwicklungsländer gegenüber den Industrieländern weiter benachteiligen werden.

## Literatur

- (1) WMO/UNEP Global Ozone Research and Monitoring Project, Nr. 25, 1992
- (2) Toon, O. B., und Turco, R. P., 1991
- (3) Zellner, R., 1992
- (4) Wege, K., 1992
- (5) Mather, J. H., und Brune, W. H., 1990
- (6) Pitari, G., Visconti, G., und Rizi, V., 1991
- (7) Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, 1990
- (8) Liu, S. C., McKeen, S. A., und Madronich, S., 1991 Madronich et al., 1992
- (9) Ozon-Symposium, München, Juli 1991
- (10) WMO/UNEP (IPCC Working Group I), 1990 und 1992
- (11) Stellungnahme von U. Cubasch im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Klima I“ der Enquete-Kommission am 16./17. Januar 1992, Kommissionsdrucksache 12/4-a
- (12) Stellungnahme von H. Flohn im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Klima I“ der Enquete-Kommission am 16./17. Januar 1992, Kommissionsdrucksache 12/4-b
- (13) WMO/UNEP (IPCC Working Group II), 1990
- (14) Stellungnahme von J. Oerlemans im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Klima I“ der Enquete-Kommission am 16./17. Januar 1992, Kommissionsdrucksache 12/4-a
- (15) Stellungnahme von G. P. Hekstra im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Klima I“ der Enquete-Kommission am 16./17. Januar 1992, Kommissionsdrucksache 12/4-b
- (16) World Wide Fund for Nature – WWF, 1992
- (17) Sombroek, 1990
- (18) Mündliche Stellungnahme von G. H. Kohlmaier im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Klima I“ der Enquete-Kommission am 16./17. Januar 1992
- (19) Esser, G., 1989
- (20) Bazzaz, F. A. und E. D. Fajer, 1992
- (21) Wininger, M., 1992
- (22) Stellungnahme von P. Burschel im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Klima I“ der Enquete-Kommission am 16./17. Januar 1992, Kommissionsdrucksache 12/4-i
- (23) Stellungnahme von G. H. Kohlmaier im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft II“ der Enquete-Kommission am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5
- (24) FAO, 1991
- (25) Kimball, B. A., 1983
- (26) Teramura et al, 1990
- (27) Häder, D. P. und R. C. Worrest, 1991
- (28) UNEP-Report, 1991
- (29) Stellungnahme von H. J. Weigel im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft II“ der Enquete-Kommission am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5-e
- (30) Stellungnahme der FAO im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft II“ der Enquete-Kommission am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5-e
- (31) Mündliche Stellungnahme von E. Pfeffer im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft II“ der Enquete-Kommission am 17./18. Februar 1992
- (32) Brown et al. 1990
- (33) Stellungnahme von D. Sauerbeck im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft II“ der Enquete-Kommission am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5-a
- (34) Stellungnahme von K. Haider im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft II“ der Enquete-Kommission am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5-b
- (35) Mündliche Stellungnahme der FAO im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft II“ der Enquete-Kommission am 17./18. Februar 1992

## 4 Bewertung des Forschungsstandes

### Zusammenfassung

Der Anstieg der atmosphärischen Konzentrationen anthropogener Treibhausgase wird in seiner Klimawirksamkeit in den kommenden 100 bis 200 Jahren alle anderen Einflußfaktoren, wie zum Beispiel mögliche Vulkanausbrüche oder Änderungen in der Einstrahlungsstärke der Sonne, übertreffen. Die wesentlichen internen Rückkopplungsmechanismen im Klimasystem sind bis auf einige offene Fragen bei der Einschätzung des Beitrags der Bewölkung bekannt.

Zur Verbesserung der Vorhersage regionaler Klimaänderungsmuster sind weitere Forschungsaktivitäten notwendig. In Anbetracht der großen Komplexität des Klimasystems bleibt aber stets ein großes Risiko, da bei streng nichtlinearen Kopplungen regionale wie globale Überraschungen sicher sind. Die Globalität und Komplexität der Problematik der Klimaänderung und ihren Auswirkungen erfordert dringend die Intensivierung der interdisziplinären Forschung.

Mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit wird die Verdopplung der äquivalenten  $\text{CO}_2$ -Konzentration schon in der ersten Hälfte des kommenden Jahrhunderts erreicht. Damit wird sich der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur weiter beschleunigen und eine Umverteilung der Niederschläge eingeleitet. Die politischen Entscheidungsträger sind dringend aufgefordert, sofort Gegenmaßnahmen einzuleiten, da jede Verzögerung das Risiko erhöht, den Auswirkungen der Klimaänderung nicht mehr annähernd adäquat begegnen zu können.

### 4.1 Fakten und offene Fragen in der Klimadiskussion

Die Vorhersage von Klimaänderungen beinhaltet drei wesentliche Schritte:

- (a) Vorhersage zukünftiger Emissionsraten und Landnutzungsänderungen
- (b) Berechnung der in der Atmosphäre verbleibenden Spurenstoffe
- (c) Berechnung der Klimaänderung mit den Vorgaben von (a) und (b)

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Punkte (b) und (c). Punkt (a) wird durch die politischen Entscheidungsträger sowie durch die allgemeine Bevölkerungsentwicklung bestimmt. Die bestehenden Unsicherheiten dort beeinflussen jedoch nachhaltig die Unsicherheitsmargen der Klimaprognose.

In diesem Kapitel werden die wichtigsten gesicherten Erkenntnisse und die größten bestehenden Unsicher-

heiten in der aktuellen Diskussion einer globalen Klimaänderung zusammengefaßt. Gleichzeitig werden die verschiedenen Einflußfaktoren nach ihrer möglichen Klimarelevanz bewertet, um so die zukünftige Entwicklung des Klimas abschätzen zu können. Die Diskussion gliedert sich in folgende Teilbereiche:

- anthropogen eingebrachte Spurengase
- interne Klimaparameter und Rückkopplungsmechanismen
- Sensitivitätsabschätzung verschiedener Einflußfaktoren im Klimasystem
- globale Klimaentwicklung
- regionale Klimaänderungen und Auswirkungen

#### 4.1.1 Klimapotentiale anthropogen eingebrachter Spurengase

Der vom Menschen verursachte Anstieg der Konzentration der langlebigen Treibhausgase  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und FCKW setzt sich weiter fort. Im Falle des Methans ( $\text{CH}_4$ ) hat sich der Anstieg aus bisher ungeklärter Ursache in den letzten Jahren verlangsamt. Der atmosphärische Kreislauf, insbesondere die Quellen und Senken der einzelnen Verbindungen sind nur unzureichend bekannt, so daß Aussagen über die kommende Entwicklung der Konzentration von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  mit Unsicherheiten behaftet sind. Beispielfhaft seien die Methanemissionen aus Reisfeldern, die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen aus Böden und durch anthropogene Aktivitäten sowie die weltweiten Waldrodungsraten genannt. Insbesondere jedoch müssen die Kenntnisse über das  $\text{CO}_2$ -Aufnahmevermögen des Ozeans sowie das der terrestrischen Biosphäre verbessert werden. Dabei sind insbesondere mögliche Rückkopplungen zu berücksichtigen, die einen großen Einfluß auf die allgemeine Erwärmung bzw. auch auf veränderte chemische Bedingungen in der Atmosphäre haben können.

Die unsichere Kenntnis der Kreisläufe atmosphärischer Spurengase beeinflusst auch die Festlegung der direkten und indirekten Treibhauspotentiale (GWP). Dieses GWP-Konzept kann nur einen groben Überblick über die relativen Anteile der verschiedenen Gase am anthropogenen Treibhauseffekt geben. Schwierigkeiten beruhen hauptsächlich auf der sich ständig ändernden chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre, die einerseits die direkte Strahlungswirksamkeit beeinflusst und andererseits durch die Veränderung der Abbauraten Einfluß auf die mittlere Verweilzeit einzelner Treibhausgase nimmt. Weiterhin spielt die horizontale und vertikale Verteilung (z. B. für  $\text{NO}_x$ , Ozon,  $\text{SO}_2$ ) eine wichtige Rolle, die bisher aber nicht immer berücksichtigt worden ist.

Der Zusammenhang zwischen den halogenierten Kohlenwasserstoffen (FCKW) und dem Ozonabbau in der Stratosphäre mit seinen möglicherweise katastrophalen Auswirkungen ist hinreichend aufgeklärt. Auch wenn die Emissionen aufgrund erster Reduktionsmaßnahmen bei der Produktion und beim Verbrauch zurückgegangen sind, ist ein unverzüglicher Ausstieg dringend geboten. Beide Verbindungen, Ozon und FCKW, beeinflussen zudem auch den Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Doch während bei den FCKW die Treibhauspotentiale verlässlich abgeschätzt werden können, gilt dies nur bedingt für das Ozon. Ozon wird in der Stratosphäre abgebaut, während es in der Troposphäre, insbesondere in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre durch photochemische Reaktionen zusätzlich produziert wird. Dies bedeutet eine nachhaltige Änderung des vertikalen Ozonprofils. Erste Abschätzungen dieser sich ändernden vertikalen Ozonverteilung verweisen für die mittleren Breiten der Nordhemisphäre auf eine Abkühlungstendenz. Diese wird für die bisher beobachtete, relativ gering ausfallende Erwärmung mitverantwortlich gemacht. Eine realistische, globale Einschätzung dieses zumindest breitenabhängigen Effektes kann jedoch nur durch ein globales Zirkulationsmodell mit Ozonchemie erfolgen, was derzeit noch nicht möglich ist.

Eine ähnliche, den anthropogenen Treibhauseffekt vorübergehend teilweise kompensierende Wirkung wird dem anthropogen bedingten Ausstoß von SO<sub>2</sub> zugeschrieben. Das dabei in der Atmosphäre gebildete Sulfat-Aerosol vergrößert den Anteil der gestreuten Strahlung in den untersten Atmosphärenschichten und führt, falls es in die Kondensationsprozesse einbezogen wird, auch zu einer Erhöhung der Wolkenalbedo. Jedoch handelt es sich auch hier um einen zumindest breitenabhängigen und auf die Nordhemisphäre beschränkten Effekt. Es wird vermutet, daß dieser ebenfalls dazu beiträgt, daß die durch die Treibhausgase induzierte Erwärmung in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre teilweise kompensiert wird.

Dieser SO<sub>2</sub> Effekt klingt jedoch bei einer Emissionsreduktion rasch (d. h. innerhalb weniger Wochen) ab, während z. B. für das CO<sub>2</sub> erst bei einer Reduktion der Emissionen um mindestens 60 % gerade eine gleichbleibende Konzentration in der Atmosphäre erreicht werden würde.

Bei der Diskussion anthropogener Quellen klimarelevanter Spurengase kommt dem Flugverkehr eine besondere Bedeutung zu. Der Flugverkehr stößt eine nicht unerhebliche Menge an klimarelevanten Gasen wie H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> aus und trägt damit zu einer signifikanten Erhöhung der ansonsten geringen Hintergrundkonzentrationen dieser Verbindungen in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre bei. Die besondere Qualität dieser Einträge besteht in der höheren Treibhauswirkung in diesen sehr kalten Luftschichten, der grundsätzlichen Erhöhung der mittleren Verweilzeiten, der Ausbildung von Kondensstreifen sowie der möglichen Veränderung des Ozonprofils in der unteren Stratosphäre und oberen Troposphäre. Die bisherigen Kenntnisse reichen jedoch noch nicht aus, um diese Effekte im einzelnen zu quantifizieren.

#### 4.1.2 Wirkung interner Klimaparameter und mögliche Rückkopplungsmechanismen

Der englische Ausdruck ‚Forcing‘, umschreibt den Anpassungsdruck im Klimasystem, der von einer Veränderung interner (z. B. durch ein verändertes Ozeanströmungsmuster) oder externer (z. B. durch anthropogene Treibhausgasemissionen) Klimaparameter ausgelöst wird. Das Klimasystem versucht, sich auf ein solches ‚Forcing‘ durch Umstellung interner Parameter einzustellen. Diese Teilantworten des Systems können einerseits die Wirkung der primären Störung unterstützen (positive Rückkopplung) oder andererseits dieser entgegenwirken (negative Rückkopplung). Die wichtigsten, internen Parameter sind:

##### – Wasserdampf

Es gilt als gesichert, daß der Wasserdampf als das wichtigste natürliche Treibhausgas die induzierte Erwärmung positiv unterstützt. Eine wärmere Atmosphäre kann mehr Wasserdampf aufnehmen, wodurch sich der Wasserdampfgehalt bis hinein in die obere Troposphäre erhöht (s. Kap. 2.1). Dort ist die positive Rückkopplung besonders groß. Durch den vermehrten Wasserdampf erhöht sich auch der Anteil der absorbierten Sonnenstrahlung in der Atmosphäre, besonders in der unteren Troposphäre.

Neben der Strahlungswirkung ist die durch den Anstieg des Wasserdampfgehaltes verstärkte Freisetzung von latenter Wärme (Niederschlagzunahme) in den mittleren und höheren Troposphärenschichten für die Intensität der atmosphärischen Zirkulation von ganz entscheidender Bedeutung.

##### – Eis/Schnee – Albedo

Ein weiterer, die globale Erwärmung verstärkender, Mechanismus ist die Eis/Schnee – Albedo Rückkopplung. Ein wärmer werdender Planet wird eine geringere Überdeckung mit Eis – und Schneeflächen aufweisen und damit weniger einfallende Sonnenstrahlung direkt wieder abgeben. Jedoch sind Veränderungen der Eisverhältnisse in den Polargebieten auch an andere meteorologische Randbedingungen, wie z. B. die Konstanz der kalten Polarwirbel oder auch an Veränderungen bei Bewölkung und Niederschlägen gebunden, so daß die Stärke dieser positiven Rückkopplung sowie die Geschwindigkeit der Reaktion noch unsicher ist.

##### – Wolken

Wolken stellen den zur Zeit größten Unsicherheitsfaktor für die Klimavorhersage dar. Die wesentlichen Zusammenhänge in der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Wolken sind bekannt. Die Tabelle 4.1 faßt die wichtigsten Veränderungen und deren Klimarelevanz zusammen. Jedoch sind die meist kleinräumigen Prozesse der Wolkenbildung sowie die komplexe Wechselwirkung zwischen Strahlung und

Tabelle 4.1

## Das Klimapotential verschiedener Bewölkungsänderungen

Änderung der Bewölkung	Einfluß auf das Klima
Zunahme der flächenhaften Ausdehnung (Bedeckungsgrad) tiefliegender Wolken (z. B. Stratus-Wolken)	Abkühlung
Zunahme des Bedeckungsgrades hoher Wolken (z. B. Zirren)	Erwärmung
Zunahme der Wolkenhöhe	Erwärmung
Zunahme des Flüssigwasseranteils in Stratuswolken	Abkühlung
Zunahme des Flüssigwassergehaltes in Zirren	Erwärmung
Zunahme des Verhältnisses von Wolkentropfen zu Eisparkiteln	— Abkühlung durch vergrößerte Rückstreuung — Erwärmung durch Zunahme der Fallgeschwindigkeit der Teilchen
Zunahme der Größe der Wolkentropfen bzw. Eisparkitel	Erwärmung

Tab. 4.1: Das Klimapotential verschiedener Bewölkungsänderungen

Bewölkung selbst noch nicht hinreichend genau auf die große Maschenweite eines Zirkulationsmodells übertragen, um verlässliche Vorhersagen für mögliche Wolkenrückkopplungseffekte treffen zu können.

#### – Änderung der ozeanischen Zirkulation

Der Salzgehalt bestimmt zusammen mit der Temperatur besonders in den mittleren und höheren Breiten den vertikalen Austausch zwischen ozeanischer Deckschicht und den tieferen Schichten der Ozeane. Der Salzgehalt kann sich in Folge von Änderungen im hydrologischen Zyklus (Verdunstung – Kondensation – Niederschlag – Abfluß) so stark ändern, daß die vertikalen Austauschprozesse und die geographischen Regionen, in denen diese stattfinden, sich ändern. Bei gleichzeitiger allgemeiner Erwärmung könnte sich eine Abschwächung dieser Austauschprozesse nicht nur direkt auf das CO<sub>2</sub>-Aufnahmevermögen des Ozeans auswirken, sondern könnte auch eine Umstellung der horizontalen Strömungsmuster zur Folge haben. Es bleibt jedoch festzuhalten, daß derartige Vorhersagen, die die regionalen Auswirkungen (z. B. für Westeuropa) zum Teil erheblich beeinflussen können, mit den heutigen Zirkulationsmodellen nicht zuverlässig prognostiziert werden können. Die Schwierigkeiten liegen hier in der Beschreibung der regionalen Änderungen der Niederschlags- und Abflußfelder, sowie allgemein in der noch unzureichenden räumlichen Auflösung der Modelle.

#### 4.1.3 Sensitivitätsabschätzung verschiedener Einflußfaktoren im Klimasystem

Eine Sensitivitätsabschätzung der wichtigsten klimarelevanten Parameter läßt sich anhand von Klimamodellen durchführen. Ausgehend von einer CO<sub>2</sub>-Ver-

dopplung (der angenommenen Initialstörung im Klimasystem), die die Wärmerückstrahlung aus der Troposphäre zur Erdoberfläche um etwa 4 W/m<sup>2</sup> erhöht, wird die Reaktion des Klimasystems an der Erhöhung der globalen bodennahen Lufttemperatur gemessen. Die Schwankungsbreite der Ergebnisse verschiedener Klimamodelle ist ein möglicher Maßstab für die bestehende Unsicherheit in der Vorhersage.

Die Schwankungsbreite liegt für diese Rechenimulation einer CO<sub>2</sub>-Verdopplung zwischen 1,5 und 4,5 Grad Celsius. Ohne jegliche Rückkopplungen im Klimasystem geben die Modelle übereinstimmend im Fall der CO<sub>2</sub>-Verdopplung eine Temperaturerhöhung um 1,2 Grad Celsius an. Die Übereinstimmung bei Abwesenheit von Wolken ist mit einer Temperaturerhöhung um ca. 2 Grad Celsius ebenfalls recht gut. Die Wasserdampfdruckkopplung hat wesentlichen Anteil an der Erhöhung der Sensitivität bei Abwesenheit von Wolken von 1,2 auf 2,0 Grad Celsius.

Für die Größe der Schwankungsbreite zwischen 1,5 und 4,5 Grad Celsius ist aber hauptsächlich die unterschiedliche Behandlung der Bewölkung in diesen Modellen verantwortlich. Es wird allgemein angenommen, daß der Wolkeneffekt mengenmäßig wohl kleiner ausfällt als die obige Schwankungsbreite erwarten läßt, wobei das Vorzeichen (positive oder negative Rückkopplung) noch unsicher ist. Innerhalb der Schwankungsbreite von 1,5 bis 4,5 Grad Celsius gibt das IPCC den wahrscheinlichsten Wert mit 2,5 Grad Celsius an.

Auch die Auswertungen paläoklimatischer Daten (Temperatur und Konzentrationen verschiedener Treibhausgase für die vergangenen 160 000 Jahre) erlauben eine Abschätzung der Sensitivität der globalen Mitteltemperatur auf eine CO<sub>2</sub>-Verdopplung. Bemerkenswerterweise liegen deren Abschätzungen

zwischen 2 und 4 Grad Celsius und damit innerhalb der durch die Schwankungsbreite der Modelle abgeschätzten Unsicherheitsmarge. Entscheidender aber ist, daß die Auswertung paläoklimatischer Daten eine Temperaturerhöhung im Falle einer CO<sub>2</sub>-Verdoppelung um mindestens 2 Grad Celsius ergibt, da sonst Klimaschwankungen in der Vergangenheit nicht zu erklären sind.

#### 4.1.4 Globale Klimaentwicklung

Das wichtigste anthropogene Treibhausgas, das Kohlendioxid, zeichnet sich durch eine lange Verweilzeit in der Atmosphäre, durch eine bereits jetzt sehr hohe Konzentration sowie eine weiterhin hohe Zuwachsrate aus. Durch die Eingriffe des Menschen erfährt das Klimasystem zum ersten Mal eine Erhöhung der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre, ohne daß andere Klimaparameter diese Umstellung mitbegleiten oder auslösen (z. B. durch Umstellung der Ozeanzirkulation). Damit wird das „träge“ Klimasystem zur Reaktion gezwungen, wobei es in der Vergangenheit bewiesen hat, daß eine Umstellung sehr drastisch innerhalb von 100 Jahren erfolgen kann, falls das Signal zur Umstellung im System „verankert“ ist. Die Richtung der damit vom Menschen in Gang gesetzten Verschiebung aus dem Klimagleichgewicht wird heute wissenschaftlich nicht mehr bestritten: Je mehr treibhauswirksame Spurengase in die Atmosphäre gelangen, desto wärmer muß es auf der Erde werden. Diskutiert wird lediglich noch, wann signifikante Klimaänderungen sich von der natürlichen Variabilität des momentanen Klimazustandes abheben werden und wie die regionale Verteilung derselben sein wird.

Die Dominanz des anthropogenen Treibhauseffektes für unser Klima in den nächsten 100 bis 200 Jahren wird durch die folgende Abschätzung verdeutlicht werden. In dieser Abschätzung werden die Klimapotentiale der wichtigsten, externen Klimaparameter (für eine Zeithorizont von 100 bis 200 Jahren) miteinander verglichen. Der Maßstab zur Einschätzung des Klimopotentials ist die Veränderung der Energiebilanz der Erde, die auch als ‚Radiative Forcing‘ bezeichnet wird. Die folgenden vier externen Einflußfaktoren werden untersucht:

- anthropogenes Treibhausgas ‚Forcing‘ (= Wirkung des anthropogenen Treibhauseffekts)
- Änderung der Einstrahlungsverhältnisse aufgrund von periodischen Änderungen der Sonnenaktivität
- Vulkaneruptionen (Annahme: ein großer Ausbruch innerhalb eines Jahrzehnts)
- Änderung anthropogen bedingter Sulfat-Aerosol-Konzentration in der Atmosphäre.

Das anthropogene Treibhausgas – ‚Forcing‘ ist für die vier IPCC Emissionsszenarien A, B, C und D berechnet worden. Diese repräsentieren die durch (weitestgehend) politische Entscheidungen verursachte Spannweite des anthropogenen Treibhausgas – ‚Forcing‘. Das IPCC Szenario A gilt für den Fall des Ausbleibens jeglicher Reduktionsmaßnahmen für die Treibhaus-

gasemissionen (mit Ausnahme für die FCKW, hier wird das Montrealer Protokoll zu Grunde gelegt). Die Szenarien B, C und D setzen (wenn auch unterschiedliche) Reduktionsmaßnahmen voraus (siehe auch Kap. 3.2).

Die Abb. 4.1 zeigt das ‚Radiative Forcing‘ der oben aufgeführten, vier unterschiedlichen Einflußfaktoren für den Zeitraum 1990 bis 2000 (a) sowie 2000 bis 2050 (b). Das anthropogene Treibhausgas-‚Forcing‘ liegt für den Zeitraum 1990 bis 2000 zwischen 0,4 (Szenario D) und 0,6 W/m<sup>2</sup> (Szenario A). Betrachtet man dagegen einen längeren Zeitraum, hier 2000 bis 2050, so steigt die Einflußnahme auf 1,3 (Szenario D) bis 3,5 W/m<sup>2</sup> (Szenario A).

Die übrigen drei externen Einflußfaktoren sind innerhalb des kürzeren Zeitraums in der Lage, den anthropogenen Treibhauseffekt regional zumindest teilweise zu kompensieren. Auf längere Sicht jedoch wird der anthropogene Treibhauseffekt, der sich durch weiter ansteigende atmosphärische Konzentrationen, die globale Verteilung sowie durch permanent in eine Richtung wirkendes ‚Radiative Forcing‘ auszeichnet, überwiegen.

#### 4.1.5 Regionale Klimaänderungen und Auswirkungen

Regionale Klimaänderungen können durch mittlere Trends und/oder durch veränderte Statistik bzgl. Häufigkeit und Betrag von Schwankungen von Klimaparametern beschrieben werden. Mit Hilfe einer zuverlässigen Prognose regionaler Klimaänderungen lassen sich dann deren Auswirkungen auf die Umwelt bzw. auf die Lebensbedingungen für Flora, Fauna und den Menschen abschätzen. Wichtige Klimaparameter für eine Prognose sind – neben der bodennahen Lufttemperatur – der Niederschlag, die Bodenfeuchte, die Häufigkeit und Stärke von Wetterextrema sowie für die Küstenregionen der Meeresspiegelanstieg. Bis heute ist es jedoch nicht möglich, mit der erforderlichen Präzision regionale Klimaänderungen vorherzusagen.

Gekoppelte Ozean-Atmosphären-Zirkulationsmodelle sagen in guter Übereinstimmung bei einem CO<sub>2</sub>-Anstieg von ca. 10 % pro Jahrzehnt (er enthält die Wirkung der übrigen anthropogenen Treibhausgase) einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur von 0,3 Grad Celsius pro Jahrzehnt voraus (Unsicherheitsbreite 0,2 bis 0,5 Grad Celsius). Der zugehörige Meeresspiegelanstieg wird im Mittel auf 6 cm pro Jahrzehnt (Unsicherheitsbreite 3 bis 10 cm) geschätzt. Die zu erwartende Erwärmung ist generell über den Landflächen stärker als über den Ozeanen. Zudem zeigen alle Modelle mit zunehmender Temperatur auch eine Zunahme des Niederschlages. Dabei wird der Niederschlag in den höheren Breiten am stärksten zunehmen, während er in den mittleren Breiten im Sommer abnehmen und im Winter zunehmen wird. Für die Tropen sind die Niederschlagsprognosen widersprüchlich. Es sind starke regionale Unterschiede zu erwarten, die in den verschiedenen Modellen zum Teil recht unterschiedlich ausfallen.

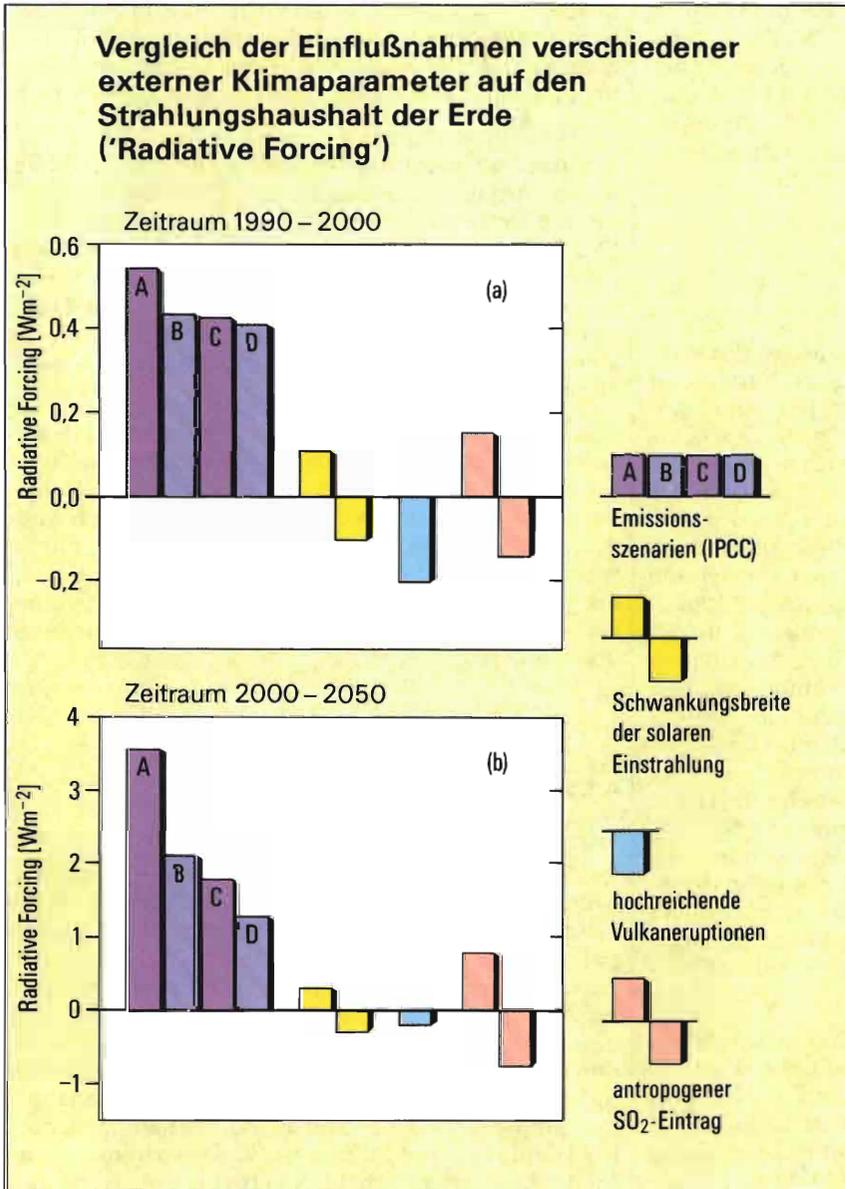


Abb. 4.1:  
Vergleich der Einflüsse verschiedener externer Klimaparameter auf den Strahlungshaushalt der Erde ('Radiative Forcing') innerhalb eines 10jährigen (a) bzw. 50jährigen (b) Zeitraums.

Der zeitliche Verlauf der IPCC Emissionsszenarien A bis D ( $\text{CO}_2$ -Äquivalent) wird in Abb. 3.2 dargestellt.

Quelle (IPCC, WGI, 1990)

Trotz dieser noch unbefriedigenden Qualität der Vorhersage regionaler Klimaänderungen sind erste Untersuchungen zur Sensitivität verschiedener Umweltsysteme auf mögliche Klimaänderungen bereits durchgeführt worden (s. Kap. 3). Diese Sensitivitätsanalysen verbessern das Verständnis der sehr komplexen Wechselwirkungen zwischen Klima und Umwelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen machen bereits jetzt deutlich, daß eine positive Erwartungshaltung bzgl. der Auswirkungen von Klimaänderungen (auch in bezug auf die Landwirtschaft) nicht geboten erscheint.

#### 4.2 Forschungsbedarf

Es bestehen noch einige Wissenslücken, die zur Zeit eine zuverlässige Aussage über die zukünftige Ent-

wicklung des Klimas mit allen regionalen Auswirkungen nicht in dem gewünschten Umfang und entsprechender Genauigkeit zulassen. Diese Lücken spiegeln sich wider in

- Unsicherheiten bzgl. der natürlichen Variabilität der Klimaparameter,
- Unsicherheiten bei der Einschätzung der Sensitivität interner Klimaparameter auf das externe, anthropogene Treibhausgas – ‚Forcing‘ (Stichwort: Wolken),
- Unsicherheiten bei der Einschätzung des zeitlichen Verlaufs der Klimaumstellung, sowie
- Unsicherheiten bei der Vorhersage regionaler Klimaänderungen und damit auch bei der Abschätzung von möglichen Folgen.

Die erforderlichen Forschungsaktivitäten sollten sich auf folgende besonders kritische Gebiete konzentrieren:

- Kreisläufe klimarelevanter Spurengase
- Einfluß der Wolken auf den Strahlungshaushalt
- hydrologischer Zyklus
- Transportprozesse in den Ozeanen sowie deren Wärmespeicherkapazität
- klimarelevante Prozesse in den Ökosystemen

Eine Verbesserung des derzeitigen Kenntnisstandes erfordert einen interdisziplinären Forschungsansatz, in dem die verschiedenen relevanten physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse berücksichtigt werden.

Interdisziplinärer Forschungsbedarf besteht zum Beispiel auf den folgenden Gebieten:

- Auswirkungen der Klimaänderung sowie der veränderten chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre auf die Böden (Stichworte: Austausch mit der Atmosphäre, Bodenfeuchte, Bodenfruchtbarkeit)
- Ökosystemforschung (Stichworte: Schwierigkeiten bei der Anpassung, Anpassungsgeschwindigkeit, Wanderung, Zusammenbrechen)
- Anpassungsfähigkeit der Landwirtschaft (Stichworte: Anbau angepaßter Pflanzen, Entwicklung angepaßter Bewirtschaftung, sozio-ökonomische Folgen veränderter Produktion, Nahrungsmittelsicherheit, Verschiebung auf den internationalen Märkten)

#### 4.2.1 Beobachtung („Monitoring“) und Modellierung

Der Aufbau eines globalen Meßnetzes für die Atmosphären-, Land- und Ozeanbeobachtung, mit dem die natürlichen Variabilitäten von Klimaparametern, deren Veränderungen und mittleren Trends erfaßt werden können, ist erforderlich. Die Anforderungen an die Qualität der Meßergebnisse und die Ausstattung der Stationen sind hoch:

- von der Problemstellung abhängige, hinreichend hohe – zeitlich wie räumlich – Datenerfassungsraten
- zuverlässige Eichung der Instrumente
- hinreichend lange Meßphase.

Beispiele für wichtige Meßgrößen:

- luftchemische Parameter wie z. B. Luftanteile an CO<sub>2</sub>, OH, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, FCKW und Substitute, CO, NO<sub>x</sub>, VOC
- Temperatur- und Feuchteverhältnisse in der Troposphäre, Wind, Niederschlag, Strahlungshaushalt des Gesamtsystems
- Landnutzung, jahreszeitliches Verhalten verschiedener Vegetationsklassen, Biomasse
- Ozeanoberflächentemperatur, Austausch zwischen Deckschicht und Tiefenwasser, Chlorophyll – Konzentration

- Ausdehnung und Dicke des Meer-Eises, Massenhaushalt der Eisschilde der Antarktis und Grönlands.

Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb des Meßnetzes ist die unmittelbare wissenschaftliche Auswertung der erzielten Daten, die in der Vergangenheit oftmals vernachlässigt worden ist. Sie beansprucht einerseits ein hohes Maß an Rechen – und Speicherkapazität und andererseits hochqualifiziertes Personal.

Für eine zuverlässige Vorhersage ist eine Verbesserung der Klimamodellierung notwendig. Die Leistungsfähigkeit der Klimamodelle wird u. a. durch die immer noch unzureichende Computerkapazität beschränkt, die zum einen die räumliche Auflösung, die Länge der zeitlichen Integrationschritte sowie den gesamten Integrationszeitraum begrenzt und zum anderen wesentliche Prozesse, wie z. B. die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den Ozeanen und der Atmosphäre, nur ungenügend berücksichtigt läßt. In einer umfassenden Klimasimulation müssen zudem die Wechselwirkungen mit der Biosphäre sowie die Kreisläufe der wichtigsten atmosphärischen Spurengase integriert sein.

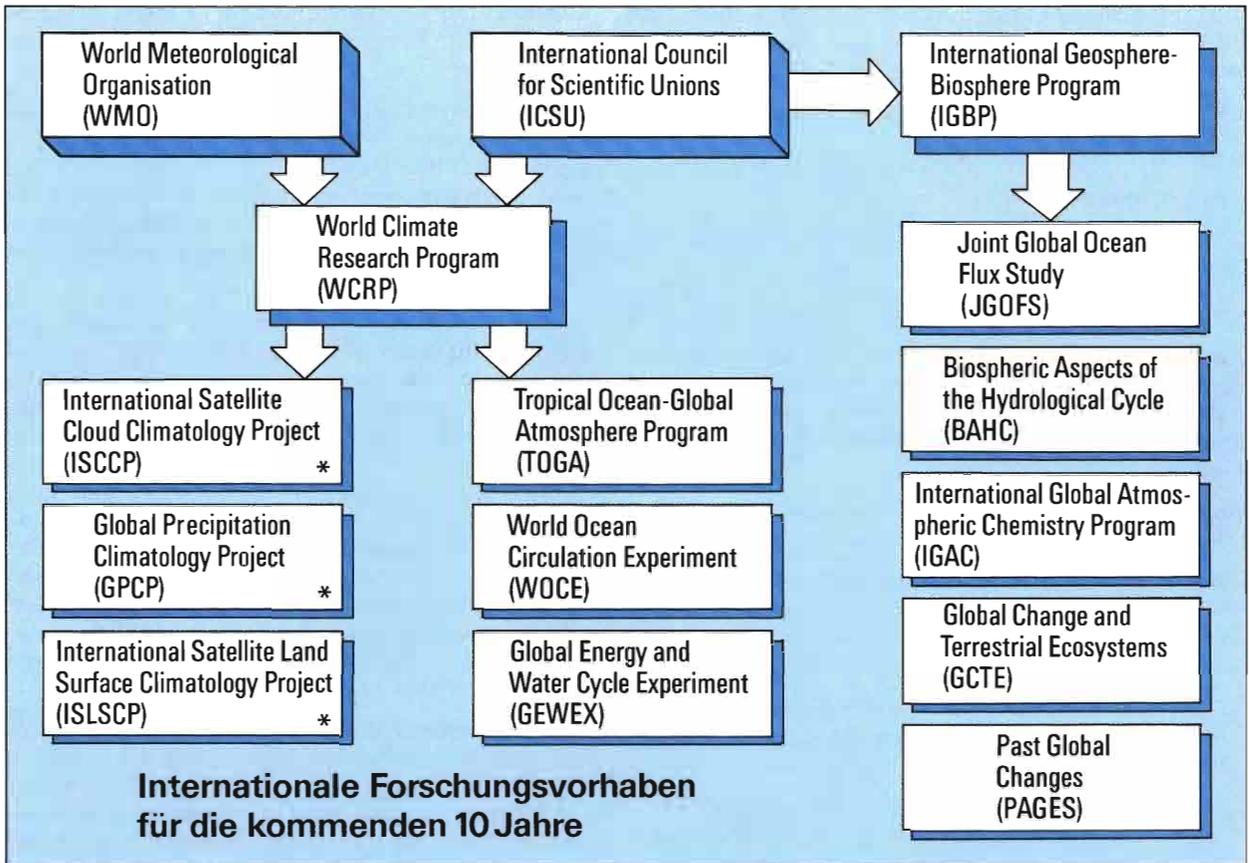
Die Qualität einer Klimaprognose hängt jedoch nicht allein von der Leistungsfähigkeit der Rechner ab. Mindestens genauso entscheidend ist die Qualität der Parametrisierung physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse in den Modellen. Es erscheint dringend erforderlich, die Forschungsaktivitäten gerade auf diesem Gebiet zu verstärken. Dabei gilt es zuerst, in Form von Prozeßstudien, mit Hilfe von Messungen und Modellrechnungen einzelne physikalische (chemische oder biologische) Vorgänge verstehen zu lernen, um sie dann anschließend in den globalen Zirkulationsmodellen berücksichtigen zu können.

Alle Modelle bedürfen der Überprüfung (Validation) ihrer Ergebnisse. Eine Überprüfung kann nur mittels eines Vergleichs mit geeigneten Beobachtungsdaten durchgeführt werden, wobei eine hervorragende Qualität der Meßdaten Voraussetzung ist. Eine Übereinstimmung zwischen Messung und Modellergebnis ist nicht in jedem Fall Garantie dafür, daß die beteiligten physikalischen Prozesse hinreichend genau im Modell simuliert werden. Deshalb ist es notwendig, neben diesen Vergleichen von absoluten Zahlenwerten, Sensitivitätsvergleiche durchzuführen.

#### 4.2.2 Überblick über die internationalen Forschungsaktivitäten

Die vor uns stehenden Aufgaben können nur in einem internationalen Rahmen durchgeführt werden. Dies setzt auf der einen Seite einen beträchtlichen Einsatz an finanziellen Mitteln und personeller Ausstattung sowie auf der anderen Seite hohe Kooperationsbereitschaft, verbunden mit regem Austausch von Wissen und Daten voraus.

Im folgenden sollen die bereits bestehenden bzw. für die nähere Zukunft geplanten Projekte kurz aufgeführt werden. Die Staatengemeinschaft ist aufgefordert, diese Projekte tatkräftig zu unterstützen bzw.



\* Kleinere Teilprogramme des WCRP

Tab. 4.2: Internationale Forschungsvorhaben für die kommenden 10 Jahre.

deren Durchführung erst zu ermöglichen, um so dazu beizutragen, die noch bestehenden Unsicherheiten in der Klimadiskussion entscheidend zu verringern. Das Gelingen dieses internationalen und interdisziplinären Forschungsansatzes setzt ein hohes Maß an Koordination voraus. Dabei sollten nationale Forschungsaktivitäten in diese ‚Global Change‘-Forschung mit einbezogen werden.

Die Tabelle 4.2 listet die wichtigsten internationalen Forschungsprogramme für die kommenden 10 Jahre auf.

### 4.3 Fazit

Trotz der oben aufgeführten Unsicherheiten bei der Einschätzung der Klimaveränderung und dem sich daraus ergebenden Forschungsbedarf sind die Kernaussagen wissenschaftlich unbestritten. Beobachtete Trends von Klimaparametern stimmen mit Klimamodellaussagen überein.

Der Anstieg der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen aufgrund der vielfältigen Aktivitäten des Menschen setzt sich weiter fort. Eine rasche globale Erwärmung der Erdoberfläche und eine Umverteilung der Niederschläge ist damit vorprogrammiert. Bereits heute ist sehr wahrscheinlich, daß eine Verdopplung der äquivalenten  $\text{CO}_2$ -Konzentration gegenüber dem vorindustriellen Wert in der ersten

Hälfte des kommenden Jahrhunderts erreicht wird. Der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur wird sich damit in den kommenden Jahrzehnten beschleunigen. Die Vermeidung eines darüber hinausgehenden Anstiegs der äquivalenten  $\text{CO}_2$ -Konzentration ist noch durch politische Entscheidungen möglich, d. h. Klimaänderungen können verlangsamt und ihre Wirkungen wesentlich abgeschwächt werden.

Es ist sehr schwierig, die möglichen regionalen Auswirkungen einer Klimaänderung abzuschätzen, weil weder Analogien aus der Klimageschichte existieren, noch die Modellrechnungen eine ausreichende Güte erreicht haben. In Anbetracht der großen Komplexität des Klimasystems bleibt stets ein großes Risiko, da bei streng nichtlinearen Kopplungen regionale wie globale Überraschungen sicher sind. Das Ozonloch ist ein Beispiel, eine im Sommer meereisfreie Arktis wäre ein anderes.

Einige wesentliche Punkte in diesem Zusammenhang seien hier kurz genannt:

- Die Geschwindigkeit einer Klimaänderung erscheint wesentlich wichtiger als bisher angenommen, da sie den Anpassungsdruck bestimmt.
- Die häufige Beschränkung der Diskussion auf mögliche Veränderungen der Mittelwerte ist nicht gerechtfertigt, da die damit verbundenen neuen Wetterextrema und ihre unmittelbaren Folgen, wie

z. B. größere Dürren oder höheres Hochwasser oder beides, viel nachhaltigere Auswirkungen haben dürften.

- Die Klimaänderungstendenzen können während der Übergangszeit zu einem neuen angepaßter Zustand regional sehr unterschiedlich ausfallen und sich auch an einem Ort noch zeitlich ändern oder gar umkehren.
- Das Anpassungsvermögen von Ökosystemen ist von sich aus begrenzt.
- Die Anpassung von Ökosystemen ist aber auch oft durch natürliche Grenzen (z. B. Land/Meer Verteilung oder durch Landnutzung) beschränkt.
- Bei einer polwärtigen Verschiebung von Vegetations – und Landwirtschaftszonen erhalten diese grundsätzlich weniger Sonnenstrahlung.
- Das Anpassungsvermögen der Böden dürfte hinter dem der Vegetation zurückbleiben.
- Die kombinierte Wirkung lokaler, regionaler und globaler Veränderungen steigert die Umweltempfindlichkeit. Als Beispiel seien Hangrutschungen in Gebirgen bei Eingriffen in den Schutzwald, seine Schwächung durch Waldschäden und erhöhte Maximalniederschläge nach sommerlichen Hitzelagen genannt.

Der wissenschaftliche Kenntnisstand über die von Menschen verursachte Klimaänderung muß sicherlich durch verstärkte Forschungsanstrengungen verbessert werden. Jedoch erscheint eine Änderung des Klimas mit allen damit verbundenen, häufig nicht kalkulierbaren Folgen, unvermeidlich.

Die politischen Entscheidungsträger sind aufgefordert, Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Die schon jetzt bestehenden, sehr schwierigen sozio-ökonomischen Randbedingungen, die sich mit Sicherheit weiter verschärfen werden, unterstreichen die Dringlichkeit des Handelns. Der Aufruf zum sofortigen Handeln dokumentiert die Sorge, daß jede Verzögerung das Risiko erhöht, den Auswirkungen der Klimaänderung nicht mehr annähernd adäquat begegnen zu können.

#### 4.4 Interdisziplinäre Forschung

Im Angesicht der drohenden Klimakatastrophe wird sowohl von Naturwissenschaftlern als auch von Geistes- und Gesellschaftswissenschaftlern immer wieder die Forderung nach der Intensivierung der interdisziplinären Forschung erhoben, da wegen der Globalität und Komplexität der Problematik Aussagen – gewonnen auf der Basis nur einzelner Fachgebiete – zu relativieren sind. Innerhalb der naturwissenschaftlichen Disziplinen und auch innerhalb der Geistes- und Gesellschaftswissenschaften hat sich schon ein intensiver, fruchtbarer Diskurs angebahnt; zwischen den beiden Forschungsbereichen hingegen sind die Kontakte nur schwach ausgeprägt. Gerade aber diese Art interdisziplinärer Forschung würde es den Wissenschaftlern erleichtern, den Politikern geschlossene Konzepte zum Klimaschutz vorzulegen, da die Interdependenzen der naturwissenschaftlich untersuchten Klimavorgänge und der sozioökonomisch analysierten Wirkungen der Klimaänderungen bzw. der Auswirkungen politischer Maßnahmen transparenter werden.

Bei der Analyse der drohenden Klimaänderungen haben die Naturwissenschaften einen Erkenntnisvorsprung, da erst in den letzten Jahren die vorhandenen – für andere Anwendungen konzipierten – sozioökonomischen Modelle auf die Erfordernisse der Analyse von Klimaveränderungen angepaßt wurden. Weitere Untersuchungen und neue Ansätze sind nicht nur notwendig, um die sozioökonomischen Auswirkungen einer Klimaänderung besser zu verstehen, sondern auch, um die Wirkungen der getroffenen Gegenmaßnahmen besser beurteilen zu können. Die neuen sozioökonomischen Ansätze sollten von Anfang an interdisziplinär ausgelegt sein, um möglichst schnell Ergebnisse zu erhalten, die den globalen und komplexen Zusammenhängen gerecht werden, und um die immer dringlicheren Forderungen von Naturwissenschaftlern und Politikern nach Leitlinien für ein baldiges und effizientes Handeln zu erfüllen (1) (2).

#### Literatur

- (1) IEA, Anhörung 28./29. Januar 1992; Schriftliche Stellungnahmen I, 24f
- (2) OECD, Anhörung 28./29. Januar 1992; Schriftliche Stellungnahmen II, 7+18+20-22

## 5 Klimapolitik

### 5.1 Internationale Vereinbarungen und Umsetzungsstrategien

Auf internationaler Ebene gibt es einige Vereinbarungen, die das Ziel unterstützen, dem Treibhauseffekt entgegenzuwirken und den Ozonabbau in der Stratosphäre zu stoppen.

#### 5.1.1 Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht

Nach langjährigen Vorarbeiten unterzeichneten am 22. März 1985 einundzwanzig Staaten, darunter die Bundesrepublik Deutschland und sechs weitere Mitgliedstaaten der EG in Wien das „Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht“. Der Entwurf dafür wurde von einer Expertengruppe des Umweltprogramms der Vereinten Nationen ausgearbeitet.

Nachdem die notwendige Anzahl von 20 Staaten das Abkommen bis zum August 1988 auch ratifiziert hatte, ist das Übereinkommen seit diesem Zeitpunkt für die Signatarstaaten in Kraft. In der Bundesrepublik Deutschland hat das Abkommen mit Wirkung vom 1. Januar 1989 Geltung.

Die Vertragsparteien verpflichten sich darin, alle angemessenen Maßnahmen zu treffen, um die menschliche Gesundheit und die Umwelt vor schädlichen Auswirkungen einer von Menschen verursachten Veränderung der Ozonschicht zu schützen und klimatische Auswirkungen zu verhindern.

Bei der Wiener Konvention handelt es sich um eine Rahmenkonvention, die keine konkreten Schutzmaßnahmen enthält. Diese bleiben der Vereinbarung in Folge-Protokollen vorbehalten.

#### 5.1.2 Das Montrealer Protokoll über ozonschichtschädigende Stoffe

Am 22. September 1987 unterzeichneten 24 Staaten sowie die EG das Montrealer Protokoll als erste Folgevereinbarung zur Wiener Konvention.

Nachdem 11 Parteien, die zusammen mindestens  $\frac{2}{3}$  des Weltverbrauchs der im Protokoll geregelten Stoffe repräsentieren, die Vereinbarung ratifiziert haben, ist sie am 1. Januar 1989 in Kraft getreten. Das Montrealer Protokoll sieht Reduzierungspläne für acht ozongefährdende Stoffe vor, die in zwei Gruppen eingeteilt sind und für die unterschiedliche Bestimmungen gelten. Gruppe 1 enthält die vollhalogenierten FCKW 11, 12, 113, 114, 115; Gruppe 2 umfaßt die Halone 1211, 1301 und 2402.

Die Regelungen beziehen sich auf Produktion und den inländischen Verbrauch unter Berücksichtigung der

Exporte und der Importe. Der Reduzierungsplan für die FCKW der ersten Gruppe sieht vor, Produktion und Verbrauch im Zeitraum vom Juli 1989 bis zum Juni 1993 auf dem Stand des Jahres 1986 einzufrieren.

Danach sollen in Zwischenschritten Produktion und Verbrauch bis zum Jahr 1999 so reduziert werden, daß nur noch 50 % des Standes von 1986 erreicht werden.

Die Regelung für die Halone (Gruppe 2) sieht lediglich vor, Produktion und Verbrauch 1992 auf das Niveau des Jahres 1986 zu reduzieren und dieses Niveau in den Folgejahren beizubehalten. Weiterhin verpflichten sich die Parteien, den Entwicklungsländern den Zugang zu umweltverträglichen Ersatzstoffen und den dazu notwendigen Technologien zu erleichtern und sie bei dem möglichst raschen Einsatz dieser Substitute zu unterstützen.

Das Montrealer Protokoll rief an zahlreichen Punkten Kritik hervor. Viele ozonschädliche Substanzen wurden nicht erfaßt, ihr Export ausdrücklich nicht berücksichtigt und für Entwicklungsländer wurden sehr weitgehende Ausnahmen vorgesehen.

Eine abschließende Regelung stellt das Montrealer Protokoll allerdings nicht dar. Es ist vielmehr bewußt offen für Veränderungen, die sich aufgrund weiterer Beobachtungen der Ozonerstörung sowie der Entwicklung von Ersatzstoffen und den zu deren Produktion notwendigen Technologien ergeben.

Die institutionalisierten jährlichen Vertragsstaatenkonferenzen bieten den Rahmen für Revisionen, um die Konvention an die aktuelle Entwicklung anzupassen.

#### 5.1.3 Verschärfung des Montrealer Protokolls

Im Juni 1990 wurde auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London das Montrealer Protokoll wesentlich verschärft.

Produktion und Verbrauch folgender ozonschichtschädigender Substanzen sind nach dem Zeitplan, der der Abb. 5.1 zu entnehmen ist, zu reduzieren.

Entwicklungsländer können die Reduzierungsstufen um 10 Jahre nach hinten verschieben.

Gegenüber Nicht-Vertragsparteien gilt ein Ein- und Ausfuhrverbot für diese Stoffe. Weiterhin räumen die Londoner Vereinbarungen den Entwicklungsländern erstmals einen Anspruch gegen die Industrieländer auf raschen Transfer von umweltgerechten Ersatzstoffen und -technologien ein.

Damit einher geht ein Anspruch der Entwicklungsländer auf Finanzhilfe aus einem neu errichteten, von den

# Verschärfung des Montrealer Protokolls

Substanz

Reduktionszeitplan

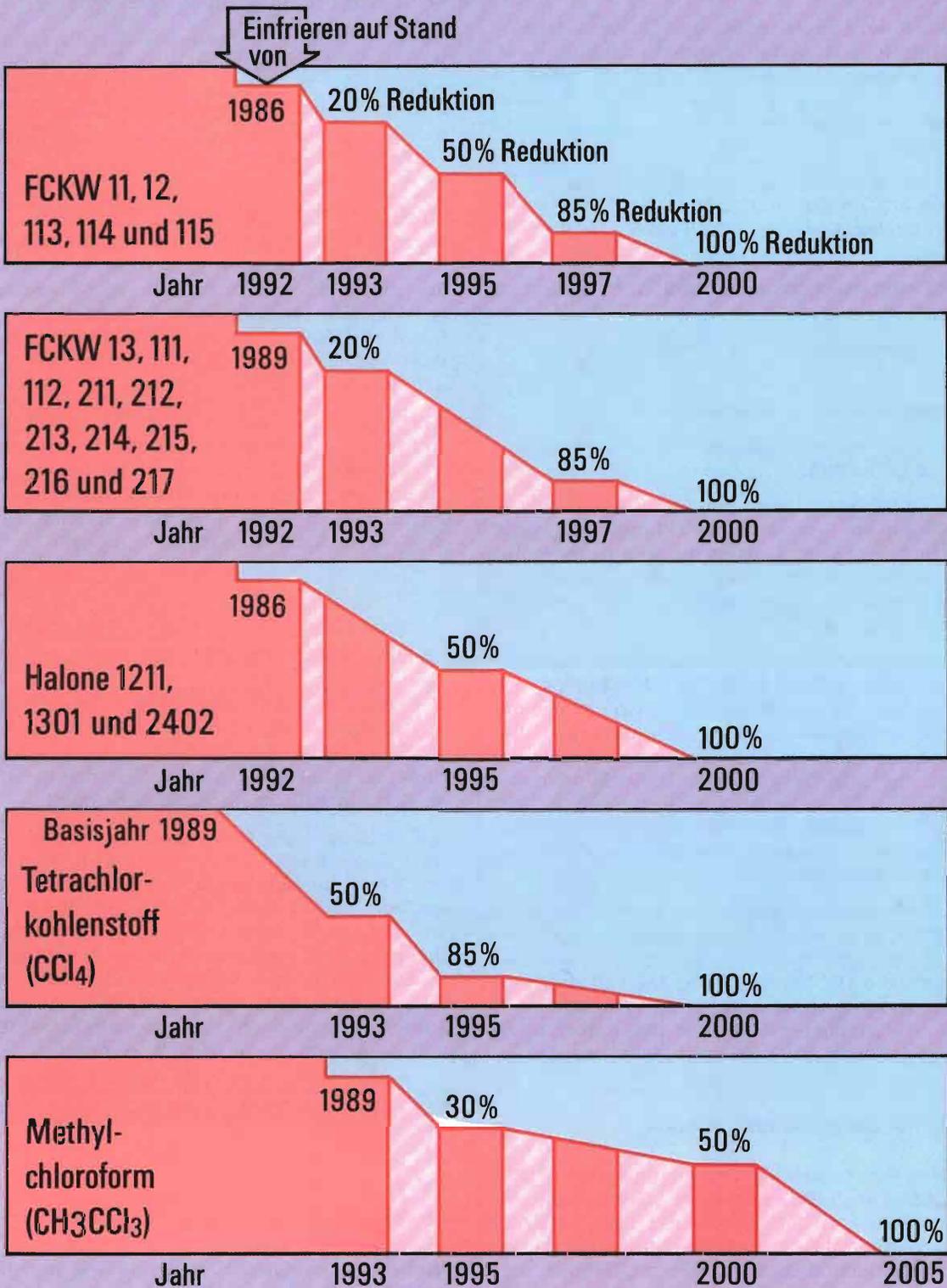


Abb. 5.1: Verschärfung des Montrealer Protokolls entsprechend dem Beschluß der 2. Vertragsstaatenkonferenz vom 27. bis 29. Juni 1990 in London

Industrieländern gespeisten Fonds, dem sogenannten Multilateral-Fund. Das Volumen des Fonds, für dessen Auffüllung zunächst ein Zeitraum von 3 Jahren vorgesehen wurde, soll 160 Millionen US-\$ betragen.

Mit Beitritt der Länder Indien und China zum Montrealer Protokoll greifen Sonderregelungen ein. Danach soll sich der Fonds um jeweils 40 Millionen US-\$ erhöhen, so daß dann insgesamt 240 Millionen US-\$ zur Verfügung stehen. China hat den Beitritt 1991 erklärt.

Der Fonds untersteht der Entscheidungsmacht der Vertragsparteien. Zur Durchsetzung der Vorgaben ist ein Exekutivkomitee eingesetzt worden, das die Aufgabe hat,

- eine Finanzierungsregelung und eine Satzung zu erstellen,
- die Fondsverwaltung zu überwachen und zu steuern,
- die Ausgaben zu überwachen sowie
- alle Projekte mit mehr als 250 000 US-\$ Gesamtvolumen zu genehmigen.

Das Exekutivkomitee wird paritätisch besetzt mit je sieben Mitgliedern aus den Entwicklungsländern und den Industriestaaten. Die Finanzierung des Fonds erfolgt entsprechend dem UN-Beitragsschlüssel. Demnach entfällt auf die Bundesrepublik Deutschland eine Quote von 9,2%.

Bei den Veränderungen, die die Londoner Vertragsstaatenkonferenz beschlossen hat, handelt es sich zwar um die weltweit erste Vereinbarung, mit der konkrete und umfassende Ausstiegsszenarien über einen überschaubaren Zeitraum hinweg festgesetzt worden sind; gleichwohl haben diese Regelungen derzeit noch keine internationale Rechtsverbindlichkeit, da sie bislang erst von 17 Staaten und der Europäischen Gemeinschaft ratifiziert worden sind (Stand: 25. März 1992).

Damit die Revision des Montrealer Protokolls in Kraft treten kann, ist jedoch die Ratifizierung durch mindestens 20 Staaten erforderlich. Es ist zu hoffen, daß spätestens die UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro den Impuls vermittelt, daß weitere Staaten die Londoner Vereinbarungen ratifizieren und diese damit rechtsverbindlich werden.

### 5.1.4 Genfer Luftreinhaltekonvention

Unter den internationalen Vereinbarungen zum Klimaschutz ist auch die sogenannte „Genfer Luftreinhaltekonvention“ (Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung) von 1979 zu beachten. Diese wurde im Rahmen der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (ECE) verhandelt und im November 1979 unterzeichnet.

Die Konvention verpflichtet die Vertragsparteien zur Eindämmung und schrittweisen Verringerung sowie zur Verhinderung von Luftverunreinigung. Dieses Vertragsziel soll durch Überwachung der Luftverun-

reinigungen, Informationsaustausch und Aufnahme von Forschungsarbeiten erreicht werden.

Wie die Wiener Konvention ist auch die Genfer Luftreinhaltekonvention ein Rahmenabkommen, das als Grundlage für folgende Protokolle dient:

- Das sogenannte Sofia-Protokoll behandelt die Bekämpfung von Stickoxiden bzw. ihrer grenzüberschreitenden Auswirkungen. Es enthält die völkerrechtliche Verpflichtung, bis 1994 die jährlichen nationalen Stickoxidemissionen auf den Stand von 1987 einzufrieren.
- Das Helsinki-Protokoll befaßt sich mit der Verringerung von Schwefelemissionen bzw. ihren grenzüberschreitenden Auswirkungen. Es begründet für 12 vertragschließende Staaten die Verpflichtung, die jährlich anfallenden Schwefelemissionen spätestens bis 1993 um mindestens 30 % gegenüber dem Stand von 1980 zu reduzieren. Die Bundesrepublik Deutschland hat beide Abkommen am 9. Juli 1985 unterzeichnet.
- 1991 wurde in Genf ein weiteres Protokoll zum Abbau der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) unterzeichnet. Die in der ECE zusammengeschlossenen Staaten verpflichten sich damit, die VOC bis 1999 im Vergleich zu den Werten von 1988 um 30 % zu reduzieren.

### 5.1.5 Europäische Energiecharta

Am 16./17. Dezember 1991 unterzeichneten in Den Haag 46 Staaten, darunter die Länder Westeuropas, die USA, Kanada, Japan, Australien sowie Staaten Mittel- und Osteuropas und der GUS den gemeinsamen Text einer Europäischen Energiecharta.

Die Charta soll eine feste Grundlage für eine verstärkte Zusammenarbeit der beteiligten Staaten auf dem Gebiet der Energiewirtschaft, der Gewinnung, Verteilung und Nutzung von Energie, für Informations- und Technologietransfer, sowie für rationellen, sparsamen und vorausschauenden Energieeinsatz sein. Sie besitzt keine Rechtsverbindlichkeit, jedoch sollen die darin enthaltenen politischen Absichtserklärungen durch noch auszuhandelnde rechtsverbindliche Abkommen ausgefüllt werden.

Diese sollten dem Anliegen des Klimaschutzes in besonderer Weise Rechnung tragen.

### 5.1.6 Weitergehende Vereinbarungen

Die oben dargestellten Vereinbarungen stellen den derzeitigen Stand international bestehender Kodifikationen auf dem Gebiet des Klimaschutzes dar.

In verschiedenen internationalen Gremien wird darüber hinaus beraten, weitergehende Vereinbarungen zu treffen. Die nachfolgende Übersicht will nur die Schwerpunkte aufzeigen, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

### 5.1.6.1 Klimakonvention

Maßgeblichen Einfluß auf die Entstehung einer internationalen Klimakonvention üben die Ergebnisse der 2. Weltklimakonferenz aus, die vom 29. Oktober bis zum 7. November 1990 in Genf stattgefunden hat. Wissenschaftler und Politiker aus über 130 Staaten haben teilgenommen. Die Konferenz beriet über die Schwerpunktsetzung und den Aufbau eines künftigen Weltklimaprogramms.

Es wurde unterstrichen, daß ohne Verzögerung eine globale Antwort auf die Bedrohung des Klimas erfolgen muß, ohne dabei die Chancen einer dauerhaften Entwicklung aller Staaten zu gefährden. Auf der Basis der vorhandenen Erkenntnisse soll dem Vorsorgeprinzip folgend gehandelt werden. Anerkannt wurde außerdem die gemeinsame, aber differenzierte Verantwortung der Staatengemeinschaft für den Schutz des Klimas.

Explizite Aussagen über die Reduktionsziele, deren Grad der Verbindlichkeit und die Instrumente der Klimapolitik wurden hingegen nicht getroffen.

Die Verhandlungen über eine dem umfassenden Klimaschutz dienende Konvention werden nun zwischen den UN-Mitgliedstaaten in einem zwischenstaatlichen Verhandlungsausschuß (Intergovernmental Negotiating Committee, INC) unter Beteiligung einer Vielzahl von internationalen Organisationen und Nicht-Regierungsorganisationen aufgenommen.

Hinsichtlich der Ausgestaltung der Konvention lassen sich unter den Ländern, die eine verbindliche Abmachung anstreben, zwei Hauptströmungen ausmachen:

Nach Vorstellung der EG und ihrer Mitgliedstaaten sowie der EFTA-Staaten sollen völkerrechtlich verbindliche Verpflichtungen zur Begrenzung und Reduzierung von Treibhausgasemissionen sowie zur Erhaltung und Verbesserung von Kohlendioxid(CO<sub>2</sub>)-Speichern und -Senken in der Konvention fixiert werden.

Nach Ansicht anderer Staaten soll die Klimakonvention – wie auch die Wiener Konvention – eine Rahmenvereinbarung werden, auf deren Grundlage dann erst zeitlich später in gesonderten Protokollen verbindliche CO<sub>2</sub>-Begrenzungsregelungen folgen sollen.

### 5.1.6.2 Waldkonvention

Bei der zweiten und dritten Vorbereitungssitzung zur UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung (März/April, August/September 1991) verständigte man sich darauf, anlässlich dieser Konferenz eine Erklärung zu verabschieden, die umfassende Grundsätze, Strategien und Maßnahmenvorschläge zur Bewirtschaftung, zum Schutz und der Erhaltung der Wälder weltweit enthält.

Angesichts der in allen Klimazonen zu beobachtenden Bedrohung des Waldbestandes ist eine auf den Schutz tropischer Wälder beschränkte Konvention international nicht sinnvoll.

Außerdem würden die Tropenländer eine regional begrenzte Anwendung als Diskriminierung empfinden.

Verhandlungen über eine Waldkonvention könnten ab dem Spätherbst 1992 aufgenommen werden, wenn die 47. Generalversammlung der UN ein entsprechendes Mandat erteilt hat.

Maßgebend für die Erfolgsaussichten der geplanten Konvention für einen effektiven Klimaschutz dürfte sein, in welchem Ausmaß die Industrieländer bereit und in der Lage sind, durch Bereitstellung entsprechender finanzieller Mittel einen Stopp des Waldvernichtungsprozesses oder sogar eine Umkehr zu fördern.

## 5.2 Europäische Gemeinschaft

### 5.2.1 Entwicklung der EG-Umweltpolitik

Der Grundstein der EG-Umweltpolitik wurde Anfang der 70er Jahre gelegt. Sie richtete sich zunächst auf die Lösung lokaler Umweltprobleme. Zu einer Erweiterung der Konzeption kam es, weil relativ schnell klar wurde, daß die Umweltverschmutzung nicht an Grenzen haltmacht. Durch den Treibhauseffekt, das Ozonloch und auch die internationale Erosion des Genpools schob sich die globale Dimension der Umweltproblematik in den Vordergrund.

Die EG sieht sich in einer besonderen Verantwortung zur Lösung dieser Probleme. Dies ist vor allem auch unter dem Gesichtspunkt zu sehen, daß die Industrieländer oft Hauptverursacher der nun virulenten Probleme sind. Die Verantwortung der Europäischen Gemeinschaft wird so weit ausgelegt, daß z. B. Hilfestellungen zur Verbesserung der Umweltsituation in Entwicklungsländern in den Kreis potentieller EG-Aktionen einbezogen werden können.

Die EG versteht sich außerdem als Katalysator für umweltpolitisch bedeutsame Entwicklungen (1).

### 5.2.2 EG-Maßnahmen zum Klimaschutz – neuere Entwicklungen

#### 5.2.2.1 CO<sub>2</sub> und andere Treibhausgase

Am 29.10.1990 wurde bei einer Tagung der EG-Energie- und Umweltminister ein konkretes CO<sub>2</sub>-Mengenziel beschlossen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sollen bis 2000 auf dem Stand von 1990 stabilisiert werden.

Die EG-Kommission wurde aufgefordert, einen konkreten Vorschlag auszuarbeiten und dem Rat zuzuleiten. Das Strategiepapier der EG-Kommission wurde am 25. September 1991 verabschiedet.

Mitte Dezember 1991 setzte sich der EG-Rat der Energie- und Umweltminister mit dem Kommissionsvorschlag auseinander. Die von der Kommission erarbeitete Grundkonzeption – erstmals auch der Vorschlag einer Energie-/CO<sub>2</sub>-Steuer – wurde positiv beurteilt. Zur weiteren Konkretisierung – formale

Vorschläge für detaillierte Maßnahmen – wurde der Vorschlag wieder an die Kommission zurückverwiesen unter dem Hinweis, daß auch die Ergebnisse der Tagung des Rates der Wirtschafts- und Finanzminister zu berücksichtigen seien.

Der ECO/Fin-Rat hat sich – auf seiner Sitzung einige Tage später – inhaltlich zum Kommissionsvorschlag nicht geäußert; er beauftragte lediglich die Arbeitsgruppe „Steuerliche Aspekte“, ihre Untersuchungen wieder aufzunehmen und dabei den Beschluß der Ratstagung der Energie- und Umweltminister einzubeziehen. Die Ergebnisse sollen dem Rat vor der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung zur Beratung vorliegen (2) (3) (4).

Neben der expliziten – sich gerade entwickelnden – CO<sub>2</sub>-Beschränkungspolitik gibt es noch ein Bündel beschlossener Maßnahmen – u. a. im Bereich der Energieeffizienz und -einsparung – die auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen und den Ausstoß anderer Treibhausgase Einfluß nehmen:

- In der EG-Umwelt- und Klimapolitik liegt ein Schwerpunkt auf dem Energiesektor; Ziel ist, die Effizienz zu steigern und Energie einzusparen. F&E- und Demonstrationsprogramme (wie z. B. JOULE und THERMIE) bilden die Grundlage der Politik. Neben der Effizienzsteigerung und der Energieeinsparung bei den heute vorwiegend genutzten Energieträgern werden auch neue, regenerative Energien gefördert. Neuerdings werden über die Unterstützung der (Grundlagen-) Forschung hinaus auch Markteinführungshilfen (ALTERNER-Programm) gewährt. Zur Förderung der effizienteren Energienutzung und zur Erprobung von neuartigen Planungstechniken (z. B. Least cost planning) hat die EG das Programm SAVE aufgelegt. Um die Schlagkraft der Maßnahmen im Energiesektor zu erhöhen, kooperiert die EG weltweit. Die Kontakte mit Ländern der 2. und 3. Welt sind am intensivsten.
- Ein weiterer Schwerpunkt der EG-Klimapolitik liegt bei der Verminderung der Emissionen – nicht nur von CO<sub>2</sub> – aus dem Verkehrssektor durch Erhöhung der Effizienz und durch Einsparung von Energie. Einige nationale Vorschläge für eine EG-Richtlinie zur Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Emission von Kraftfahrzeugen liegen vor.
- Zwei Forschungsprogramme EPOCH und STEP der EG beschäftigen sich mit den Vorgängen in der Atmosphäre und den Klimaprozessen. Auch die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Ökosysteme werden thematisiert. Ziel dieser Programme ist es auch, über die Verbesserung der wissenschaftlichen Kenntnisse eine gezieltere Klimapolitik zu ermöglichen (5) (6).

Die geplante CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie der EG basiert in der konkreten Ausgestaltung nicht zuletzt auf einer Intensivierung der eben dargestellten Maßnahmen.

Die EG-Grundkonzeption sowohl im Hinblick auf die Ziele als auch die Lösungsansätze ist relativ ähnlich dem Klimaschutzprogramm der Bundesrepublik Deutschland.

– Die Maßnahmen erfassen alle klimarelevanten Sektoren: Haushalte und Kleinverbraucher, Industrie, Energiewirtschaft, Verkehr, Forst- und Landwirtschaft.

– Die Strategie zerfällt in drei Aktionsbereiche:

- nicht-fiskalische Maßnahmen
- fiskalische Maßnahmen
- ergänzende Programme der EG-Mitgliedsstaaten nach dem Subsidiaritätsprinzip.

Unter dem Punkt nicht-fiskalische Maßnahmen verbirgt sich eine Vielzahl von verschiedenen Ansatzpunkten. Sie reichen von F&E-Programmen über ordnungsrechtliche und freiwillige Maßnahmen bis zu spezifischen, sektoralen Regelungen.

Im Bereich Forschung und Entwicklung wird angestrebt, Projekte wie THERMIE und JOULE weiter zu intensivieren.

Im Energiebereich sind Maßnahmen geplant, die die Linie der schon praktizierten Energiepolitik weiterführen. Die Realisierung von Energieeinsparungspotentialen soll vor allem in den Sektoren Industrie und Haushalte erleichtert werden.

Vor allem im Verkehrssektor wird – wegen seiner Wachstumsdynamik und den massiven negativen externen Effekten, die dort auftreten, – großer Handlungsbedarf gesehen. Neben dem Einsatz der effizientesten Technologie werden strukturpolitische Maßnahmen gefordert. Das Nutzungsverhältnis der einzelnen Verkehrsträger soll durch eine Verlagerung – weg vom Auto hin zu Bahn und Schiff – in Verbindung mit dem Einsatz des kombinierten Verkehrs umgestaltet werden. Dazu kann auch das europaweite Hochgeschwindigkeitsbahnnetz – wichtige Schlüsselverbindungen sollen neu geschaffen bzw. weiter ausgebaut werden – beitragen.

Ergänzend ist ein Umdenken der Verkehrsteilnehmer zu fördern, um den Individualverkehr zu senken und den verbleibenden Anteil an nichtöffentlichem Verkehr, z. B. durch ein konsequent durchgesetztes Tempolimit, weniger klimaschädlich zu gestalten.

Die Kommission kommt nach der Würdigung der nicht-fiskalischen Maßnahmen zu der Erkenntnis, daß das gesamte Bündel nicht ausreicht, um das gesteckte CO<sub>2</sub>-Stabilisierungsziel zu erreichen. Fiskalische Maßnahmen müssen also noch zusätzlich hinzugezogen werden. Ziel ist es, den Energiepreis so zu erhöhen, daß die externen Kosten internalisiert werden, daß also der Verursacher der Schäden die Kosten seines Handelns zu tragen hat.

Neben einer kombinierten Energie/CO<sub>2</sub>-Steuer – eine Komponente der Steuer knüpft am Energieverbrauch an, die andere an den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Energiekomponente soll 50 % nicht übersteigen – ist eine emissionsabhängige Gestaltung der KFZ-Steuer im Gespräch. Nicht betroffen von der Energie/CO<sub>2</sub>-Steuer wären der nichtenergetische Verbrauch der fossilen Brennstoffe und die regenerativen Energieträger (Ausnahme: große Wasserkraftwerke).

Um die internationale Wettbewerbsfähigkeit der EULänder nicht zu schwächen, soll die „Klimasteuer“

aufkommensneutral ausgestaltet sein, außerdem wird erwogen, Ausnahmeregelungen für bestimmte energieintensive und außenhandelsabhängige Branchen zuzulassen, solange wichtige Handelspartner – vor allem USA, Japan – nicht ähnliche Regelungen treffen.

Um die von der neuen Steuer ausgelösten Anpassungsprobleme zu minimieren, ist vorgesehen, den Steuersatz schrittweise anzuheben. Am 1. Januar 1993 sollte die Steuer erstmals in Höhe von 3 US-\$ pro Barrel Öl erhoben werden. Sie würde bis zum Jahr 2000 jährlich um 1 US-\$ / Barrel steigen. Die Ertragsquote der Steuer liegt bei den einzelnen EG-Ländern. Damit kann auch national bestimmt werden, wie die Aufkommensneutralität hergestellt werden soll.

Eine flexible Anpassung der „Klimasteuer“ an die unsichere künftige Entwicklung der Welt – beispielsweise an verschiedene konjunkturelle Phasen oder an Änderungen der Energiepreise – soll ihre Akzeptanz unter den EG-Mitgliedsländern erhöhen. Eine Steuersatzsenkung wird dann möglich sein, wenn es die wirtschaftliche Entwicklung notwendig erscheinen läßt oder die CO<sub>2</sub>-Entwicklung es erlaubt.

Eine Beschlußfassung über die von der EG-Kommission vorgeschlagene Energie/CO<sub>2</sub>-Steuer als Instrument der europäischen Klimapolitik steht aus.

Eine Ergänzung der EG-Maßnahmen durch nationale Programme, die auf die spezifischen Gegebenheiten der einzelnen Länder abgestimmt werden sollen, wird außerdem angestrebt. Der Aktionsrahmen umfaßt das gleiche Instrumentarium, das auch auf EG-Ebene zur Verfügung steht, und zielt analog sowohl auf die Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch auf die der anderen Treibhausgase.

Die nationalen Maßnahmen, der Zeitplan und eventuell die Transfers zwischen den Ländern sollten – mit den EG-einheitlichen Maßnahmen kompatibel – abgestimmt sein (7).

### 5.2.2.2 Ozonschichtschädigende Gase

– Anfang der 80er Jahre begann die EG, sich durch die Kontrolle von FCKW 11 und 12 mit Stoffen zu befassen, die der Ozonschicht schädlich sind.

Der Ratifizierungsprozeß der Wiener Konvention (1985) durch die EG dauerte bis 1988; die Regelungen des Montrealer Protokolls von 1987 konnten dabei integriert werden. Produktions- und Konsumkontrollen für fünf FCKW und drei Halone wurden festgesetzt. Die beschlossenen Maßnahmen blieben aber hinter den Empfehlungen der Klimakonferenz von Toronto (1988) zurück.

Die Umsetzung der Revision des Montrealer Protokolls (1990; durch die 2. Vertragsstaatenkonferenz in London) in eine EG-Verordnung wurde zum Anlaß genommen, den Zeithorizont für das Verbot von FCKW und Tetrachlorkohlenstoff um einige Jahre auf Mitte bzw. Ende 1997 vorzuziehen. Die Verwendung der H-FCKW ist auf maximal 5 % der Verbrauchswerte für FCKW des Jahres 1989 begrenzt. Der Ausstieg aus den Halonen und dem Methylchloroform

ist analog zur revidierten Fassung des Montrealer Protokolls geregelt.

Es wurde von EG-Seite gefordert, daß das Montrealer Protokoll an die strengeren EG-Werte angepaßt werden sollte. Die Europäische Gemeinschaft ist auch in diesem Bereich bereit, Hilfestellungen zu gewähren, um den Entwicklungsländern den Ausstieg zu erleichtern.

Für das ozonabbauende Distickstoffoxid und für Methan, die u. a. in den Bereichen Energie-, Abfall- und Landwirtschaft entstehen, sollen spätestens bis 1994 Verringerungsziele festgelegt werden.

– Drei freiwillige Vereinbarungen mit Branchen, die verstärkt FCKW einsetzen, ergänzen die festgelegten und genau terminierten Ausstiegspläne. Betroffen sind folgende Industriezweige: die Kälte-, die Schaumkunststoff- und die Aerosolindustrie.

– Das wissenschaftliche Verständnis des Ozonabbaus wird durch Forschungsprogramme im Bereich der Klimatologie und der Stratosphärenchemie vertieft. Die schon erwähnten Projekte EPOCH und STEP können als Beispiele angeführt werden (8) (9).

Die Verhandlungsposition der EG für die 4. Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in Kopenhagen hat sich durch die neuesten Entwicklungen – der Gefahr eines Ozonlochs auch in der Nordhemisphäre – verschärft. Ein früherer Ausstieg aus der Produktion und dem Verbrauch von FCKW, Halonen, Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform bis Ende 1995 wird gefordert.

### 5.2.3 EG-Haltung zur UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung

Die EG möchte aktiv darauf hinwirken, daß auf der Konferenz neben einer starken Rahmenkonvention zum Klimaschutz zwei Protokolle abgeschlossen werden: eines zur Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und eines zum Thema Erhaltung des Tropenwaldes. Eine Unterstützung der Entwicklungsländer ist in Aussicht gestellt, damit sie in die Lage gesetzt sind, die von ihnen übernommenen Verpflichtungen zu erfüllen (10).

## 5.3 Bundesrepublik Deutschland

### 5.3.1 Energie

Die Bundesregierung hat am 13. Juni 1990 beschlossen, die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich zu senken. Die dabei anvisierte 25 %ige Emissionsreduktion soll sich am Ausstoßvolumen des Jahres 1987 orientieren. Nach dem Beitritt der fünf neuen Länder hat die Bundesregierung am 7. November 1990 den Reduktionsbeschluß zur 25 %igen Verminderung in den alten Bundesländern bekräftigt und für die neuen Bundesländer dahin gehend erweitert, daß für diese eine deutlich höhere prozentuale Minderung anzustreben ist. Die Bundesregierung ist damit den Empfehlungen der Vorgänger-Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ gefolgt.

Zur Umsetzung des Kabinettsbeschlusses vom 13. Juni 1990 setzte die Bundesregierung eine interministerielle Arbeitsgruppe „CO<sub>2</sub>-Reduktion“ ein, die aus Vertretern von zehn Fachministerien unter Federführung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit besteht. Die interministerielle Arbeitsgruppe „CO<sub>2</sub>-Reduktion“ hat im Dezember 1991 einen Sachstandsbericht mit Beschlußvorschlägen vorgelegt und den Beschluß zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 25 bis 30 % erneut bekräftigt. Sie soll weiterhin für die Mitwirkung der Bundesländer an der CO<sub>2</sub>-Vermeidung Sorge tragen. Die aktive Mitwirkung des Bundes, der Länder und der Kommunen ist zur Umsetzung des Beschlusses zur CO<sub>2</sub>-Reduktion unverzichtbar.

Auf Bundesebene sind folgende Maßnahmen in Vorbereitung oder bereits verabschiedet (11):

- Das Energiewirtschaftsgesetz soll in der laufenden Legislaturperiode auch dahingehend novelliert werden, daß Ressourcenschonung und Umweltschutz in den Zielkatalog des Gesetzes aufgenommen werden.
- Anfang 1990 ist die neue Bundestarifordnung Elektrizität in Kraft getreten, die durch eine stärkere Linearisierung der Stromtarife kostengerechte Anreize zum sparsamen Umgang mit Elektrizität gibt.
- Das seit 1. Januar 1991 gültige Stromeinspeisungsgesetz (Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz) legt eine Abnahmeverpflichtung und eine Mindestvergütung für aus erneuerbaren Energien erzeugten Strom fest. Die Höhe der Mindestvergütungen für Anlagen mit einer Leistung bis 500 Kilowatt soll mindestens 75 % des Durchschnittserlöses je Kilowattstunde aus der Stromabgabe von Elektrizitätsversorgungsunternehmen an alle Endverbraucher betragen. Höher vergütet werden muß Strom, der aus Wind- und Sonnenenergie gewonnen wurde; Anlagen mit mehr als 500 Kilowatt Leistung müssen nur mit mindestens 65 % dieses Wertes vergütet werden. Mit dieser Maßnahme soll die Wettbewerbssituation erneuerbarer Energien verbessert werden. Externe Effekte, die durch die Stromerzeugung über fossile Energieträger entstehen, werden diesen nicht angelastet. So erleiden die umweltfreundlicheren regenerativen Energien Nachteile im Wettbewerb, die durch eine Internalisierung der externen Effekte – die Zurechnung der vollen Kosten – kompensiert bzw. durch eine finanzielle Förderung ausgeglichen werden können.
- Im Gebäudebereich ist eine Novellierung der Wärmeschutzverordnung mit dem Ziel des Erreichens von Niedrigenergiehausstandards für alle Neubauten sowie eine Verschärfung der Heizungsanlagenverordnung und der Kleinf Feuerungsanlagenverordnung in Vorbereitung. Damit soll eine Verminderung des Energieverbrauchs zur Raumwärmebereitstellung – dem größten homogenen Endenergieverbrauchsbereich – bewirkt werden.
- An einem Entwurf für eine Wärmenutzungsverordnung im Bereich der gewerblichen Wirtschaft wird

derzeit gearbeitet. Wärmenutzungskonzepte, die von den Anlagenbetreibern erstellt werden müssen, sollen zu einer besseren Nutzung der anfallenden (Ab-)Wärme führen.

- Die anstehende Novellierung der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure soll ermöglichen, daß Planungsleistungen honoriert werden können, die den durch die Gebäudenutzung verursachten Energieverbrauch und damit verbundene Umweltbelastungen senken.
- Die Aus- und Fortbildung von bestimmten Berufsgruppen zu Fragen der rationellen Energieverwendung und der Nutzung erneuerbarer Energien soll durch entsprechende Modifikation der Lehrpläne und deren praktische Umsetzung intensiviert werden.
- Die Sanierung der Fernwärmenetze in den neuen Bundesländern soll so erfolgen, daß sie in langfristig tragfähigen Strukturen erhalten werden können. Ein mehrjähriges Bund-Länder-Förderprogramm soll Investitionen in Höhe von 1 Mrd. DM anstoßen.
- Daneben bestehen Förderprogramme für die Errichtung von Windkraftanlagen (mit Fördermitteln für 250 Megawatt Stromerzeugungskapazität) sowie für Photovoltaik-Anlagen („1000-Dächer-Programm“ mit max. 2250 geförderten Anlagen).

Mit diesem Maßnahmenbündel können nur knapp über 10 % – also nur ein kleiner Teil der von der Bundesregierung angestrebten und von der Vorgänger-Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ geforderten – CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen realisiert werden (12). Nur über eine Intensivierung der schon bestehenden Maßnahmen, eine Erweiterung des Maßnahmenbündels und einen forcierten Abbau der bestehenden Hemmnisse kann das Reduktionsziel erreicht werden.

Bei den Maßnahmen auf Länderebene steht die Förderung von Niedrigenergiehäusern im Vordergrund.

Zur Förderung der Nutzung erneuerbarer Energien gewähren fast alle Bundesländer Investitionszuschüsse.

Die Aus- und Weiterbildung ist ein klassisches Tätigkeitsfeld der Länder. So bestehen in neun Bundesländern Aktivitäten zur Weiterbildung von Architekten und Handwerkern.

In verschiedenen Bundesländern (z. B. Nordrhein-Westfalen, Saarland, Niedersachsen, Hessen) wurden Energieagenturen gegründet. Sie haben die Aufgabe, eine rationellere Energienutzung vor allem im Sektor Kleinverbrauch (hauptsächlich betroffen: kleine und mittlere Unternehmen sowie öffentliche Gebäude) durch Beratung, Drittmittelbereitstellung und Durchführung von Einsparmaßnahmen zu ermöglichen. Viele Energieverbraucher führen wegen der Trennung von Investitions- und Betriebskostenbudgets, Informationsdefiziten oder geringer Sensibilisierung für energetische Belange nicht einmal die betriebswirtschaftlich rentablen Energieeinsparmaßnahmen durch.

Des weiteren wurden in vielen Kreisen und Kommunen Energieversorgungskonzepte erstellt. In zehn Bundesländern werden Landesfördermittel speziell für den Aspekt der Kraft-Wärme-Kopplung gewährt. In den Energieversorgungskonzepten werden Energieeinsparmöglichkeiten im Einzugsgebiet der jeweiligen Gebietskörperschaft ausgewiesen sowie Maßnahmen zur Realisierung der Einsparpotentiale aufgezeigt. Die Versorgungskonzepte können als Ansatzpunkt für eine zukünftige integrierte Energieplanung dienen.

Einzelne Kommunen haben sich für ihren Verantwortungsbereich Ziele hinsichtlich der Reduktion von Treibhausgasen gesetzt. In einem Fall (Stadt Schwerte) wurde beispielsweise beschlossen, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2000 um 30 % (Basis 1989) zu verringern. Dabei sind die dazu notwendigen Arbeitsschritte operational formuliert. Sie werden einer jährlichen Überprüfung unterzogen, deren Ergebnisse in einem Zwischenbericht festgehalten werden.

### 5.3.2 Verkehr

In der notwendigen kurz- und mittelfristigen Perspektive erfordert der Verkehrsbereich wegen der expansiven Mobilitätsbedürfnisse enorme Anstrengungen zur Erreichung der von der Bundesregierung angestrebten 25 %igen CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion.

Der Verkehr ist ein besonders problematischer, aber auch besonders sensibler Bereich, denn seine enorme Bedeutung hinsichtlich des Energieeinsatzes und der Emissionen hat der Verkehr nicht zuletzt aufgrund seiner umfassenden Funktionen im Wirtschafts- und Sozialgefüge erlangt.

Für den Verkehrssektor ist eine grundsätzliche Umorientierung notwendig – mit der Zielvorgabe, ein möglichst umwelt- und klimaverträgliches Raum- und Verkehrssystem zu schaffen. Dafür muß das derzeit oberste Prinzip der Verkehrspolitik nach ‚Schaffung der Voraussetzungen für möglichst kostengünstige Verkehrsabläufe‘ die Umweltkosten miteinbeziehen. Verkehrsdienstleistungen müssen sich am Ziel der ‚Umweltverträglichkeit‘ ausrichten.

Die Ziele sind:

- Verkehr vermeiden  
verlagern  
lenken  
beruhigen
- Technik verbessern

Notwendig sind weitere umwelttechnische Verbesserungen am einzelnen Fahrzeug. Eine Kraftstoffverbrauchsreduzierung (z. B. 5 l/100 km für den im Alltag realisierten Kraftstoffverbrauch) würde die verkehrsbedingten Emissionen erheblich reduzieren.

Zur Unterstützung der Bemühungen, den Schadstoffausstoß und speziell die NO<sub>x</sub>-Emissionen zu senken, wurde von der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) das Forschungsprogramm

„Schadstoffe in der Luft“ bestehend aus den Teilen „Atmosphärenforschung“ und „Triebwerkstechnologie“ vorgeschlagen. Im Teilprogramm „Triebwerkstechnologie“ werden Forschungsmaßnahmen zur Senkung der Schadstoffemissionen angesprochen. Hauptansatzpunkt sind dabei die Verbrennungsprozesse in der Brennkammer. Neue Konzepte, wie Magerverbrennung oder Fett-Mager-Stufung versprechen für die Zukunft sinnvolle und technisch umsetzbare Lösungen für den Flugverkehr.

Bereits aus heutiger Sicht ist es indes abzusehen, daß Strategien, die sich lediglich auf technologische oder betriebliche Veränderungen bei Verkehrsmitteln beschränken, nicht ausreichen werden, um die gestellte Aufgabe zu bewältigen und den gewaltigen Herausforderungen der Klimaproblematik zu begegnen.

Die nationale Umsetzungsstrategie wird daher auch das politisch, ökonomisch und gesellschaftlich sensible Feld der Mobilität mit einzubeziehen haben.

Notwendig sind deshalb auch nichttechnische verkehrspolitische Maßnahmen der Verkehrslenkung, Verkehrsverlagerung und der Verkehrsvermeidung. Hierzu gehört die Steigerung der Attraktivität des Schienenweges, die Angebotsverbesserung und Attraktivitätssteigerung des öffentlichen Personennahverkehrs, vor allem in und zwischen den Ballungsgebieten. Dies gilt besonders angesichts der zunehmenden Verkehrsströme aufgrund der deutschen Einheit, der Öffnung der Staaten Mittel- und Osteuropas sowie der bevorstehenden Vollendung des EG-Binnenmarktes.

Die nationale Umsetzungsstrategie wird auch das Gebiet der lokalen Verkehrsvermeidung durch Raumordnung mit einzubeziehen haben. Auf europäischer Ebene wird man sich intensiv um die kritische Evaluierung bestehender Güterverkehrskonzepte und eine zweckdienliche europaweite Bahnpolitik zu bemühen haben, die einen Ausgleich regionaler Disparitäten auch mit Hilfe der Schiene ermöglicht.

Insbesondere im Hinblick auf die Integration der osteuropäischen Staaten in einem erweiterten Gesamteuropa sind die verkehrlichen Perspektiven von besonderem Belang. Entweder gelingt es, Produktions- und Wirtschaftsstandorte in diese Länder zu transferieren – mit allen Folgen für die grenzüberschreitenden Verkehrsströme – oder es werden sich durch weitere Zuwanderung die Verkehrs- und Agglomerationsprobleme in den traditionellen Bevölkerungsballungsgebieten verschärfen.

Aus der Vernetzung des Verkehrsbereichs mit den anderen Gesellschafts- und Wirtschaftsbereichen folgt für die Umsetzungsstrategien, daß das „Globalziel Klima“ schlüssiger politisch vertreten und eher erreicht werden kann, wenn auch andere Folgebereiche in die Betrachtung einbezogen werden.

All die genannten strategischen Ansätze im nationalen Bereich müssen sinnvollerweise international flankiert werden. Belastende Wirkungen im nationalen Bereich dürfen nicht zu Ausweich- bzw. Umverteilungsprozessen in das benachbarte bzw. weiter entfernte Ausland führen.

Nicht nur wegen des globalen Charakters des Klimaproblems, das nur durch supranationales Handeln zu bewältigen ist, sondern auch wegen der genannten, nicht erwünschten Ausweichprozesse (z. B. Umweltdumping) ist eine globale Abstimmung bzw. Ergänzung der nationalen Umsetzungsstrategie oberstes Gebot.

### 5.3.3 Land- und Forstwirtschaft

Die moderne, industrialisierte Landwirtschaft trägt im weltweiten Mittel mit rund 15 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei, so daß auch auf diesem Sektor schnell gehandelt werden muß. Handlungsbedarf ergibt sich auch aus der Tatsache, daß eine globale Entwicklung zu einer immer energieaufwendigeren Landbewirtschaftung zu verzeichnen ist. Das bedeutet, daß der Energieaufwand überproportional zu den Erträgen steigt.

Prinzipiell wird in einer EG-weiten Agrarreform angestrebt, eine umweltfreundliche Landbewirtschaftung zu fördern. Ein beschleunigter Übergang zu ökologischem Landbau könnte weitere Umweltschäden verhindern, Emissionen klimarelevanter Gase aus der Landwirtschaft vermeiden und die Anpassungsfähigkeiten der landwirtschaftlichen Ökosysteme an die Folgen einer Klimaänderung erhöhen. Dies soll durch einen Wechsel von der indirekten Produktförderung zu einer direkten Einkommensförderung bei gleichzeitiger Produktionsverringering geschehen.

Im Jahr 1992 soll im Rahmen der EG-Agrarreform das Flächenstillegungsprogramm ausgeweitet werden. Für diese Flächen sind auch Programme zum Anbau nachwachsender Rohstoffe entwickelt worden. Diese könnten Industrierohstoffe und fossile Energieträger ersetzen. Die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe ist jedoch nur sinnvoll, wenn eine positive Energiebilanz nachgewiesen werden kann. In Extensivierungsprogrammen sollen ein Beitrag zum Artenschutz geleistet, die dauerhafte Speicherung von Kohlenstoff in Biomasse gefördert sowie die Gewässer geschützt werden. Konkrete Ergebnisse der Verhandlungen zur EG-Agrarreform liegen noch nicht vor.

Durch Einführung bzw. weitere Förderung der konservierenden Bodenbearbeitung und Flächenstilllegungen können Kohlenstoffverluste vermindert werden. Wegen der hohen Gefährdung der Böden in einem veränderten Klima müssen dringend tragfähige Bodenschutzkonzepte entwickelt werden.

Auch Aufforstungen – wo immer möglich – könnten dazu beitragen, die Kohlenstoffspeicherung in Biomasse zu erhöhen und den Humusgehalt der Böden zu steigern.

Die Forstwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland unterstützt durch den Erhalt der Wälder, Ausdehnung der Waldflächen und besonders durch verstärkte Einführung naturnaher Bewirtschaftungssysteme die CO<sub>2</sub>-Senkenfunktion.

Auf dem Gebiet der Tierhaltung besteht ein großes Reduktionspotential für Methan und Ammoniak – insbesondere in der energieintensiven Massentierhaltung.

Bisher wird versucht, durch Fördermaßnahmen die Tierbesatzdichte an die Fläche zu binden und so die Zahl zu verringern. Umweltfreundliche Bewirtschaftung muß die Verwendung eigener Futtermittel einschließen, ökologisch schädliche Futtermittelimporte sind zu vermeiden. Zwangsmaßnahmen zur Verkleinerung der Tierbestände werden abgelehnt.

Methanemissionen aus der Rinderhaltung können durch eine geänderte Futterzusammensetzung gemindert werden.

Auch wenn die Optimierungsmöglichkeiten bei Anfall, Lagerung und Ausbringung von Gülle ausgeschöpft würden, wäre es sinnvoll, die Güllewirtschaft einzuschränken, um die gesteckten Emissionsminderungsziele zu erreichen.

Letztlich kann nur eine (Re-)Integration von Tier- und Pflanzenproduktion dazu führen, daß die Probleme im Stickstoffhaushalt bewältigt werden können.

Im Zusammenhang mit den Problemen des gestörten Stickstoffkreislaufs sind auch die Emissionen von Distickstoffoxid zu nennen, die die mineralische und die organische Stickstoffdüngung mit sich bringen. Wegen der Klimawirksamkeit und der künftigen Ozonschädlichkeit dieses Gases muß der Düngereinsatz weiter minimiert werden und sollte sich strikt an den Nährstoffbilanzen orientieren. Ziel muß eine weitestgehende Erhaltung des Stickstoffs im Kreislauf sein. Nur so kann eine Schädigung von Wasser, Böden und Luft nachhaltig vermieden werden.

Eine Besteuerung von mineralischen Stickstoffdüngemitteln wird bisher auf nationaler wie auf EG-Ebene abgelehnt.

### 5.3.4 Ozonschichtschädigende Gase

Die für die Bundesrepublik Deutschland geltenden Regelungen zum Ausstieg aus Produktion und Vertrieb ozonschichtschädlicher Gase sind großenteils in der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung vom 6. Mai 1991 niedergelegt. Für die nicht in dieser Verordnung geregelten Substanzen (FCKW 111 und FCKW 221 bis 217) greifen die Ausstiegsvorgaben der Europäischen Gemeinschaft, die festlegen, daß diese Stoffe bis 1997 völlig zu reduzieren sind.

Da für die H-FCKW (für Bundesrepublik Deutschland: mit Ausnahme von H-FCKW 22) weder die EG noch die Bundesrepublik Deutschland ein Verbot bis zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgesprochen haben, sind die Festlegungen der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London zum Montrealer Protokoll – sobald sie in Kraft treten – relevant. Eine verbindliche, genau terminierte Regelung ist aber auch auf dieser Ebene nicht vorhanden, sondern nur eine Absichtserklärung. Ein Ausstieg aus 34 H-FCKW bis zum Jahr 2020 ist danach angestrebt.

In der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung der Bundesrepublik Deutschland (in Kraft seit 1. August 1991) ist der Terminplan zum Abbau von Produktion und Vertrieb ozonschichtschädigender Stoffe nicht nur nach den einzelnen Verbindungen differenziert, sondern auch nach der Verwendung. Damit können die

Substitutionsmöglichkeiten für die einzelnen Anwendungen berücksichtigt werden.

- FCKW sind noch zugelassen
  - als Kältemittel in mobilen Großanlagen bis Anfang 1994
  - als Kältemittel in Kleinanlagen bis Anfang 1995
  - zur Aufschäumung von Dämmstoffen bis Anfang 1995.
- H-FCKW 22 kann als Kältemittel, Dämmstoff und sonstiger Schaumstoff bis 2000 benutzt werden. In Montageschäumen darf es nur noch bis Anfang 1993 Verwendung finden.
- Methylchloroform ist nur noch bis zum 1. Januar 1995 in Dämmstoffen einsetzbar.
- Die Verbotsfristen für Tetrachlorkohlenstoff und die Halone sind schon abgelaufen.

Produkte, die weiterhin die in der Verbots-Verordnung erfaßten Stoffe enthalten, müssen als solche gekennzeichnet werden (Ausnahme: Dämmstoffe, die H-FCKW 22 enthalten). Um die sachkundige Entsorgung sicherzustellen, ist eine Rücknahmeverpflichtung nach Gebrauch durch die Vertreiber dieser Stoffe vorgesehen.

Die Ergebnisse der NASA-Messungen des Chlorgehalts in der Nordhemisphäre und ähnliche Erkenntnisse, die durch die Europäische Ozonforschungskampagne gewonnen wurden, erhöhen den politischen Druck, früher aus der Verwendung ozonschichtschädigender Stoffe auszusteigen. Bis jetzt sind aber – neben dem Versuch, eine Selbstverpflichtung der Industrie zu einem vorzeitigen Ausstieg für

Ende 1993 zu erreichen – keine Schritte zur Revision der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung unternommen worden.

Im Herbst 1992 findet in Kopenhagen die 4. Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll statt. Ob eine weitere Revision des Protokolls beschlossen wird, die für einzelne Gase schärfere Regelungen als die der Bundesrepublik Deutschland vorsehen und wie schnell diese Festlegungen in Kraft treten würden, ist noch nicht abzusehen (vgl. Kapitel 5.1).

#### Literatur

- (1) Europäische Gemeinschaft, 1991, 21+96f
- (2) Europäische Gemeinschaft, Rat der Umwelt- und Energie-minister, 1991, 1+3
- (3) Europäische Gemeinschaft, Kommission, 1991, 2
- (4) Europäische Gemeinschaft, ECO/Fin-Rat, 1991, 7f
- (5) Europäische Gemeinschaft, 1991, 75-78
- (6) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-sicherheit, 1991, 148f
- (7) Europäische Gemeinschaft, Kommission, 1991, 2-11
- (8) Europäische Gemeinschaft, 1991, 101f
- (9) Europäische Gemeinschaft, 1992, 44
- (10) Europäische Gemeinschaft, 1991, 100
- (11) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-sicherheit, 1991, 112ff
- (12) Prognos, 1991, 448

## 6 Handlungsempfehlungen für die internationale Gemeinschaft

### 6.1 Bestätigung der grundlegenden Zielsetzungen der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“

Die Enquete-Kommission hält mit Nachdruck an den Empfehlungen der Vorgänger-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen fest, wie sie in deren dritten Bericht 1990 beschrieben worden sind. (vgl. Tab. 6.1) (1)

Zusammenfassend bedeutet dies: Reduktionsziele bis zum Jahr 2005, bezogen auf das Basisjahr 1987:

- Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den wirtschaftsstarke westlichen Industrieländern mit derzeit besonders hohen pro-Kopf-Emissionen um mindestens 30 %.
- Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der EG um insgesamt mindestens 20 bis 25 %.
- Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Industrieländern (westliche und östliche Industrieländer zusammengefaßt) um mindestens 20 %. Hier bleibt angesichts der Umwälzungen auf dem Gebiet des ehemaligen Ostblocks zu berücksichtigen, daß Ziele und Prognosen neuen Zahlen und Bewertungen angepaßt werden müssen.
- Begrenzung des Zuwachses der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Entwicklungsländern auf etwa 50 % (d. h. Verminderung der jährlichen Wachstumsraten der Emissionen) (vgl. Abb. 6.1, Tab. 6.1).

Ein einheitlicher Begrenzungssatz des Emissionszuwachses, der Allgemeingültigkeit für alle Entwicklungsländer hätte, ist abzulehnen; vielmehr ist hinsichtlich der einzelnen Entwicklungsländer zu differenzieren.

Tabelle 6.1

#### Reduktionsziele der Enquete-Kommission zur Verminderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050. (Angaben in Prozent, bezogen auf die Emissionen der jeweiligen Ländergruppen im Jahr 1987

Ländergruppen	Reduktionsziele, in %, bezogen auf die jeweiligen Emissionen des Jahres 1987	
	bis 2005 mindestens	bis 2050 mindestens
Westliche und östliche Industrieländer insgesamt . . .	-20	-80
Wirtschaftsstarke westliche Industrieländer mit derzeit besonders hohen Pro-Kopf-Emissionen . . . . .	-30	-80
Europäische Gemeinschaft . . . . .	-20 bis -25	-80
Entwicklungsländer . . . . .	+50	+70
Weltweit . . . . .	- 5	-50

Diese Reduktionsziele ergeben zusammen bis zum Jahr 2005 eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit um mindestens 5 %.

Dieses vorläufige Reduktionsziel mag auf den ersten Blick als gering erscheinen, bedeutet jedoch bei genauerer Bewertung der Gesamtlage eine globale Herausforderung erheblichen Ausmaßes:

- So sind im Zeitraum 1987 bis 1990 in Folge gestiegenen Energieverbrauchs die CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits um ca. 7 % angewachsen. Das bedeutet, daß hier ein Reduktionswert von weltweit bereits 12 % erreicht werden muß, um das oben skizzierte Ziel noch erreichen zu können. (vgl. Abb. 6.1)

Die anvisierte Reduktion bedeutet eine Trendwende, die dringend erforderlich ist, um aus der bloßen Reaktion auf die Klimaveränderungen immer stärker auf Vorsorgemaßnahmen überleiten zu können (vgl. Abb. 6.1)

Zur Umsetzung ihrer Reduktionsvorschläge hält die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ ausdrücklich an den grundsätzlichen Zielen des Konventionentwurfes fest, den die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ verfaßt hat. (2)

### 6.2 Empfehlungen zu Mindestanforderungen im Hinblick auf die „UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung“

Nach der Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ im Januar 1992 zum Stand der internationalen politischen Willensbildung kann nicht damit gerechnet werden, daß die genannten grundlegenden Zielsetzungen kurzfristig in vollem Umfang konsensfähig sind. (3)

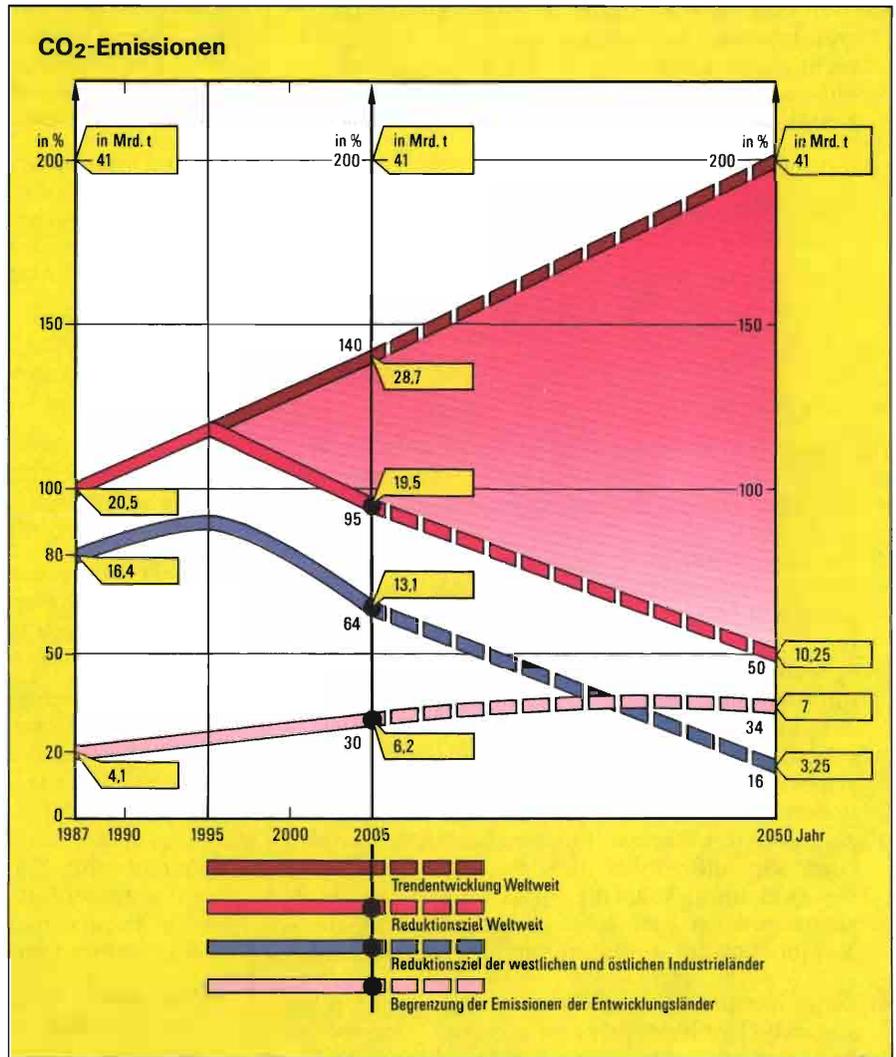


Abb. 6.1: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050 nach dem Reduktionsplan der Equete-Kommission: Reduktionsziele für die Industrieländer und Ziele für die Begrenzung der Zuwächse von Emissionen aus den Entwicklungsländern (vgl. Tab. 6.1).

Alle Angaben in Milliarden Tonnen und in Prozent, bezogen auf die Gesamtemissionen von rund 20,5 Milliarden im Basisjahr 1987. Die eingezeichneten Kurven sind nicht als exakte Vorgaben im Sinne von Szenario-Rechnungen zu verstehen, sondern dienen der Illustration möglicher Vorläufe, um zu den anvisierten Zielen zu gelangen. Die Zuordnung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Ländergruppen der Industrieländer (rund 80 Prozent Anteil im Jahr 1987) und der Entwicklungsländer (rund 20 Prozent im Jahr 1987) erfolgte überschlägig, eine differenzierte Aufteilung ist im Rahmen der Verhandlungen über die internationale Konvention über Klima und Energie in den Anhängen über Geber- und Nehmerländer festzulegen.  
Hinweis: Änderungen, die sich durch die Umwälzungen in der ehemaligen Sowjetunion ergeben haben, konnten hier nicht mehr eingearbeitet haben.

Vor diesem Hintergrund hat die Kommission die folgenden Empfehlungen erarbeitet; sie sieht diese Leitsätze ausdrücklich als Mindestanforderungen an das Ergebnis der Verhandlungen in den kommenden Monaten an:

1. Das Wissen von den durch menschliche Aktivitäten verursachten Klimaänderungen hat einen so hohen Grad an Gewißheit erreicht, daß politische Maßnahmen zur Vorsorge nicht mehr aufgrund von Wissenslücken unterlassen werden dürfen. Wo Regierungen nachhaltige Verminderungen der

Emissionen klimarelevanter Substanzen hinauschieben, ist dies nicht aufgrund von Wissenslücken zu rechtfertigen. Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert

- die drohenden Klimaänderungen so weit wie möglich abzuwenden,
  - Folgen der bereits nicht mehr abwendbaren Klimaänderungen solidarisch zu tragen.
2. Unbestritten ist, daß es hinsichtlich der absehbaren Klimaänderungen noch weiteren Forschungsbe-

darf gibt. Während das jetzige Wissen bereits weitgehende Verminderungen der Emissionen rechtfertigt, kann zusätzliches Wissen in Zukunft entsprechendes Handeln erfordern. Die noch bestehenden Wissenslücken betreffen vor allem:

- die Genauigkeit der Klimaprognosen;
- die unterschiedlichen regionalen Klimaänderungen und ihre Auswirkungen;
- die ökonomischen und weiterreichenden gesellschaftlichen Folgen der Klimaänderung für die verschiedenen Länder, besonders für die Ernährungslage;
- die Folgen für die übrige Biosphäre.

Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert, die bestehenden Wissenslücken zu schließen und daraus zusätzliche Konsequenzen zu ziehen.

3. Die absehbaren Klimaänderungen werden bisher weit überwiegend von den Industrieländern verursacht. Mit Blick auf die Folgen für das Klima ist die bisherige Wirtschaftsweise nicht verallgemeinerungsfähig; ihre Nachahmung durch die Entwicklungsländer würde die Risiken ökologischer Katastrophen erhöhen. Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert, klimaverträgliche Wirtschaftsformen zu finden und zu verwirklichen, in denen kein Land mehr zu Lasten anderer Länder, zu Lasten der Nachwelt und zu Lasten der natürlichen Mitwelt wirtschaftet. Ein erster Schritt in dieser Richtung sollte die Anerkennung des Verursacherprinzips (gemeinsame, aber differenzierte Verantwortung) auf internationaler Ebene sein.
4. Unter der absehbaren Klimaänderung werden vor allem die Länder der Dritten Welt zu leiden haben. Ist die Klimapolitik zunächst überwiegend eine Aufgabe der Industrieländer als Hauptverursacher, so darf doch auch die künftige Entwicklung der noch nicht industrialisierten Länder die Klimakrise nicht verschärfen. Über die bisherige Entwicklungszusammenarbeit hinaus wird die Erhaltung der klimatischen Lebensbedingungen deshalb zu einem entscheidenden Faktor aller künftigen Entwicklungspolitik. Armut darf nicht um der Erhaltung des Klimas willen verewigt werden, es bedarf einer neuen Strategie, die Klimavorsorge und Überwindung der Armut miteinander verbindet. Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert, unter dem neuen Gesichtspunkt der Klimaverträglichkeit auch neue Wege einer für alle Staaten erträglichen Entwicklung von Industrie- und Entwicklungsländern zu gehen; diese Politik muß das gemeinsame Überleben sichern und allen Staaten die Chance für eine dauerhafte Entwicklung gewährleisten.
5. Mit der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung muß der Prozeß dieser Neuorientierung der ökologischen und ökonomischen globalen Entwicklung eingeleitet werden. Die Gegensätze zwischen Industrie- und Entwicklungsländern sind so groß, daß nur kleine Schritte zu erwarten sind, solange die Industrieländer sich mit den Gütern der Erde überproportional versorgen. Im letztlich doch

gemeinsamen Interesse aller sollten in Rio de Janeiro mindestens die folgenden Schritte unternommen werden, um den Prozess in Richtung auf eine effektive internationale Klimapolitik mit Nachdruck weiterzuführen:

- (a) Die internationale Gemeinschaft sollte sich verständigen, unmittelbar nach der Konferenz in Protokollverhandlungen über konkrete Reduktionen der Emission klimarelevanter Substanzen einzutreten.
  - (b) Das Protokoll, zu dem diese Verhandlungen führen, sollte auf der Basis der bereits jetzt vorhandenen wissenschaftlichen Erkenntnisse beschlossen werden.
  - (c) Das Protokoll sollte mit dem Fortgang der Klimaänderung und der wissenschaftlichen Erkenntnisse in einer vorab festgelegten Zeitfolge überprüft werden.
  - (d) Alle den Staaten zugänglichen klimarelevanten naturwissenschaftlichen Forschungsergebnisse sollten unverzüglich aufgearbeitet werden und international verfügbar sein.
6. Die Klimakonferenz von Toronto (1988) hat das Globalziel gesetzt, die Emissionen der klimarelevanten Substanzen bis zum Jahr 2005 weltweit um 20 % und bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts weltweit um 50 % zu reduzieren. Diese Forderung ist nach gegenwärtigem Wissen noch verstärkt gerechtfertigt. Die internationale Gemeinschaft wird aufgefordert, das in Toronto formulierte Ziel unabhängig von der Zuordnung von Reduktionsraten einzelner Länder generell zu bestätigen.
  7. Schon in Rio de Janeiro sollten konkrete Absprachen getroffen werden, die den unmittelbaren politischen Willen aller Staaten zum Ausdruck bringen, Maßnahmen zum Schutz des Klimas ernst zu nehmen. Gemäß dem Verursacherprinzip sind in erster Linie die Industriestaaten aufgerufen, konkrete Schritte für eine globale effektive Klimapolitik einzuleiten. Die Entwicklungsländer werden außerstande sein, den von ihnen zu leistenden Beitrag ohne Unterstützung der Industrieländer zu leisten; sie bedürfen deshalb der Unterstützung im technologischen und im finanziellen Bereich.

In Rio de Janeiro müssen Vereinbarungen getroffen werden, welche die erforderlichen neuen Wege der Kooperation und des Ausgleichs der Interessen zwischen den Industriestaaten und den Entwicklungsländern aufzeigen und die Grundlage für ein gemeinsames Handeln bilden. Daher sollte es in Rio de Janeiro wegen der Dringlichkeit des Problems nicht bei allgemein und unverständlich gehaltenen Erklärungen bleiben. Vielmehr sollen Abreden getroffen werden, welche die künftig notwendige institutionelle, finanzielle und technologische Kooperation zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern bereits auf den Weg bringen und damit die späteren Verhandlungen für eine Klimakonvention erleichtern und fördern.

- Institutionell wird die internationale Gemeinschaft zu diesem Zwecke aufgefordert, die Global Environment Facility (GEF) nicht mehr nur

als Pilotkonzept, sondern als dauernde Einrichtung zu akzeptieren. Die Entscheidungsstruktur des GEF muß so verändert werden, daß sie für alle Staaten einschließlich der Entwicklungsländer akzeptabel wird und somit inhaltlich und vom Verfahren her Wege für eine neuartige Umweltpartnerschaft aufzeigt; die Erfahrungen mit dem Multilateral Fund des Protokolls von Montreal müssen dabei als Vorbild dienen.

- Finanziell werden die Industriestaaten aufgefordert, ihren Beitrag zur GEF bis zum Inkrafttreten einer Klimakonvention deutlich zu erhöhen und mindestens zu verdreifachen. Dabei sollen keine Umschichtungen vorgenommen werden. Die Bundesregierung wird aufgefordert, ihre Bereitschaft zu einem solchen Vorgehen gemeinsam mit allen Industriestaaten zu erklären.

Flankierend zur GEF wird die Einrichtung eines begrenzten sog. „Grünen Fonds“ (Klimafonds) angeregt, aus dessen Mitteln alle diejenigen Umweltprojekte finanziert werden sollen, die nach den bisherigen Vereinbarungen nicht vom GEF bzw. vom Multilateral Fund des Montrealer Protokolls abgedeckt sind.

- Um den Prozeß der technologischen Kooperation zwischen Nord und Süd schon in Rio de Janeiro einzuleiten und zu fördern, bedarf es auch auf diesem Felde schon erster Absprachen. Diese Vereinbarungen sollten folgenden Inhalt haben:

- (a) Aus den Mittel des GEF sollten auf Antrag der Entwicklungsländer Studien gefördert werden, welche den möglichen künftigen Beitrag einzelner Staaten und Regionen im Süden für eine globale Klimapolitik aufzeigen und eingrenzen. Diese Studien sollten in sorgfältiger Weise vom jeweiligen Staat, vom GEF und von externen Gutachtern gemeinsam erstellt werden. Wesentlich ist, daß dabei nicht nur die vorhandenen und erforderlichen technologischen Kapazitäten, sondern im menschlichen Bereich auch Ausbildung, Know how und Management angesprochen werden.
- (b) Gleichzeitig sollen vom GEF Inventarlisten über Technologien auf dem neuesten Stand erstellt werden, welche einen möglichst kostengünstigen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgase in den einzelnen Staaten und Regionen leisten können.
- (c) Auf der Grundlage der zu erstellenden Länderstudie und der Inventarlisten sollten die im GEF vertretenen Staaten entscheiden, welche Technologien in den einzelnen Staaten und Regionen gefördert werden; dabei sollen die Erwägungen über das Verhältnis von Kosten und Nutzen im Vordergrund stehen.

Mögliche Instrumente sowohl zur nationalen wie internationalen Umsetzung, die noch geprüft werden müssen, wie z. B. Steuern, Abgaben, Selbstverpflichtungen, Kooperations- und Kompensationsinstrumente (Joint Implementation) sollten insofern berücksichtigt werden, als sie die Ziele der Konvention fördern; die Regeln des GATT und der Weltbank sollten – falls notwendig – diesem Regime angepaßt werden.

8. Das gemeinsame Ziel der Verhinderung globaler katastrophaler Klimaveränderungen kann nur erreicht werden, wenn einzelne Länder von sich aus demonstrieren, daß und wie es erreichbar ist. Die Bundesrepublik Deutschland ist die Selbstverpflichtung eingegangen, die Emission klimarelevanter Substanzen bis zum Jahr 2005 um mindestens 25 % (relativ zum Stand von 1987) zu reduzieren. Andere Länder gehen den selben Weg. Die internationale Gemeinschaft sollte alle Länder, die dazu wirtschaftlich, technisch und politisch imstande sind, auffordern, nicht auf den Abschluß einer Klimakonvention und deren Durchführungsprotokolle zu warten, sondern sofort mit der Vorbereitung und Durchführung effektiver nationaler und regionaler Maßnahmen zum Schutz des Klimas zu beginnen.

### 6.3 Weitere Empfehlungen

Zur Umsetzung der national eingegangenen Verpflichtungen empfiehlt die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung, den Vorschlag der Kommission der Europäischen Gemeinschaften zur Einführung einer gesplitteten Energie- CO<sub>2</sub>-Steuer zu unterstützen und die weiteren in Anhang 1 genannten Instrumente zur CO<sub>2</sub>-Reduktion zu prüfen.

Beispielhaft für die vorgeschlagenen internationalen wissenschaftlich- technischen Kooperationen empfiehlt die Enquete-Kommission außerdem, die in Anhang 2 erläuterten Projekte zu unterstützen:

1. Eine zentrale Meßstation im Rahmen der globalen Umweltüberwachung als Beitrag zum Global Atmosphere Watch (GAW) Meßnetz.
2. Eine politische Initiative zum Bau eines solarthermischen Kraftwerks im Sonnengürtel der Erde.
3. Eine politische Initiative zur Verringerung der Methan- und CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Erdgas-transportsystem der ehemaligen UdSSR.

### Literaturverzeichnis

- (1) Dritter Bericht der Enquete-Kommission „Schutz der Erde“ 1990, Band 2, S. 868
- (2) Ebenda, S. 849ff.
- (3) Kommissionsdrucksache 12/3

## ANHANG 1

Instrumente einer Reduktion der Emissionen von CO<sub>2</sub>

## 1. Ziele und Möglichkeiten

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahre 2005 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 25–30 % zu vermindern. Diese Reduktion geht über das Maß hinaus, das der Trend erwarten läßt. Darüber hinaus sollen auch international Reduktionspotentiale erschlossen werden.

Zur Wahl stehen grundsätzlich fünf Gruppen von Instrumenten:

1. Das herkömmliche Instrumentarium der Energie- und Umweltpolitik.
2. Eine Kontingentierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, d. h. Mengenbegrenzungen, die etwa verbunden sein können mit Zertifikaten, die handelbar sind.
3. Eine generelle Steuer oder Abgabe auf Emissionen oder den Energieverbrauch.
4. Selbstverpflichtungen der Wirtschaft zur Reduktion der Emission klimawirksamer Spurengase sowohl im eigenen Lande als auch im Wege der Kooperation in anderen Ländern.
5. Transnationale Kooperationen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion und Kompensation.

Diese Maßnahmen sind zu einem festgelegten Termin (1993/94), mit dem Ziel ihre Umsetzbarkeit darzulegen und auf ihre Einsatzfähigkeit (national, international) zu prüfen.

## 2. Herkömmliche Instrumente der Energie- und Umweltpolitik

Zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen konzentrieren sich bislang nicht nur die Bundesrepublik Deutschland – sondern die gesamte übrige Welt – weitgehend auf das herkömmliche Instrumentarium der Energie- und Umweltpolitik. Mit diesen Eingriffen soll Energiesparen, ein Übergang von CO<sub>2</sub>-starken auf CO<sub>2</sub>-schwache Energieträger, die Entwicklung erneuerbarer Energien und – in einigen Ländern – der Einsatz von Kernenergie erreicht werden. Dies kann geschehen durch mengen- und preis- bzw. kostenwirksame Maßnahmen. Die Liste dieser Maßnahmen ist recht lang. Es sei hingewiesen auf Verwendungsbeschränkungen, Mengenbegrenzungen beim Einsatz fossiler Energieträger, Obergrenzen für Emissionen, Subventionen und Steuern. Für den Verkehrssektor ist es zu zahlreichen besonderen Regelungen und Maßnahmen gekommen.

Mit diesem Instrument konnten bislang und werden in Zukunft allorts Emissions-Reduktionen in beachtlichem Ausmaß erreicht. Allein werden diese Instrumente aber nicht ausreichen, die durch die Klimakon-

ferenz in Toronto 1988 vorgegebenen Ziele zu verwirklichen. Andere Maßnahmen sind daher in Erwägung zu ziehen.

3. Energie/CO<sub>2</sub>-Steuer, d. h. eine generelle Steuer auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen und den Energieverbrauch

Energie-/CO<sub>2</sub>-Steuern haben eine doppelte Wirkung. Sie können bewirken, daß Energie gespart wird, sie können aber auch bewirken, daß von einem Energieträger auf einen anderen Energieträger übergegangen wird.

Die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ spricht sich für die Initiative der Kommission der Europäischen Gemeinschaften zu einer gesplitteten Energie-/CO<sub>2</sub>-Steuer aus; und zwar nach folgenden Kriterien:

- Es sollte möglichst eine Steuer sein, die wenigstens EG-weit eingeführt ist.
- Sofern die Steuer nur im nationalen Bereich eingeführt wird, muß sichergestellt werden, daß sich hierdurch keine Verfälschungen des Wettbewerbs auf dem gemeinsamen Markt ergeben. Es muß sichergestellt werden, daß Ausgaben zur Umstrukturierung des Energiesystems im Umfang der erzielten Einnahmen erfolgen.
- Die Sozialverträglichkeit der Steuer ist zu gewährleisten.
- Diskriminierung muß unterbleiben.

## 4. Mengenbegrenzungen, Zertifikate

Möglicherweise werden die unter 2. erwähnten ordnungsrechtlichen Maßnahmen und die Energie-/CO<sub>2</sub>-Steuer ausreichen, um das Reduktionsziel zu erreichen. Ist dies nicht der Fall, sollten mengenmäßige Begrenzungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Kraft gesetzt werden. Mit dem Ziel einer Optimierung der Auswirkungen wäre geboten, handelbare Zertifikate einzuführen.

5. Transnationale Kooperationen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion und Kompensation

Die bisher erwähnten Maßnahmen haben nur Auswirkungen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die vom Inland ausgehen. Weit bedeutsamer sind aber die Potentiale einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im weltweiten Rahmen. Um auch die internationalen Potentiale zu erschließen, sollte neben die vier hier bezeichneten, klassischen Instrumente ein fünftes Instrument treten,

nämlich das Instrument transnationaler Kooperationen zwischen Unternehmen mit dem Ziel der CO<sub>2</sub>-Reduktion.

Kompensation: Für die Umsetzung nationaler und noch einzugehender internationaler Reduktionsverpflichtungen, z. B. transnationale Kooperationen, sollte nach positivem Prüfergebnis die Möglichkeit von Kompensationen (Joint Implementation) eröffnet werden. Dabei muß der noch festzulegende, im Inland zu leistende Reduktionsbeitrag sowie der zu leistende Reduktionsbeitrag aus der Reduktionsverpflichtung mit einem Partner geklärt werden. Die Einbeziehung dieser Instrumente in die laufenden Verhandlungen zur Klimakonvention ist ebenso wie ihre GATT-

Verträglichkeit zu gewährleisten. Internationale Ausgleichs von Reduktionsverpflichtungen können insoweit sinnvoll sein, wie das gemeinsame Ziel der global möglichst zügigen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf diese Weise wesentlich schneller erreicht wird als auf jeweils rein nationaler Ebene; derartige Anrechnungen dürfen nicht dazu führen, daß sich einseitige Vorteile relativ zu den bestehenden Verpflichtungen ergeben.

Wie transnationale Kooperationen zu gestalten sind und wie dieses System mit den hier bereits bezeichneten klassischen Instrumenten abzustimmen ist, wird von der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ noch geprüft.

## ANHANG 2

## Beispiele für internationale wissenschaftlich-technische Kooperation

**1. Vorschlag für die Einrichtung und den Betrieb einer zentralen Meßstation im Rahmen der globalen Umweltüberwachung**

Die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ unterstützt die Initiative der WMO (World Meteorological Organisation), ein weltweites Umweltbeobachtungsmeßnetz (Global Atmosphere Watch-GAW) zu etablieren, in das die bereits vorhandenen Meßnetze GOOS (Global Ozone Observing System) und BAPMON (Background Air Pollution Monitoring Network) integriert werden. GAW dient als Frühwarnsystem zur rechtzeitigen Entdeckung von Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Troposphäre, der stratosphärischen Ozonschicht sowie des regionalen und globalen Transports und der Chemie von umweltrelevanten Spurenstoffen. Zusätzlich trägt GAW zur Überwachung international beschlossener Protokolle und Konventionen, u. a. des Montrealer Abkommens, bei.

Die in GAW erzielten Daten werden ferner zur Verbesserung des derzeitigen Kenntnisstandes über das chemische Verhalten der Atmosphäre und ihrer Wechselwirkung mit der Biosphäre und dem Ozean genutzt. Dadurch wird die Voraussetzung geschaffen, zukünftige Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und anthropogene Aktivitäten und deren Auswirkungen auf die Umwelt vorauszusagen und daraus geeignete, kostengünstige Maßnahmen zur Minimierung bzw. Vermeidung von Umweltproblemen abzuleiten.

In Vorbereitung auf die UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung empfiehlt die Enquete-Kommission dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung, sich an dem internationalen GAW-Umweltbeobachtungsmeßnetz durch den Aufbau und Betrieb einer GAW-Global Station zu beteiligen und diese Aktivität als deutschen Beitrag in die internationalen Verhandlungen über eine Klimakonvention einzubringen. Es wird vorgeschlagen, das im Zugspitzgebiet in 2 650 m Höhe gelegene Schneefernerhaus in ein „Höhen-Umweltobservatorium“ auszubauen und dieses zusammen mit dem daran angekoppelten GAW-Regional Resource Center zur Qualitätssicherung als eine „Zentrale GAW-Station Zugspitze“ in das globale Umweltbeobachtungsmeßnetz einzubringen.

Durch die Übernahme der damit zusammenhängenden Verantwortlichkeiten würde die Bundesrepublik Deutschland eine führende Rolle innerhalb des GAW-Meßnetzes übernehmen und durch die Betreuung der in den Entwicklungsländern gelegenen GAW-Stationen sowie die Ausbildung der dort beschäftigten Wissenschaftler und Techniker einen wichtigen Beitrag zur Förderung der Atmosphärischen Wissenschaften in diesen Ländern leisten.

**2. Eine politische Initiative für ein solarthermisches Kraftwerk im Sonnengürtel der Erde**

Vor dem Hintergrund des in fast 20 Jahren Forschung, Entwicklung und Demonstration Erreichten und in Vorbereitung auf die Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung empfiehlt die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung, mit anderen Industrieländern und einem geeigneten Entwicklungsland übereinzukommen, als signifikanten Beitrag zur Konferenz den Bau eines solarthermischen Kraftwerks im Sonnengürtel der Erde zu beschließen (vgl. (1)).

350 MW<sub>el</sub> solarthermische Kraftwerke werden als Hybridkraftwerke (solar und fossil) in Kalifornien seit mehreren Jahren zuverlässig kommerziell betrieben. Sie sind konventionellen Kraftwerken vergleichbar verfügbar und stehen für die weltweite Markteinführung bereit.

Ein 80 MW<sub>el</sub>-Parabolrinnenkraftwerk mit fossiler Zusatzfeuerung kostet heute etwa 380 Mio. DM. Die Hersteller erwarten mit einer weiteren technischen Verbesserung und bei Herstellung mehrerer Kraftwerke eine Kostensenkung auf etwa 280 Mio. DM.

Zinsen und Rückzahlung der Investitionskosten sind wesentlicher Bestandteil (70 %) der Stromerzeugungskosten von ca. 0,26 DM/kWh<sub>el</sub> gemittelt über 20 Jahre bei einer angenommenen Preissteigerung von 4 % pro Jahr auf die Brennstoffkosten. Für den gleichen Einsatzzweck würde die Stromerzeugung eines rein fossilen Kohlekraftwerks etwa 0,20 DM/kWh<sub>el</sub> kosten. Zwar sind die Investitionskosten eines rein fossilen Kohlekraftwerks nur etwa halb so hoch wie die des solaren Kraftwerks, dafür sind aber die Brennstoffkosten während des Betriebs der Anlage viertel höher als im solaren Fall.

Die Stromerzeugungskosten wären in beiden Fällen etwa gleich hoch, wenn von den Industrieländern zu den Investitionskosten des solarthermischen Kraftwerks ein verlorener Zuschuß in Höhe von etwa 30 % der Investitionskosten, entsprechend 115 Mio. DM, gewährt würde. In diesem Fall ist während des Betriebs über 20 Jahre kein Subventionsbedarf erforderlich. Besonders für energieimportabhängige Länder verringert ein Solarkraftwerk die Höhe der für fossile Brennstoffe aufzuwendenden Devisen entsprechend. Eine Betriebszeit von mehr als 20 Jahren (üblich sind 30 Jahre) würde zu einem zusätzlichen Gewinn führen, weil dann die Kapitalkosten entfallen und der geringere Brennstoffbedarf deutlich geringere Kosten als beim rein fossilen Kraftwerk verursacht.

Gegenüber einem fossilen Kraftwerk vermindert das solarthermische Kraftwerk mit 25 % fossiler Zusatz-

feuerung jährlich die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 155 000 t CO<sub>2</sub> bei Einsatz von Kohle und 135 000 t CO<sub>2</sub> bei Einsatz von Öl, d. h. in 20 Jahren 2,7 bis 3,1 Mio. t, in 30 Jahren über 4 Mio. t CO<sub>2</sub>.

Alle Kosten hängen stark von standort- und finanzierungsspezifischen Rahmenbedingungen ab. Genaue Angaben lassen sich nur in einem konkreten Projekt ermitteln. Konkrete Planungen gibt es für Brasilien und Indien. Bei der Auswahl eines Partnerlandes ist ausschlaggebend, ob grundsätzlich eine auf sparsamen Umgang mit Energie bedachte Politik verfolgt wird und ein unmittelbares Interesse an solaren Kraftwerken besteht und inwieweit dieses Land aktiv bei der Finanzierung, der Errichtung und der Betriebsphase Verantwortung übernimmt.

Die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ empfiehlt dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung, daß die Bundesrepublik Deutschland die Initiative zur baldigen Errichtung eines ersten beispielhaften solarthermischen Kraftwerkes ergreift und einen signifikanten Finanzierungsbeitrag übernimmt. Unter Einbeziehung des verlorenen Zuschusses liegen die Kosten des Solarkraftwerks für das Betreiberland etwa auf dem gleichen Niveau wie die Kosten für ein konventionelles Kraftwerk. Während der Betriebszeit ist kein Subventionsbedarf vorhanden. Das Kraftwerk ist von den Unwägbarkeiten des Energierohstoffmarktes unabhängig.

Als besonders wichtig wird angesehen, daß mit dem ersten Schritt der Einstieg in ein langfristiges Programm zum Aufbau solarthermischer Kraftwerke begonnen wird. Nur dann ist mit einem entsprechenden Engagement auf industrieller Seite zu rechnen, der den Aufbau einer sich selbst tragenden solaren Energiewirtschaft möglich macht. Komponenten der Solarkraftwerke könnten in wachsendem Umfang auch in Entwicklungs- und Schwellenländern produziert werden.

(1) Forum für Zukunftsenergien, 1992

### **3. Eine politische Initiative zur Verringerung der Methan- und Kohlendioxidemissionen aus dem Erdgastransportsystem der ehemaligen UdSSR**

In der Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zum wissenschaftlichen Sachstand über den Treibhauseffekt wurde das Problem

der Methanemissionen aus der Erdgaswirtschaft erneut aufgeworfen. Beim aktuellen Wissenstand wird davon ausgegangen, daß Maßnahmen zur Verminderung der Erdgasleckagen in alten Gasleitungssystemen höchst effizient im Sinne eines wirksamen Mitteleinsatzes zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sind.

Jährlich entstehen in der Förderung und überregionalen Verteilung von Erdgas auf dem Gebiet der ehemaligen UdSSR nach vorsichtigen Schätzungen aus Leckagen und wegen unzureichender Wirkungsgrade der Kompressorstationen Verluste von mindestens 8 % des transportierten Erdgases (Länge des Fernpipelinennetzes: 220 000 km). Diese Verluste entsprechen etwa 40 Mrd. Kubikmeter Erdgas und betragen damit etwa die Hälfte des deutschen Jahresverbrauchs von Erdgas.

Etwa ein Drittel der Verluste entstehen in den Kompressorstationen, die den Transport des Erdgases bewerkstelligen. Dabei entweicht das verbrannte Erdgas als Kohlendioxidemission in die Erdatmosphäre. Der Rest, also über die Hälfte der Verluste, gelangt wegen der stofflichen Zusammensetzung des Erdgases als Methan in die Atmosphäre. Da Methan ein um ein vielfaches höheres Treibhausgaspotential als Kohlendioxid besitzt, tragen die beschriebenen Leckagen in einem großen Ausmaß zur Klimaproblematik bei. Noch gar nicht berücksichtigt sind dabei die Verluste, die bei der regionalen Verteilung (weitere 250 000 km Pipelines) und bei den Endverbrauchern anfallen.

Der Stand der Technik von modernen Gasleitungsnetzen, wie sie in Westeuropa und Nordamerika meist vorzufinden sind, erlaubt es, die Methanverluste unter 0,5 % der transportierten Erdgasmenge zu halten.

Nach ersten Schätzungen kann davon ausgegangen werden, daß die zusätzlichen Einnahmen bei einer Sanierung der Pipelines und Kompressorstationen die Ausgaben übersteigen werden.

Aus den genannten Gründen besteht dringender Handlungsbedarf. Die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ empfiehlt daher dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung, eine transnationale Kooperation mit den zuständigen staatlichen Instanzen der ehemaligen UdSSR einzuleiten, diese durch zwischenstaatliche Abkommen abzusichern und mit hoher Dringlichkeit politisch zu fördern.

## Glossar

### Absorption von Strahlung

Aufnahme von Strahlungsenergie durch einen festen Körper, eine Flüssigkeit oder ein Gas; hierbei wird die Energie aufgenommen und in eine andere Energieform, meist in Wärme, umgewandelt.

### Aerosol

Feste oder flüssige Teilchen in der Luft, außer Wasser- und Eispartikeln, im Größenbereich zwischen 0,1 und 100 µm.

### Agroforestry

In ein landwirtschaftliches Betriebssystem integrierte Form des plantagenmäßigen Anbaus von Bäumen zur Erzeugung von Holz und anderen Walderzeugnissen beziehungsweise ein Betriebssystem mit ökologisch, technisch und ökonomisch nachhaltig integriertem Anbau von Bäumen und landwirtschaftlichen Nutzpflanzen oder Weiden.

### Albedo

(Reflexionsvermögen), Verhältnis von reflektierter zu einfallender Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich, angegeben für eine bestimmte Oberfläche (z. B. Meeresoberfläche, Schnee oder das System Erde/Atmosphäre als Ganzes).

### Allgemeine Gleichgewichtsmodelle

Modelle der Wirtschaftstheorie zur Analyse von Systemzusammenhängen; die erste zentrale Frage ist, ob sich im Modell ein Gleichgewicht (auch Mehrfachgleichgewichte sind nicht ausgeschlossen) einstellt, wenn ja welches und ob dieses Gleichgewicht stabil ist; zweitens können in diesem Modellrahmen die Wohlfahrtswirkungen untersucht werden. Allgemeine Gleichgewichtsmodelle können sowohl zur rein deskriptiven Beschreibung der Systemzusammenhänge als auch zur Beurteilung von politischen Maßnahmen verwendet werden.

### Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen

#### (General Agreement on Tariffs and Trade, GATT)

Das Allgemeine Zoll- und Handelsabkommen ist ein im Rahmen der Vereinten Nationen vereinbarter multinationaler Vertrag, mit dem Ziel, die Hemmnisse im internationalen Handel abzubauen. Das GATT wird seit dem 1. Januar 1948 angewendet. Gegenwärtig gehören dem GATT 96 Länder als Vollmitglieder an (die Bundesrepublik Deutschland seit 1951), ein Land (Tunesien) ist vorläufig beigetreten, und 28 Länder wenden das GATT de facto an.

Das Allgemeine Zoll- und Handelsabkommen enthält folgende Hauptgrundsätze: Der zwischenstaatliche Handel soll auf der Basis der Nichtdiskriminierung erfolgen. Insbesondere sind alle Vertragsparteien bei der Erhebung von Einfuhr- und Ausfuhrzöllen und entsprechenden Abgaben an das Prinzip der Meistbegünstigung gebunden. Der Schutz der einheimischen Industrie ist ausschließlich durch Zölle zu gewährleisten. Mengemäßige Beschränkungen und sonstige nichttarifäre Handelshemmnisse sind grundsätzlich untersagt, unter anderem zum Schutz der Zahlungsbilanz. Streitigkeiten sind nach den im GATT vorhergesehenen Verfahren beizulegen.

Das GATT ist vor allem als Forum für internationale Verhandlungen über den Abbau von Handelsschranken hervorgetreten. In den ersten sechs Verhandlungsrunden stand die Senkung der Zölle im Vordergrund.

### Anaerob

Unter Luftabschluß, z. B. im Wasser.

### Anthropogen [griech. anthropos = Mensch und griech. genes = hervorbringend, hervorgebracht]

Durch menschliche Einwirkungen verursacht oder ausgelöst.

### Arid

Trockenes Klima mit weniger als drei feuchten Monaten pro Jahr.

### Ästuar

Trichterförmige Flußmündung.

### Atmosphärisches Strahlungsfenster

Bereich der Infrarot-Strahlung, in dem der Wasserdampf der Atmosphäre wenig Strahlung absorbiert und die von der Erdoberfläche emittierte (ausgestrahlte) langwellige Strahlung nahezu ungehindert in den Weltraum abgegeben wird. Viele → Treibhausgase absorbieren hier die Infrarot-Strahlung stärker, so daß der Konzentrationsanstieg ersterer zu einer zusätzlichen Erwärmung der Atmosphäre führt.

### Aufkommensneutralität

Begriff der Finanzwissenschaft; durch den Einsatz eines Instruments (z. B. einer Steuer) werden Staatseinnahmen erzielt; diesen Einnahmen stehen fest damit gekoppelte, gleich hohe staatliche Ausgaben zur Finanzierung einer anderen Maßnahme (z. B. Subvention) gegenüber.

### Biomasse

Die gesamte Masse an lebenden Organismen einer Art oder aller Arten in einer Gesellschaft oder in einem Stand, gemessen zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Biomasse setzt sich zusammen aus der pflanzlichen (Phytomasse) und der tierischen (Zoomasse) Biomasse. Die Masse toter und abgefallener Pflanzenteile wird oft zusätzlich ermittelt und als „tote“ Biomasse angegeben.

### Biosphäre

Die vom Leben erfüllte und diesem einen Lebensraum bietende Hülle der Geosphäre (Erde) und die untere Atmosphäre (Luft) mit allen Lebewesen.

### Biota

Biosphäre.

### Bodenerosion

Die Abtragung des Bodens durch Wasser, Eis, Schnee, Wind und Schwerkraft.

### Bodenfeuchte

Anteil des Wassers an der gesamten Bodensubstanz.

### Boreal

Nördlich; Dem nördlichen Klima Europas, Asiens und Amerikas zugehörig.

### Ceteris Paribus

Unter sonst gleichen Bedingungen, Analyse eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs bestimmter exogener und endogener Variablen bei Konstanz aller anderen exogenen Variablen.

### CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt

Verstärkung des Pflanzenwachstums durch eine höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre.

### CRASH

CO<sub>2</sub>-Studie der EG mit drei Schwerpunkten:

- Kosteneffizienzanalyse von CO<sub>2</sub>-Reduktionsmöglichkeiten
- Wirkungen Energie- und CO<sub>2</sub>-Steuer auf CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Analyse der Wirkungen unterschiedlicher Besteuerungsmodelle im Energiesektor.

### Degradierung/Degradation

Veränderung der Biomassendichte von Wäldern oder des typischen Profils eines Bodens durch menschliche Eingriffe, durch Änderung des Klimas, der Pflanzendecke oder der Bodenbesiedlung. Die Degradierung ist oft mit einem Rückgang der Bodenfruchtbarkeit verbunden.

**Denitrifikation**

Mikrobieller Stickstoffabbau, d. h. Reduktion von Nitrat (NO<sub>3</sub>) zu atmosphärischem Stickstoff (N<sub>2</sub>) oder zu Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O).

**Deposition**

Ablagerung auf Oberflächen.

**Diskontfaktor**

Indikator für die Einschätzung zukünftig anfallender Nutzen und Kosten durch die heutige Generation.

**Dritte Welt**

Dritte Welt ist im allgemeinen Sprachgebrauch die Bezeichnung für Entwicklungsländer. Für den Ursprung dieses Ausdrucks gibt es mehrere Erklärungen. Die gebräuchlichste spricht von einer Einteilung der Welt in die Erste (westliche), die Zweite (östliche) und die Dritte (südliche) Welt.

**EG-Kommission**

Die Kommission der →Europäischen Gemeinschaften (Sitz Brüssel) wacht als Hüterin der europäischen Verträge über die korrekte Anwendung der Vertragsbestimmungen, macht dem Rat der EG Entscheidungsvorlagen zur Entwicklung der Gemeinschaftspolitik und setzt als Exekutivorgan die Gemeinschaftspolitik auf der Grundlage der Ratsentscheidungen oder in direkter Anwendung der Vertragsbestimmungen ins Werk.

Die Kommission besteht aus 14 gleichberechtigten Mitgliedern, von denen die großen Länder (Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien) je zwei, die übrigen EG-Staaten je ein Mitglied stellen. Die Kommissionsmitglieder werden von den Regierungen der Mitgliedstaaten im gegenseitigen Einvernehmen ernannt. Sie sollen ihre Aufgaben in voller Unabhängigkeit von den nationalen Regierungen wahrnehmen. Die Kommission arbeitet nach dem Kollegialprinzip; Entscheidungen werden mit einfacher Mehrheit getroffen.

**El-Niño-Ereignis**

Unregelmäßig im Abstand einiger Jahre auftretendes Phänomen, bei dem das Oberflächenwasser des Meeres vor der Küste Perus und entlang des äquatorialen Pazifiks wesentlich wärmer ist als im Jahresdurchschnitt.

**Emission von Spurengasen**

Freisetzen von →Spurengasen aus einem Reservoir in der Atmosphäre.

**Endenergie**

Endenergie ist die Energie, die vom Endverbraucher eingesetzt wird. Dazu gehört in der Regel meist →Sekundärenergie, z. B. Kohle-, Mineralöl- und Gasprodukte, Strom und Fernwärme, jedoch auch direkt nutzbare →Primärenergie, wie z. B. Erdgas. Die Verluste bei der Umwandlung von Primärenergie in die Endenergie, vor allem bei der Stromerzeugung, sowie der nichtenergetisch genutzte Anteil der Primärenergie machen in der Bundesrepublik Deutschland zusammen z. Z. etwa 1/3 der eingesetzten Primärenergie aus, so daß nur etwa 2/3 der Primärenergiemenge als Endenergie zur Verfügung stehen.

**Energiebedingte klimarelevante Spurengase**

→Spurengase, die bei der Bereitstellung, Umwandlung und Nutzung von Energie freigesetzt werden und direkt oder indirekt zur Klimaänderung führen. Dazu zählen:

- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)
- Methan (CH<sub>4</sub>)
- Distickstoffoxid (Lachgas, N<sub>2</sub>O)– Spurengase, die zur Bildung des Ozons (O<sub>3</sub>) in der Troposphäre beitragen bzw. luftchemische Veränderungen bewirken, d. h. in erster Linie Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)
- weitere auf ihre Klimarelevanz noch im einzelnen zu überprüfende Spurengase.

**Energiedienstleistung**

→Energieeinsparung/Energiedienstleistung.

**Energieeinheiten und Energieumrechnungsfaktoren**

Die verbindliche Einheit für Energie ist das Joule (J). Es gilt seit

dem 1. Januar 1978 in der Bundesrepublik Deutschland als gesetzliche Einheit. Die Kalorie (cal) und davon abgeleitete Einheiten wie Steinkohleeinheiten (SKE) und Rohöleinheiten (RÖE) (1 SKE = 0,7 RÖE) können für eine Übergangszeit nur noch hilfsweise zusätzlich verwendet werden. 1 Joule (J) = 1 Newtonmeter (Nm) = 1 Wattsekunde (Ws)

*Gebräuchliche Energieeinheiten sind:*

1 Terawattstunde = 1 TWh = 1x10<sup>9</sup> kWh = 3,6 PJ = 0,123 Mio. t SKE;

1 Million Tonnen Steinkohleeinheiten = 1 Mio. t SKE = 29,308 PJ = 8,15 TWh

1 Exajoule = 1EJ = 278 TWh

**Umrechnungsfaktoren**

	kJ	kWh	kg SKE
1 kJ	–	0,000278	0,00034
1 kWh	3600	–	0,123
1 kg SKE	29308	8,14	–

**Energieeinsparung/Energiedienstleistung**

Energieeinsparung wird hier, dem Stand der Diskussion entsprechend, grundsätzlich im Sinne des Energiedienstleistungskonzeptes verstanden. Das heißt, der bisher so genannte Energiebedarf ist auf eine Dienstleistung (z. B. Raumtemperatur, Licht, Kraft) gerichtet, die immer schon durch eine Kombination der Faktoren Energie, Kapital und technisches Wissen erbracht wird. Die optimale Kombination dieser Faktoren hängt von den relativen Kosten ab. Berücksichtigt man die gestiegenen Energiepreise und außerdem die externen Kosten der verschiedenen Energieumwandlungsprozesse, so erweist es sich volkswirtschaftlich und umweltpolitisch als sinnvoll, künftig in weitem Umfang Energie durch Investitionen und technisches Wissen zu ersetzen. Energieeinsparung heißt, dieselben Dienstleistungen durch eine effizientere Kombination der verschiedenen Faktoren zu gewährleisten. Dabei sind die Vorleistungen zu berücksichtigen, d. h., der Energieumsatz ist nur dann vermindert, wenn dies auch in der Primärenergiebilanz gilt. Energieeinsparung wird hier als Oberbegriff verstanden: Er umfaßt die Minimierung des Energieeinsatzes für ein gegebenes Niveau von Energiedienstleistungen über die gesamte Prozeßkette – also einschließlich der Umwandlung von →Primärenergie in Endenergie und deren Umwandlung in →Nutzenenergie bzw. die eigentliche Energiedienstleistung. Aufmerksamkeit bei Maßnahmen zur Einsparung von Energie verdienen die Angebots- und die Nachfrageseite.

**Energieeinsparpotentiale**

Es sind vier üblicherweise verwendete Potentialkategorien zu unterscheiden:

- Das theoretische Potential gibt das Angebot der Energiequellen bzw. das Ausmaß der Energieeinsparung nach physikalischen bzw. naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten wieder.
- Das technische Potential ergibt sich aus dem theoretischen Potential unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der verschiedenen Systeme zur Nutzarmachung der Energiequellen bzw. der Energieeinsparung sowie unter Berücksichtigung anderer technischer Randbedingungen und entspricht dem jeweiligen Stand der Technik.
- Das wirtschaftliche Potential schränkt das technische Potential auf den Anteil ein, der sich unter Einbeziehung der Kosten der jeweiligen Systeme im Vergleich zu den Kosten konkurrierender Systeme als wirtschaftlich konkurrenzfähig erweist.
- Das Erwartungspotential ist die Teilmenge des wirtschaftlichen Potentials, die die Markteinführungsgeschwindigkeiten und andere Einflußfaktoren berücksichtigt und stellt damit das ausgeschöpfte wirtschaftliche Potential dar, das aufgrund der verschiedenen Randbedingungen zu erwarten ist.

**Erdbahnparameter**

Parameter, die den Verlauf der Erdbahn bestimmen, wie die →Präzession des sonnennächsten Punktes der Erdbahn, die →Inklination der Erdachse und die →Exzentrizität.

**Erneuerbare Energien/Solartechnik**

Unter der Nutzung der erneuerbaren (regenerativen) Energien versteht man die technische Umsetzung der direkten und der

indirekten, bereits in der Natur umgewandelten Solarenergieformen. Aus der Solarstrahlung läßt sich z. B. mittels Solarzellen (Photovoltaik) Strom oder mittels Sonnenkollektoren Wärme erzeugen. Die in der Natur umgewandelten Solarenergieformen lassen sich in Form von Wasser- und Windkraft, Umweltwärme, Biomasse, Meereswärme und Gezeitenenergie verwenden. Unter passiver Solarnutzung versteht man die Wandlung der Solarenergie in Wärme direkt im Gebäude bzw. in mit dem Inneren des Gebäudes in Verbindung stehenden Wandstrukturen. Der jährliche Primärenergieverbrauch der Menschheit, zur Zeit rund  $90 \times 10^{12}$  Kilowattstunden (rund 11 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten), beträgt nur etwa ein Zehntausendstel der auf die Erdoberfläche jährlich einfallenden Sonnenstrahlung. Der Anteil der Landfläche beträgt etwa 30 %, so daß die jährlich auf die Landfläche der Erde einfallende Solarstrahlung etwa das 3000fache des Primärenergieverbrauchs der Welt beträgt. Im Prinzip ist ein großes technisches Potential zur direkten und indirekten Nutzung von Solarenergie vorhanden: Würde man langfristig wenige Prozent der Landfläche der Erde, d. h. einige Millionen km<sup>2</sup>, für eine Energiewandlung der Solarstrahlung mit einem Gesamtwirkungsgrad von durchschnittlich 5 % (einschließlich aller Umwandlungs-, Verteilungs- und Speicherverluste) und zusätzlich einen Teil des technisch nutzbaren Potentials der Wasser- und Windkraft nutzen, so ließe sich das Zweifache bis Dreifache des heutigen globalen Primärenergiebedarfs mit regenerativen Energien decken.

#### Erosion

→ Bodenerosion.

#### Erosion des Genpools

Verlust genetischen Materials z. B. durch Aussterben von Landsorten für verschiedene Grundnahrungsmittel.

#### Europäische Gemeinschaften

Drei Teilorganisationen fallen unter den Begriff „Europäische Gemeinschaften“:

- Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl (EGKS, Montanunion)
- Europäische Wirtschaftsgemeinschaft (EWG)
- Europäische Atomgemeinschaft (EAG, EURATOM)

Der Begriff Europäische Gemeinschaft für die drei Gemeinschaften ist politischer und nicht juristischer Natur, da nur drei Gemeinschaften juristische Kompetenzen besitzen.

#### Eutrophierung

Überdüngung, d. h. übermäßige Zufuhr von nitrat- und phosphathaltigen Nährstoffen.

#### Evapotranspiration

Verdunstung von Wasser durch Lebewesen (→ Transpiration) und von unbelebten Oberflächen (Evaporation).

#### Externe Effekte

Auswirkungen des Handelns eines Wirtschaftssubjekts (Unternehmen, Haushalte usw.) auf ein anderes, die nicht durch eine Entschädigung / Vergütung über den Markt ausgeglichen sind.

#### Fauna

Tierwelt.

#### Feedback

Rückkopplung.

#### Fernerkundung

Die Fernerkundung der Erdoberfläche und ihrer Atmosphäre ist die indirekte Herleitung der interessierenden Größen, wie etwa der Meeresoberflächentemperatur oder auch des Bestandes der tropischen Wälder aus Bildern rückgestreuter oder emittierter elektro-magnetischer Strahlung. Fernerkundung wird vor allem betrieben mit → Radiometern auf Satelliten, aber auch mit Kameras und Radargeräten in Flugzeugen.

#### Flora

Pflanzenwelt.

#### Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW)

Industriell hergestellte organische Halogenverbindungen. Der größte Anwendungsbereich war bis vor wenigen Jahren der Einsatz als Treibmittel in Spraydosen. Mittlerweile werden die

FCKW vorwiegend bei der Kunststoffverschäumung, als Löse- und Reinigungsmittel sowie als Kühlmittel verwendet. FCKW sind bei direktem Kontakt unschädlich, in der → Stratosphäre werden sie jedoch durch Sonnenlicht gespalten und verursachen das → Ozonloch über der Antarktis. Des weiteren führen FCKW zu einer Verstärkung des → Treibhauseffekts.

Unterschieden wird zwischen vollhalogenierten und teilhalogenierten FCKW. Vollhalogenierte FCKW bestehen ausschließlich aus Kohlenstoff und → Halogenen und haben sehr hohe → Ozonzerstörungspotentiale. Nicht im → Montrealer Protokoll geregelt ist beispielsweise die vollhalogenierte Verbindung Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>). Teilhalogenierte FCKW enthalten zusätzlich Wasserstoffatome und sind daher chemisch weniger stabil. Teilhalogenierte FCKW wie H-FCKW 22 werden als Ersatzstoffe für vollhalogenierte FCKW diskutiert. Verschiedene teilhalogenierte FCKW sind jedoch treibhausrelevant und tragen – wenn auch in geringerem Umfang – zur Zerstörung der Ozonschicht bei.

Die Benennung der FCKW erfolgt nach einem internationalen dreistelligen Code (XYZ) durch X = Zahl der C-Atome – 1; Y = Zahl der H-Atome + 1; Z = Zahl der F-Atome; Cl-Atome werden nicht gezählt.

#### Forcing

(→ Radiative Forcing) Englischer Ausdruck für einen Antrieb innerhalb des Klimasystems. Zum Beispiel kann eine Änderung des ozeanischen Strömungsmusters eine Klimaänderung nachschieben (d. h. antreiben, erzwingen).

#### Fossile Energieträger

In der erdgeschichtlichen Vergangenheit aus abgestorbenen Pflanzen entstandene feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas.

#### GATT

→ Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen.

#### Gradient

Gefälle.

#### GREEN

Allgemeines Gleichgewichtsmodell, Mehr-Sektoren- und Mehr-Länder-Fall.

#### Halogene

(griech. Salzbildner); Gruppe von Nichtmetallen, die aus den Elementen Fluor (F), Chlor (Cl), Brom (Br), Jod (J) und Astat (At) besteht.

#### Halone

Halone sind bromierte → Fluorchlorkohlenwasserstoffe und haben ein sehr hohes → Ozonzerstörungspotential. Halone werden vorwiegend zu Feuerlöschzwecken eingesetzt. Nur etwa 6 % der Halone werden jedoch zum Löschen eines Feuers verwendet, der überwiegende Anteil verbleibt in den Löschgeräten und -anlagen, der Rest gelangt durch Löschtraining, durch Abfüllverluste und durch Fehlauflösung in die Atmosphäre (→ Montrealer Protokoll).

#### Hemisphäre

Halbkugel, Erdhälfte.

#### HERMES

Harmonized European Research on Models of Energy Systems.

#### Hydrologischer Zyklus

Wasserkreislauf.

#### Inklination der Erdachse

Neigung der Rotationsachse der Erde zur Bahnebene um die Sonne.

#### Innertropische Konvergenzzone

Zone aufsteigender Luftmassen zwischen den Passatwindssystemen der beiden Hemisphären. In dieser Zone treten häufig Schauer und Gewitter auf.

#### Internalisierung externer Effekte

Einbeziehen der → externen Effekte in den Preismechanismus; damit ist gewährleistet, daß das Wirtschaftssubjekt, das die

externen Effekte verursacht, die vollen Konsequenzen seines Handelns trägt.

#### **Inversion**

In der Meteorologie: Umkehrung des vertikalen Temperaturgradienten in der Troposphäre, d. h. Temperaturzunahme in der Höhe.

#### **Karzinogene Wirkung**

Krebs auslösende Wirkung.

#### **Katalysator**

Substanz, die eine chemische Reaktion beeinflusst, ohne selbst dabei verändert zu werden. Chloratome und Chloroxid-Radikale wirken bei der Ozonzerstörung in der Stratosphäre als Katalysatoren, d. h. sie sind in der Lage, eine große Anzahl von Ozonmolekülen zu spalten, bevor sie selbst durch eine andere Reaktion verbraucht werden.

#### **Katarakt**

Grauer Star, Linsentrübung.

#### **Klima**

Zustand der Atmosphäre über einem bestimmten Ort, charakteristisch für ein großes Zeitintervall von meist mehr als 30 Jahren.

#### **Klimamodell**

Beschreibung des →Klimas in einem mathematisch-physikalischen Computermodell.

#### **Klimaparameter**

(Interne) Klimaparameter sind die das Klima direkt charakterisierenden, physikalischen Größen, wie z. B. Strahlung, Temperatur, Niederschlag. Als externe Klimaparameter bezeichnet man die Einflußfaktoren, die zwar das Klimasystem beeinflussen aber nicht mit dem Klimasystem wechselwirken (z. B. Einstrahlung der Sonne, Vulkane, anthropogen bedingte Emission von Treibhausgasen).

#### **Klimarelevante Spurengase**

→Treibhausgase.

#### **Klimavariation**

Kurzzeitige Änderung des Klimas.

#### **Kohlehydrate**

Wichtige pflanzliche Reservestoffe mit charakteristischen chemischen Eigenschaften. Zu den Kohlehydraten gehören z. B. Stärke, Trauben- und Fruchtzucker.

#### **Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)**

Farbloses, nicht brennbares schwachsäuerliches Gas. CO<sub>2</sub> wird von Pflanzen unter Zuhilfenahme von Wasser und Sonnenenergie zu Kohlehydraten umgewandelt. Bei der Verbrennung von Pflanzen oder der aus ihnen entstandenen →fossilen Energieträger wird der enthaltene Kohlenstoff wieder als CO<sub>2</sub> freigesetzt. CO<sub>2</sub> ist ein wichtiges →Treibhausgas, seine gegenwärtige Konzentration in der Atmosphäre beträgt 355 ppm.

#### **Kohlenstoffkreislauf**

Kreislauf des Kohlenstoffs in seinen verschiedenen chemischen Verbindungen zwischen der →Atmosphäre, der →Biosphäre, der Hydrosphäre und der →Lithosphäre.

#### **Kohlenwasserstoffe**

Organische Verbindungen, die aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Kohlenwasserstoffe können durch den Zusatz weiterer Elemente wie z. B. →Halogene in halogenierte Kohlenwasserstoffe verändert werden.

#### **Kondensation**

Übergang von der Dampf- in die Flüssigphase. In der Meteorologie: der Übergang des Wasserdampfes der Atmosphäre in den flüssigen Zustand durch Tröpfchenbildung (Wolken, Nebel, Tau).

#### **Kondensationskerne**

Luftgetragene Partikel, an denen sich Wasserdampf bevorzugt anlagert.

#### **Kondensationswärme**

Wärme, die beim Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand freierwird.

#### **Konvektion**

Oft kleinräumiges Aufsteigen von Luftmassen.

#### **Konzentration von Spurengasen**

In diesem Bericht wird stets das Volumen →Mischungsverhältnis von Spurengasen – wie üblich in der Physik der Atmosphäre – als Konzentration bezeichnet.

#### **Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)**

Gekoppelte Erzeugung von Elektrizität und Heiz- bzw. Prozeßwärme; dadurch hohe Ausnutzung der eingesetzten Primärenergie.

#### **Kurzwelliger Spektralbereich**

Bereich elektromagnetischer Strahlung zwischen 0,2 und 4 µm.

#### **Langwelliger Spektralbereich**

Bereich elektromagnetischer Strahlung zwischen 4 und 100 µm.

#### **Leguminosen**

Hülsenfrüchtler; Krautige Pflanzen oder Bäume mit Hülsenfrüchten. Sie leben in Symbiose mit stickstofffixierenden Knöllchenbakterien. Zu den Leguminosen gehören wirtschaftlich bedeutende Kulturpflanzen wie z. B. Bohnen, Erbsen, Klee, Luzerne, Erdnuß und Soja.

#### **Lithosphäre**

Äußere Gesteinshülle des Erdkörpers.

#### **Luftschadstoffe**

In der Luft befindliche Stoffe, die sich direkt oder indirekt schädigend auf die Biosphäre auswirken, z. B. Stickoxide, Schwefeldioxid, leichtflüchtige organische Verbindungen und Ozon.

#### **Makroökonomie**

Analyse des Zusammenhangs gesamtwirtschaftlicher Größen (Arbeitslosenrate, Preisniveau, Sparquote, etc.).

#### **Meridional**

Parallel zu den Längengraden verlaufend.

#### **Methanogene Archaeobakterien und methanotrophe Bakterien**

Methanogene Archaeobakterien sind Bakterien, die sich in den Frühzeiten der Evolution entwickelt haben und in Abwesenheit von Luftsauerstoff Methan bilden können.

Methanotrophe Bakterien sind in der Lage, das Methan zu verwerten, es wird dabei zu CO<sub>2</sub> umgesetzt.

#### **MIDAS**

Medium Term Integrated Demand and Supply Energy System.

#### **Mischungsverhältnis**

In der Atmosphärenforschung hat sich eingebürgert, den Spurengasgehalt als Mischungsverhältnis (Molenbruch) anzugeben. Hierbei wird das Volumen-Mischungsverhältnis definiert als das Verhältnis der Moleküle eines Gases zu der Gesamtzahl aller Moleküle. Folgende Abkürzungen sind gebräuchlich:

1 ppm (1 part per million): 10<sup>-6</sup> (ein Teil auf eine Million)

1 ppb (1 part per billion): 10<sup>-9</sup> (ein Teil auf eine Milliarde)

1 ppt (1 part per trillion): 10<sup>-12</sup> (ein Teil auf eine Billion).

#### **Modal split**

Volkswirtschaftlich effiziente Verteilung des Transportes von Personen und Gütern auf die einzelnen Verkehrsträger (Straße, Schiene, Luft, Wasserstraße).

#### **Modelle**

Eindimensionales (1-D) Modell – mit diesem Modell läßt sich die Gesamtsäulendichte und die Vertikalverteilung eines Spurengases berechnen.

Zweidimensionales (2-D) Modell – neben der vertikalen Höhe wird hier die geographische Breite als weitere Dimension benutzt, um der breitenabhängigen Solarstrahlung Rechnung

zu tragen. Dreidimensionales (3-D) Modell – hier wird zusätzlich die geographische Länge einbezogen; 3-D-Modelle befinden sich im Hinblick auf chemische Fragestellungen erst im Entwicklungsstadium.

#### Monetarisierung

Bewertung in Geldeinheiten.

#### Monitoring

Ständiges Überwachen (der verschiedenen klimarelevanten Parameter).

#### Montrealer Protokoll:

Das Montrealer Protokoll vom 16. September 1987 über Stoffe, die zu einem Abbau der → Ozonschicht führen, ist am 1. Januar 1989 in Kraft getreten. Das Montrealer Protokoll ist die erste Folgevereinbarung zum Wiener Übereinkommen und bildet einen wichtigen Grundstein in der Umweltpolitik. In dem Protokoll werden die Produktion und der Verbrauch der wichtigsten vollhalogenierten → FCKW und bestimmter → Halone geregelt.

In der zweiten Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll im Juni 1990 in London wurde eine Verschärfung der Protokollregelung beschlossen.

#### Multilateral Fund (Multilateralfonds)

Bei der 2. Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll gegründeter Fonds, mit dem Ziel, den Entwicklungsländern durch finanzielle Hilfen den Ausstieg aus ozonschichtschädigenden Stoffen zu erleichtern.

#### Mutagene Wirkung

Nicht zielgerichtete, das Erbgut verändernde Wirkung.

#### Mykorrhiza

Symbiose zwischen höheren Pflanzen und Pilzen. Die Wurzeln der Bäume sind von einem dichten Pilzgeflecht umgeben. Der Wirtspflanze werden Assimilate entzogen, während die Pilze die Wasser- und Ionenversorgung der Bäume übernehmen.

#### Nachhaltigkeit

Begriff aus der Land- und Forstwirtschaft, der eine wirtschaftsweise bezeichnet, die sicherstellt, daß die Produktionsleistung des Ökosystems für kommende Generationen unvermindert erhalten bleibt. Der Begriff wird nicht einheitlich verwendet und teilweise im Sinn der Erhaltung der Waldfläche, des Holzertrages, der betrieblichen Wertschöpfung oder des ökologischen Gleichgewichts verstanden.

#### Nettoprimärproduktion

Nettofluß von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in die grünen Pflanzen. Die Nettoprimärproduktion ergibt sich aus dem Bruttofluß von Kohlenstoff in die grünen Pflanzen, der durch die → Photosynthese in den Pflanzen fixiert wird, und den CO<sub>2</sub>-Verlusten der Pflanzen durch → Respiration.

#### Nitrifikation

Mikrobielle Stickstoffumwandlung, bei der aus Ammonium (NH<sub>4</sub>) in zwei Stufen zunächst Nitrit (NO<sub>2</sub>), dann Nitrat (NO<sub>3</sub>) gebildet wird.

#### Nord-Süd-Dialog

Begriff für alle Bemühungen, zwischen Industrie- und Entwicklungsländern, zu einem Interessenausgleich zu kommen.

#### Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)

Instrument zur Beurteilung von staatlichen Entscheidungen; durch eine systematische, möglichst vollständige Aufarbeitung der Nutzen und Kosten der einzelnen Maßnahmen und eine Gesamtbeurteilung werden Entscheidungssituationen transparenter.

#### Nutzenergie

Unter Nutzenergie versteht man die Energie, die vom Verbraucher tatsächlich genutzt wird, d. h. nach Abzug der Umwandlungsverluste beim Einsatz der → Endenergie. Nutzenergie ist z. B. Wärme, Licht, Kraft, Nutzenergie. Die tatsächlich genutzte Energie (Nutzenergie) liegt z. T. in der Bundesrepu-

blik Deutschland bei 45 % der Endenergie und bei rund 1/3 der eingesetzten → Primärenergie.

#### Ökosystem

Die Einheit von Lebensgemeinschaft (Biozönose) und ihrem Lebensraum (Biotop).

#### Ozon

(griech. das Riechende). Aus drei Sauerstoffatomen bestehendes Molekül; chemisches Zeichen O<sub>3</sub>. Die Hauptmenge des atmosphärischen Ozons befindet sich in der Stratosphäre zwischen zwölf und vierzig Kilometer und wird hier durch photochemische Spaltung von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) gebildet. Die Ozonmenge in der Troposphäre repräsentiert etwa ein Zehntel der Ozongesamtmenge. Die Hauptquelle ist hier die photochemische Bildung durch → Kohlenwasserstoffe und → Stickoxide auf Grund der Smog-Mechanismen.

Während Ozon in der Troposphäre stark negative Auswirkungen hat (giftig für Tiere, Menschen und Pflanzen; Verstärkung des Treibhauseffektes), wirkt das Ozon in der Stratosphäre als lebensnotwendiger UV-B-Filter.

#### Ozonloch

1985 wurde entdeckt, daß seit 1977 über der Antarktis während der Monate September und Oktober drastische Abnahmen der Ozonkonzentration stattfinden. Mittlerweile steht fest, daß das jährlich wiederkehrende Ozonloch durch industriell hergestellte → Fluorchlorkohlenwasserstoffe verursacht wird.

#### Ozonschicht

Schicht in der → Stratosphäre in der der größte Teil des atmosphärischen Ozons enthalten ist. Sie liegt etwa zwischen 15 und 30 Kilometer Höhe.

In der Ozonschicht wird die energiereiche UV-B-Strahlung absorbiert und in Wärme umgewandelt. Verringerungen der Ozongesamtäulendichte haben Intensitätszunahmen der zellschädigenden UV-B-Strahlung am Erdboden zur Folge. Des weiteren kann die Änderung der Ozonschicht zu einer Beeinflussung des → Klimas führen. Durch industriell hergestellte → FCKW wird die Ozonschicht in zunehmendem Maße zerstört.

#### Ozonerstörungspotential

Maß für die relative Ozonwirksamkeit chlor- und bromhaltiger Verbindungen. FCKW 11 ist dabei als Bezugsgröße gewählt und mit dem Wert 1 festgesetzt.

#### Paläoklimatische Daten

Klimadaten (wie z. B. Temperatur) aus der Erdgeschichte. Diese Daten können aus Eisbohrkernen, aus Ablagerungen auf dem Meeresboden, aus Baumringanalysen sowie aus Pollenanalysen gewonnen werden.

#### Partialanalytisch

nur ein begrenzter, genau definierter Ausschnitt des gesamten relevanten Systems wird in die Analyse einbezogen; Interdependenzen mit den übrigen Systemkomponenten sollen schwach ausgeprägt sein, sodaß ihre Vernachlässigung die Analyseergebnisse nicht maßgeblich verschlechtert.

#### Pedosphäre

Bodenzone; Grenzbereich der Erdoberfläche, in dem sich Gestein, Wasser, Luft und Lebewesen durchdringen und in der die bodenbildenden Prozesse stattfinden.

#### Photochemisch

Unter Einwirkung von UV-Strahlung ablaufende chemische Reaktion.

#### Photolyse

Zersetzung von Molekülen durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung.

#### Photosphäre

gasförmige Schicht der Sonne, aus der das sichtbare Licht der Sonne stammt.

#### Photosynthese

Der Aufbau von Kohlehydraten durch grüne Pflanzen aus Kohlendioxid und Wasser mit Hilfe des Sonnenlichts.

**Phytotoxische Stoffe**

Stoffe, die giftig bzw. schädigend für Pflanzen sind.

**Plankton**

Lebensgemeinschaft im freien Wasser schwebender Organismen mit fehlender oder geringer Eigenbewegung. Zooplankton: planktische Tiere, Phytoplankton: planktische Pflanzen.

**Polarnacht**

Die Zeit, in der die Sonne länger als 24 Stunden unter dem Horizont bleibt, zutreffend für Orte zwischen den Polen und den Polarkreisen. Die Dauer der Polarnacht wächst mit geographischer Breite und beträgt im Bereich der Pole nahezu ein halbes Jahr.

**Präzession**

Kreiselförmige Drehbewegung der Erdachse um ihre Figurenachse, hervorgerufen durch die Schwerkraft von Sonne und Mond. Eine Drehbewegung dauert etwa 20 000 Jahre.

**Primärenergie**

Unter Primärenergie versteht man die Rohstoffe zur Energiegewinnung, d. h. Primärenergieträger sind alle Energieträger, die natürlich vorkommen, z. B. die → fossilen Brennstoffe Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas, Ölschiefer, Teersande oder die Kernbrennstoffe Uran, Torium oder die → erneuerbaren Energiequellen, z. B. Wasserkraft, Windkraft, Sonne, Erdwärme, Biomasse.

**Primärwald**

Urwald; im strengsten Sinne ein autochtoner Waldbestand, dessen Entwicklung nicht oder nur so wenig vom Menschen beeinflusst wurde, daß seine Physiognomie von der natürlichen Umwelt geformt und bestimmt wird.

**Radiative Forcing**

Englischer Ausdruck für „Antrieb innerhalb des Klimasystems durch Beeinflussung des Strahlungshaushalts der Erde“. Die Summe aller dieser Antriebe bestimmt den Zustand des Klimas. Eine Klimaänderung wird durch die Änderung des Antriebs eines Klimaparameters ausgelöst.

**Radikal**

Atom oder Molekül mit ungepaarten Elektronen. Diese entstehen meist unter Einwirkung von UV-Licht oder Wärme und sind sehr reaktiv.

**Radiometer**

Meßinstrument der Satelliten, das die Strahldichte von der Erde und der Atmosphäre mißt, die als Rohdaten der Satelliten fungieren. Die Radiometer messen die Strahlung von Satelliten in verschiedenen Spektralbereichen aus, z. B. im nahen Infrarot. Sie messen die Strahldichten der Reihe nach auf allen Gitterpunkten der Erde. Aus den Daten der Strahldichte werden später die gewünschten Informationen wie Charakter der Wolken oder der Wolkenbedeckungsgrad oder auch die Art der Landnutzung gewonnen.

**Rauhigkeit**

Maß für den Widerstand, den die Erdoberfläche der Luftströmung entgegensetzt.

**Referenzmodell**

als Vergleichsmaßstab herangezogenes Modell.

**Respiration**

Zusammenfassender Begriff für verschiedene biochemische Vorgänge in der Pflanze. In allen Fällen handelt es sich letztlich um die Nutzung der photosynthetisch hergeleiteten Kohlehydrate für Wachstum, Nährstoffentnahme, Unterhalt und Ersatz des Gewebes.

**Ressourcen**

Ressourcen sind einer weiten Begriffsdefinition folgend alle Bestände der Produktionsfaktoren Arbeit, Boden und Kapital, die bei der Produktion von Gütern eingesetzt werden können. Im engeren Sinn werden unter Ressourcen Rohstoffe und Energieträger verstanden, wobei zwischen regenerierbaren und nichtregenerierbaren Ressourcen unterschieden wird. Dem Bericht liegt die engere Begriffsbildung zugrunde.

**Savanne**

Vegetationsform der → semi-ariden Tropen, bei der Grasfluren von einzelnen Bäumen oder Bauminseln durchsetzt sind. Mit zunehmender Feuchte verdichten sich die Gehölze und gehen über in eine Waldformation.

**Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)**

Farbloses, stechend riechendes Schadgas, das überwiegend bei der Verbrennung schwefelhaltiger Energieträger (Kohle, Erdöl) und in geringerem Umfang bei industriellen Prozessen entsteht (→ Saurer Niederschlag).

**Schwefelsäure-Aerosol**

Hauptbestandteil der stratosphärischen Aerosolschicht (in Höhen zwischen 15 und 25 km). Das Verhältnis zwischen Schwefelsäure und Wasser liegt bei 3:1.

**Sekundärenergie**

Sekundärenergieträger sind alle Energieträger, die als Ergebnis eines Umwandlungsprozesses (z. B. in Raffinerien oder Kraftwerken) aus → Primärenergieträgern entstehen, z. B.: die Kohleprodukte Koks und Briketts, die Mineralölprodukte Benzin und Heizöl, die Gasprodukte Stadtgas und Raffineriegas sowie elektrischer Strom und Fernwärme.

**Semi-arid**

Halbtrockenes Klima mit drei bis sechs feuchten Monaten.

**Sensitivitätsabschätzung**

Hier: Abschätzung der Wirkungsweise verschiedener, das Klima beeinflussender Faktoren.

**Solarkonstante**

1373 Watt pro m<sup>2</sup>. Dies ist die Strahlungsflußdichte (Strahlungsenergie pro Zeit- und Flächeneinheit) der Sonne, die im mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde (150 Mio. km) auf einer Einheitsfläche senkrecht zur Strahlrichtung der Sonne vom Außenrand der Atmosphäre empfangen wird.

**Sommersmog**

Starke Luftverschmutzung, die bei austauscharmer Witterung (z. B. bei Inversionen) über Ballungsgebieten auftritt. Beim Sommersmog entstehen unter Einwirkung von Sonnenstrahlung giftige Stickstoffverbindungen aber auch Ozon. Dies führt bei Menschen insbesondere zu Reizungen der Atemwege und der Augen.

**Sonnenfleckenaktivität**

→ Sonnenfleckenzyklus.

**Sonnenfleckenzyklus**

Periode von im Durchschnitt 11 Jahren, in der die Anzahl der Sonnenflecken (Gebiete mit einer im Vergleich zur Sonnenoberfläche geringeren Oberflächentemperatur) auf der Oberfläche der Sonne einen Zyklus durchlaufen.

**Spurengase**

Gase, die nur in Spuren in der Atmosphäre vorkommen, z. B. CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, FCKW.

**Stickoxide**

NO<sub>x</sub> wird fast ausschließlich in Form von NO an die Atmosphäre abgegeben. Da sich sehr schnell ein photochemisches Gleichgewicht zwischen NO und NO<sub>2</sub> einstellt, spricht man im allgemeinen von NO<sub>x</sub> als der Summe von NO und NO<sub>2</sub>. NO<sub>x</sub> entsteht bei Verbrennungsprozessen mit hohen Temperaturen – vor allem durch Kraftfahrzeuge und Kraftwerke (→ Saurer Niederschlag, → Ozon).

**Strahlungshaushalt**

Differenz zwischen aufgenommener und abgegebener Strahlung (z. B. Licht, Wärme).

**Stratopause**

→ Atmosphäre.

**Stratosphäre**

→ Atmosphäre.

**Subsidiaritätsprinzip**

Gesellschafts- und sozialpolitisches Prinzip, nach dem übergeordnete Einheiten (z. B. Länder) nur die Aufgaben erfüllen

sollen, die auf untergeordneter Ebene (z. B. Gemeinden) nicht übernommen werden können.

#### **Sukzession**

Durch äußere Einflüsse verursachtes Übergehen einer Pflanzengesellschaft in eine andere am gleichen Standort.

#### **Symbiose**

Zusammenleben ungleicher Lebewesen zu gegenseitigem Nutzen.

#### **symbiotisch**

in Symbiose lebend.

#### **Synergistisch**

Das Zusammenwirken verschiedener Einflußgrößen betrachtend.

#### **Synergie**

Zusammenwirken; „Das Gesamte hat eine andere Qualität als die Summe der Einzelteile“.

#### **Synergistisch**

Das Zusammenwirken verschiedener Einflußgrößen betrachtend.

#### **Szenario**

Ermittlung eines möglichen Zustandes unter der Annahme bestimmter Bedingungen. Die Ergebnisse sind unabhängig von den Randbedingungen der Szenarien und unterscheiden sich daher von Prognosen.

#### **Teilhaletierte FCKW**

→ Fluorchlorkohlenwasserstoff.

#### **Terrestrisch**

land-; an Land vorkommend.

#### **Thermosphäre**

→ Atmosphäre.

#### **Transaktionskosten**

Kosten, die bei wirtschaftlichen Aktionen anfallen (z. B. bei Tauschvorgängen am Markt), darunter fallen Informationsbeschaffungs-, Verhandlungskosten, Kosten der Risikoabsicherung etc.

#### **Transpiration**

Verdunstung von Wasser aus den Spaltöffnungen der Pflanzen.

#### **Treibhauseffekt**

Der Treibhauseffekt wird von Gasen in der Atmosphäre hervorgerufen, die die kurzweilige Sonnenstrahlung nahezu ungehindert durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche passieren lassen, die langweilige Wärmestrahlung der Erdoberfläche und der Atmosphäre hingegen stark absorbieren. Aufgrund der wärmeisolierenden Wirkung dieser Spurengase ist die Temperatur in Bodennähe um etwa 30 °C höher als die Strahlungstemperatur des Systems Erde- Atmosphäre ohne diese Gase (natürlicher Treibhauseffekt). Wegen des Anstiegs menschlich bedingter Spurengase wird mit einer Verstärkung des Treibhauseffektes, die mit → zusätzlicher Treibhauseffekt bezeichnet wird, und einer Temperaturerhöhung gerechnet.

#### **Treibhausgas**

Gas in der Atmosphäre, das am Treibhauseffekt beteiligt ist (Wasserdampf, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, FCKW).

#### **Tropen**

Gebiete, die sich durch ein Tageszeitenklima auszeichnen. Hier sind die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht größer als die zwischen Sommer und Winter bzw. zwischen Regen- und Trockenzeit.

#### **Tropopause**

→ Atmosphäre.

#### **Troposphäre**

→ Atmosphäre.

#### **Ultraviolettstrahlung**

Abkürzung „UV“; Elektromagnetische Energie mit höheren Frequenzen bzw. kürzeren Wellenlängen (unter 400 µm) als sichtbares Licht; die UV-Strahlung unterteilt sich in drei Bereiche: UV-A (320-400 µm), UV-B (280-320 µm) und UV-C (40-290 µm).

#### **Validation**

Überprüfung der Gültigkeit (z. B. bei Klimamodellergebnissen).

#### **Verweilzeit**

Mittlere Lebenszeit eines Gases in der Atmosphäre.

#### **Warmzeit**

Zeitspannen der Klimageschichte der Erde, in denen die mittlere Temperatur auf der Erde relativ hoch war.

#### **Wasserdampfenster**

→ Atmosphärisches Strahlungsfenster.

#### **Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO)**

Die Konvention zur Gründung der WMO wurde 1947 auf der Zwölften Konferenz der Direktoren der Internationalen Organisation für Meteorologie in Washington angenommen und trat am 23. März 1950 in Kraft. Die WMO soll

- die internationale Zusammenarbeit bei der Schaffung eines Netzes von meteorologischen Beobachtungsstationen und Wetterdienstzentren erleichtern;
- die Entwicklung von Systemen fördern, die einen raschen Austausch von Wettermeldungen ermöglichen;
- die Standardisierung meteorologischer Beobachtungsmethoden fördern und die Vereinheitlichung der Veröffentlichungen von Beobachtungen und Statistiken sicherstellen;
- für die vermehrte Anwendung der meteorologischen Kenntnisse bei der Luftfahrt, Schifffahrt, in der Landwirtschaft und auf anderen Gebieten sorgen;
- Anregungen zur Forschung und Ausbildung auf dem Gebiet der Meteorologie geben und Hilfe bei der Koordinierung der internationalen Aspekte solcher Programme leisten.

#### **Zirkulationsmodell**

Klimamodell.

#### **zonal**

Parallel zu den Breitenkreisen verlaufend.

#### **Zyklone**

Tiefdruckgebiet.

## Abkürzungsverzeichnis

ALTERNER	Gemeinschaftsaktion zur Kommerzialisierung erneuerbarer Energien
BAHC	Biosphere Aspects of the Hydrological Cycle
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
EASOE	European Artic Stratospheric Ozone Experiment
ECE	Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa
ECO/Fin-Rat	Rat der Wirtschafts- und Finanzminister der Europäischen Gemeinschaft
EFTA	European Free Trade Association
EG	Europäische Gemeinschaften
EPA	Environmental Protection Agency (Amerikanische Umweltschutzbehörde)
EPOCH	Europäisches Programm für Klimatologie und natürliche Risiken
F&E	Forschung und Entwicklung
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisationen der Vereinten Nationen)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GATT	General Agreement on Tariffs and Trade (Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen)
GCTE	Global Change and Terrestrial Ecosystems
GEWEX	Global Energy and Water Cycle Experiment
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GuD	Gas- und Dampfturbinen-Technik
GUS	Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (ehemalige Sowjetunion)
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
H-FCKW	Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergiebehörde)
ICSU	International Council of Scientific Unions
IEA	International Energy Agency (Internationale Energie-Agentur)
IGAC	International Global Atmospheric Chemistry Program
IGBP	International Geosphere – Biosphere Project
INC	Intergovernmental Negotiating Committee
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project
ISLSCP	International Satellite Land Surface Climatology Project
JGOFS	Joint Global Ocean Flux Study
JOULE	Nichtnukleare Energie und rationelle Energienutzung
KD	Kommissionsdrucksache
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MPI	Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research, Boulder, USA
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
NMVOG	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozonzerstörungspotential)
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung der westlichen Industrieländer u. Japan)
PAGES	Past Global Changes
SAGE	Stratospheric Aerosol and Gas Experiment

SAVE	Specific Action for Greater Energy Efficiency
STEP	Wissenschaft und Technologie für den Umweltschutz
THERMIE	Förderung von Energietechnologien für Europa
TOGA	Tropical Ocean – Global Atmosphere Program
UN	Vereinte Nationen
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UNEP	United Nations Environment Program
UV	Ultraviolettstrahlung
VOC	Flüchtige organische Verbindungen
WCRP	World Climate Research Program
WMO	World Meteorological Organization
WOCE	World Ocean Circulation Experiment
WWF	World Wide Fund for Nature

## Einheiten und chemische Formeln

### Chemische Formeln

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
CCl <sub>3</sub> F	FCKW 11
CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	FCKW 12
CClF <sub>3</sub>	FCKW 13
C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	FCKW 114
C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	FCKW 113
C <sub>2</sub> ClF <sub>5</sub>	FCKW 115
CHClF <sub>2</sub>	Chlordifluormethan (H-FCKW 22)
CF <sub>2</sub> BrCl	Halon 1211
C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Br <sub>2</sub>	Halon 1301
CBrF <sub>3</sub>	Halon 2402
CCl <sub>4</sub>	Tetrachlorkohlenstoff
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	Methylchloroform
CH <sub>3</sub> Cl	Methylchlorid
CH <sub>3</sub> Br	Methylbromid
ClO	Chlormonoxid
BrO	Bromoxid
HF	Fluorwasserstoff
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CH <sub>4</sub>	Methan
N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid
OH	Hydroxylradikal
O <sup>•</sup>	angeregtes Sauerstoffatom
CO	Kohlenmonoxid
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
HCl	Salzsäure
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Sulfat
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	Kohlenwasserstoff
<sup>16</sup> O bzw. <sup>18</sup> O	Sauerstoffisotop mit dem Molekulargewicht
Si <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Siliciumoxid
MgO	Magnesiumoxid
O	atomarer Sauerstoff
O <sub>2</sub>	molekularer Sauerstoff
N	atomarer Stickstoff
N <sub>2</sub>	molekularer Stickstoff
H	Wasserstoff
Cl	Chlor
Cl <sub>2</sub>	molekulares Chlor
Br	Brom
F	Fluor

### Vorsätze und Vorsatzzeichen-Erklärungen

Piko	p	10 <sup>-12</sup>	Billionstel
Nano	n	10 <sup>-9</sup>	Milliardstel
Mikro	μ	10 <sup>-6</sup>	Millionstel
Milli	m	10 <sup>-3</sup>	Tausendstel
Kilo	k	10 <sup>3</sup>	Tausend
Mega	M	10 <sup>6</sup>	Million
Giga	G	10 <sup>9</sup>	Milliarde
Tera	T	10 <sup>12</sup>	Billion
Peta	P	10 <sup>15</sup>	Billiarde
Exa	E	10 <sup>18</sup>	Trillion

**Maße und Einheiten****(a) basierend auf dem internationalen Einheitensystem SI-Système International d'Unités (Auswahl)**

Meter	m	für die Länge
Sekunde	s	für die Zeit
Kilogramm	kg	für die Masse
Kelvin	K	für die thermodynamische Temperatur
Hertz	(1 Hz = 1 s <sup>-1</sup> )	für die Frequenz

**abgeleitete Einheiten**

Newton	(1 N = 1 kg ms <sup>-2</sup> )	für die Kraft
Pascal	(1 Pa = 1 N m <sup>-2</sup> )	für den Druck <sup>1)</sup> bzw. für die Spannung
Joule	(1 J = 1 N m)	für die Arbeit, die Energie und die Wärmemenge
Watt	(1 W = 1 J s <sup>-1</sup> )	für die Leistung

sowie:

1 m <sup>2</sup>	für die Flächeneinheit
1 m <sup>3</sup>	für die Raumeinheit (Volumen)
1 ms <sup>-1</sup>	für die Geschwindigkeit
1 ms <sup>-2</sup>	für die Beschleunigung
1 kg m <sup>-3</sup>	für die Dichte
1 m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	für das spezifische Volumen

**(b) Nicht-SI-Einheiten (Auswahl)**

°C	Grad Celsius (0°C entspricht ungefähr 273 K) Temperaturdifferenzen werden z. T. auch in °C (=K) angegeben. Die korrekte Angabe wäre „Grad Celsius“
ppm	Mischungsverhältnis: 10 <sup>-6</sup> = 1 Teil auf eine Million
ppb	Mischungsverhältnis: 10 <sup>-9</sup> = 1 Teil auf eine Milliarde
ppt	Mischungsverhältnis: 10 <sup>-12</sup> = 1 Teil auf eine Billion
BP	(bp) englisch: years before present
GtC	Giga-Tonnen Kohlenstoff 1 Gt C = 3,7 Gt CO <sub>2</sub>

**Energieeinheiten, Vorsätze, Vorsatzzeichen und Umrechnungsfaktoren****verbindliche Einheit:** Joule (J)<sup>2)</sup>

1 Joule (J) = 1 Newtonmeter (Nm) = 1 Wattsekunde (Ws)

**gebräuchliche Energieeinheiten:**

1 Terawattstunde	= 1 TWh	= 1x109 kWh = 3,6 PJ
1 Terawattstunde	= 1 TWh	= 0,123 Mio. t SKE
1 Million Tonnen Steinkohleneinheiten	= 1 Mio. t SKE	= 29,308 PJ
		= 8,15 TWh
1 Exajoule	= 1 EJ = 1000 PJ	= 278 TWh

**Vorsätze und Vorsatzzeichen**

Kilo	k	10 <sup>3</sup>	Tausend
Mega	M	10 <sup>6</sup>	Million
Giga	G	10 <sup>9</sup>	Milliarde
Tera	T	10 <sup>12</sup>	Billion
Peta	P	10 <sup>15</sup>	Billiarde
Exa	E	10 <sup>18</sup>	Trillion

**Umrechnungsfaktoren**

Einheit	kJ	kWh	kg SKE
1kJ	–	0,000278	0,000034
1kWh	3600	–	0,123
1 kg SKE	29308	8,14	–

1) Im Wetterdienst darf auch noch 1 mbar =  $10^2$  Pa als Druckeinheit Verwendung finden.

2) Für die Bundesrepublik Deutschland gilt ab 1. Januar 1978 als gesetzliche Einheit für Energie verbindlich das Joule. Die Kalorie (cal) und davon abgeleitete Einheiten wie Steinkohleeinheiten (SKE) und Rohöleinheiten (RÖE) (1 SKE = 0,7 RÖE) können für eine Übergangszeit nur noch hilfsweise zusätzlich verwendet werden.

## Verzeichnis der Kommissionsdrucksachen

Nr.	Titel	Datum
1	<b>Fragen- und Sachverständigenkatalog</b> für die öffentliche Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 25./26. November 1991 zum Thema: „Beitrag der Landwirtschaft zu direkt und indirekt wirksamen treibhausrelevanten Spurenstoffen in der Troposphäre und Auswirkungen“ (liegt auch in Englisch ohne eigene Nummer vor)	... Oktober 1991
zu 1	<b>Nachbenennung von Sachverständigen</b>	
1-a	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/1) für die öffentliche Anhörung am 25./26. November 1991  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. Meinrat O. Andreae Ralf Conrad Dr. Isermann Prof. Dr. Daniel H. Kohl Dr. Lex Bouwmann Prof. Dr. Sauerbeck + Prof. Dr. Haider (FAL) Prof. Dr. Klingauf	14. November 1991
1-b	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/1) für die öffentliche Anhörung am 25./26. November 1991  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Dr. Jutta Sciborsci H. U. Neue Prof. Dr. O. Fränzle Dr. David Norse Dr. Jürgen Heyer Dr. O. T. Denmead Dr. L. Benzing-Purdie Prof. Dr. C. J. Soeder Prof. Dr. H. W. Scharpenseel	14. November 1991
1-c	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/1) für die öffentliche Anhörung am 25./26. November 1991  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. Carl J. Soede John M. Reilly Dr. Klaus Isermann	14. November 1991
1-d	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/1) für die öffentliche Anhörung am 25./26. November 1991  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Dr. Klaus Isermann Prof. Dr. H. Rennenberg	14. November 1991

Nr.	Titel	Datum
1-e	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/1) für die öffentliche Anhörung am 25./26. November 1991  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. M. O. Andreae Prof. S. K. Sinha Dr. K. Isermann	29. November 1991
1-f	<b>Unterlagen der Sachverständigen zur Anhörung</b> Unterlagen, die von den folgenden Sachverständigen in die öffentliche Anhörung am 25./26. November 1991 eingebracht wurden: Prof. Dr. M. O. Andreae A. F. Bouwman Prof. Dr. Fränzle Dr. Isermann Prof. Dr. D. R. Sauerbeck Prof. Sinha Prof. Dr. Söder Prof. Dr. Scharpenseel	29. November 1991
1-g	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/1) für die öffentliche Anhörung am 25./26. November 1991  Enthält die Stellungnahme des Sachverständigen: Prof. Dr. Scharpenseel	19. Dezember 1991
2	<b>Fragen- und Sachverständigenkatalog</b> für die nichtöffentliche Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 11. November 1991 zum Thema: „Instrumente“	11. Oktober 1991
3.	<b>Fragen- und Sachverständigenkatalog</b> für die öffentliche Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 28./29. Januar 1992 zum Thema: „Anhörung im internationalen politischen Bereich über Willensbildung und Maßnahmen zum Schutz des globalen Klimas“ (liegt auch in Englisch, Französisch, Spanisch und Russisch ohne eigene Nummer vor)	... November 1991
3-a	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/3) für die öffentliche Anhörung am 28./29. Januar 1992  Enthält die Stellungnahmen folgender Regierungs- und Organisationsvertreter: Venezuela Weltbank OPEC IEA Japan Schweiz	20. Januar 1992

Nr.	Titel	Datum
3-b	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/3) für die öffentliche Anhörung am 28./29. Januar 1992  Enthält die Stellungnahmen folgender Regierungs- und Organisationsvertreter: Norwegen OECD Polen Ägypten CSFR Niederlande	23. Januar 1992
3-c	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/3) für die öffentliche Anhörung am 28./29. Januar 1992  Enthält die Stellungnahmen folgender Regierungs- und Organisationsvertreter: Argentinien Algerien Indonesien Polen China Kenya Kirgisien Japan Norwegen	28. Januar 1992
3-d	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/3) für die öffentliche Anhörung am 28./29. Januar 1992  Enthält die Stellungnahmen folgender Regierungs- und Organisationsvertreter: Weltbank Dänemark Kenya Ukraine Ägypten Mexiko Indonesien Japan	3. Februar 1992
3-e	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> die zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/3) in die öffentliche Anhörung am 28./29. Januar 1992 eingebracht wurden  Enthält die Stellungnahmen folgender Regierungs- und Organisationsvertreter: IEA Schweden OECD	5. Februar 1992
4	<b>Fragen- und Sachverständigenkatalog</b> für die Öffentliche Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 16./17. Januar 1992 zum Thema: „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“ (liegt auch in Englisch ohne eigene Nummer vor)	5. November 1991

Nr.	Titel	Datum
4-a	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/4) für die öffentliche Anhörung am 16./17. Januar 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. J. Oerlemans Dr. U. Cubash Prof. Dr. Schumann R. Swart J. Fishman Prof. Dr. Schönwiese Prof. Dr. Sauerbeck	2. Januar 1992
4-b	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/4) für die öffentliche Anhörung am 16./17. Januar 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. Dr. B. Ulrich Prof. Dr. H. Flohn Prof. Dr. R. Zellner Prof. Dr. H. Jäger Prof. Dr. Dr. B. Frenzel Dr. G. P. Hekstra L. D. D. Harvey	7. Januar 1992
4-c	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/4) für die öffentliche Anhörung am 16./17. Januar 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. D. Kley Prof. Dr. H. Kenneweg Dr. J. Lelieveld J. Heinzenberg	8. Januar 1992
4-d	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/4) für die öffentliche Anhörung am 16./17. Januar 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Dr. F. Arnold VCI	13. Januar 1992
4-e	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/4) für die öffentliche Anhörung am 16./17. Januar 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Dr. R. A. Cox Prof. Dr. G. H. Kohlmaier	14. Januar 1992
4-f	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/4) für die öffentliche Anhörung am 16./17. Januar 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: L. D. D. Harvey D. Bojkov Prof Dr. E. F. Bruenig	15. Januar 1992

Nr.	Titel	Datum
4-g	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/4) für die öffentliche Anhörung am 16./17. Januar 1992 Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. Kohlmaier Prof. Dr. Burschel Prof. Dr. D. Sauerbeck H. Oeschger, F. Joos, U. Siegentaler Dr. Janz N. Myers GSF Prof. Dr. Flohn Prof. Dr. Kohlmaier	27. Januar 1992
4-h	<b>Unterlagen der Sachverständigen zur Anhörung</b> Unterlagen, die von den folgenden Sachverständigen in die öffentliche Anhörung am 16./17. Januar 1992 eingebracht wurden: Dr. F. Arnold Prof. Dr. Kenneweg Prof. Dr. Burschel Dr. Sauter Prof. Dr. Schönwiese D. D. Harvey Dr. Lelieveld R. Bojkov Dr. Hekstra Dr. Jäger Dr. J. Fishman Prof. Dr. Kohlmaier	22. Januar 1992
4-i	<b>Unterlagen der Sachverständigen zur Anhörung</b> Unterlagen, die von den folgenden Sachverständigen in die öffentliche Anhörung am 16./17. Januar 1992 eingebracht wurden: Prof. Dr. P. Burschel K. Janz	20. Februar 1992
5	<b>Fragen- und Sachverständigenkatalog</b> für die öffentliche Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 17./18. Februar 1992 zum Thema: „Beitrag der Landwirtschaft zu direkt und indirekt wirksamen treibhausrelevanten Spurenstoffen in der Troposphäre und Auswirkungen“: 2. Teil (liegt auch in Englisch ohne eigene Nummer vor)	19. Dezember 1991
5-a	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/5) für die öffentliche Anhörung am 17./18. Februar 1992 Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. Lieth Prof. Dr. Scharpenseel Prof. Dr. Sauerbeck Prof. Dr. Kranz	3. Februar 1992

Nr.	Titel	Datum
5-b	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/5) für die öffentliche Anhörung am 17./18. Februar 1992 Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Dr. S. C. van der Geijn Dr. H. J. Weigel Prof. Dr. K. Haider	7. Februar 1992
5-c	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/5) für die öffentliche Anhörung am 17./18. Februar 1992 Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. H. Weltzien J. Goudriaan	12. Februar 1992
5-d	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/5) für die öffentliche Anhörung am 17./18. Februar 1992 Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. Kohlmaier Prof. Dr. Newman Prof. Dr. Krupa Dr. H. H. Rogers et al. Dr. J. E. Miller et al. Dr. J. I. L. Morison Prof. Dr. Tevini Prof. Dr. Kohlmaier Prof. Dr. Frenzel Dr. Enoch Prof. Dr. Runeckles	17. Februar 1992
5-e	<b>Unterlagen der Sachverständigen zur Anhörung</b> Unterlagen, die von den folgenden Sachverständigen in die öffentliche Anhörung am 17./18. Februar 1992 eingebracht wurden Dr. J. I. L. Morison Dr. Rogers Prof. Dr. Scharpenseel Dr. van der Geijn Dr. Allen Dr. Bazzaz Dr. Sombroek Dr. Rogers	20. Februar 1992
6	<b>Fragen- und Sachverständigenkatalog</b> für die Öffentliche Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 9./10. März 1992 zum Thema: „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“; 2. Teil (liegt auch in Englisch ohne eigene Nummer vor)	19. Dezember 1991
6-a	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/6) für die öffentliche Anhörung am 9./10. März 1992 Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. K. Haider Prof. Dr. E. Plate Prof. Dr. Liebscher	5. Februar 1992

Nr.	Titel	Datum
6-b	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/6) für die öffentliche Anhörung am 9./10. März 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Dr. G. Berz Dr. B. Schädler	5. Februar 1992
6-c	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/6) für die öffentliche Anhörung am 9./10. März 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. E. Salati Prof. Dr. Künzi	9. Februar 1992
6-d	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/6) für die öffentliche Anhörung am 9./10. März 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Dr. Jay Zwally Jack. K. Winjum Prof. Dr. P. J. Crutzen	9. Februar 1992
6-e	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/6) für die öffentliche Anhörung am 9./10. März 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Jack. K. Winjum et al	9. Februar 1992
6-f	<b>Stellungnahmen der Sachverständigen</b> zu dem Fragenkatalog (KDrucksache 12/6) für die öffentliche Anhörung am 9./10. März 1992  Enthält Stellungnahmen folgender Sachverständiger: Prof. Dr. Zellner Prof. Dr. Künzi Prof. Dr. Salati Prof. Dr. Crutzen Prof. Dr. Sauerbeck Prof. Dr. Schellnhuber Prof. Dr. Berz Prof. Dr. Plate Prof. Dr. Kahn	13. Februar 1992

## Literaturverzeichnis

- Andreae, M. O.: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 25./26. November 1991, Kommissionsdrucksache 12/1-e.
- Bazzaz, F. A. und E. D. Fajer: Plant life in a CO<sub>2</sub>-rich World, in: Scientific American, Jan. 1992, S. 68–74
- Berger, A.: The Milankovitch astronomical theory of paleoclimates: a modern review. Vistas in Astronomy, Band 24, 1980, S. 103–122
- Berz, G.: Klimaänderung und Versicherung. Bericht für die öffentliche Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“. Bonn, März 1992
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft): Energie Daten '90. Entwicklung für die Bundesrepublik Deutschland. Bonn, Dezember 1991
- Bolin, B. et al. (Hrsg.): The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems, 1986
- Bouwman, A. F.: Land use related sources and sinks of greenhouse gases. Present emissions and possible future trends Land Use Policy, April 1990, 154–164.
- Bouwman, A. F. (Hrsg.): Soils and the Greenhouse Effect, Wageningen, 1989
- Bouwman, A. F.: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 25./26. November 1991, Kommissionsdrucksache 12/1- a.
- Bradley, R. S., Diaz, H. F., Eischeid, J. K., Jone, P. D., Kelly, P. M., und Goodess, C. M.: Precipitation fluctuations over northern Hemisphere land areas since the mid-19th century. Science, Band 237, 1987, S. 171–175
- Brown, L. R.: State of the World 1990. Norton & Co., N. Y. 1990.
- Brunke, E.-G., Scheel, H. E., und Seiler, W.: Trends of tropospheric CO, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> as observed at Cape Point, South Africa. Atmos. Environ., Band 24 A, 1990, S. 585–595
- BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland) (Hrsg.): Der Verkehr – die unterschätzte Klimagefahr. Freiburg, Januar 1992
- Bundesregierung: 5. Immissionsschutzbericht 1992
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Beschluß der Bundesregierung zur Reduzierung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland auf der Grundlage des Zweiten Zwischenberichts der Interministeriellen Arbeitsgruppe „CO<sub>2</sub>-Reduktion“ (IMA); Bonn, 11. 12. 1991
- Burschel, P.: Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 16./17. Januar 1992 in Bonn, KD 12/4-i, S. 2–23
- Climate Action Network – UK: Sea Level Rise Impact – Special Report, in: Hot News, Issue 5, Winter 1992
- Coakley, J. A., Bernstein, R. L., und Durkee, P. A.: Effect of ship stack effluents on cloud reflectivity. Science, Band 237, 1987, S. 1020–1022
- Crutzen, P.; K. Heinloth: Mündliche Stellungnahmen des Sachverständigen P. Crutzen und des Kommissionsmitglieds K. Heinloth im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 25./26. November 1991.
- Crutzen, P. J.: Methane, sinks and sources. Nature, Band 350, 1991, S. 380–381
- Cubasch, U.: Zukünftige Klimaänderungsraten und die regionale Verteilung der Klimaänderung. Bericht für die öffentl. Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“ am 16./17. Januar 1992 in Bonn
- Del Genio, A., Laci, A. A., und Ruedy, R. A.: Simulation of the effect of a warmer climate on atmospheric humidity. Nature, Band 351, 1991, S. 382–385
- DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung): Entwicklung des Energieverbrauchs und seiner Determinanten in der ehemaligen DDR – Kurzfassung. Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Wirtschaft. Bonn, Juli 1991
- Ebel et al.: Energiesparpotentiale im Gebäudebestand; Darmstadt, 1990
- Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des 11. Deutschen Bundestages: Schutz der tropischen Wälder (2. Bericht), Bonn, 1990 Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des 11. Deutschen Bundestages: Schutz der Erde – Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik (3. Bericht), 2 Bände, Bonn, 1990
- Esser, G.: Modelling Global Terrestrial Sources and Sinks of CO<sub>2</sub> with Special Reference to Soil Organic Matter, in: Bouwman, A. F. (Hg.): Soils and the Greenhouse Effect, Wageningen, 1989
- Europäische Gemeinschaft, ECO/Fin-Rat: Protokoll der 1546. Ratstagung; 16. 12. 1991 (Entwurf); Brüssel, 1991
- Europäische Gemeinschaft, Generaldirektion XII: Cost Effectiveness Analysis of CO<sub>2</sub> Reduction Options (Synthesis Report); Brüssel, 1991
- Europäische Gemeinschaft, Kommission: Mitteilung der Kommission an den Rat: eine Gemeinschaftsstrategie für weniger Kohlendioxidemissionen und mehr Energieeffizienz; Brüssel, 14. 10. 1991
- Europäische Gemeinschaft, Kommission: Verkehrsmarkt Europa, Kommission der Europäischen Gemeinschaft, Generaldirektion Verkehr. Brüssel, Juni 1991
- Europäische Gemeinschaft, Rat der Umwelt- und Energieminister: Protokoll der 1544. Ratstagung; 13. 12. 1991; Brüssel, 1991 Europäische Gemeinschaft: Für eine dauerhafte und umweltgerechte Entwicklung: ein Programm der Europäischen Gemeinschaft für Umweltpolitik und Maßnahmen im Hinblick auf eine dauerhafte und umweltgerechte Entwicklung (Entwurf); Brüssel, 1992
- Europäische Gemeinschaft: The environment policy of the European Community: a report to the United Nations Conference on the Environment and Development; Brüssel, 1991
- FAO: An Interim Report on the State of Forest Resources in the Developing Countries, Rom, 1988

- FAO: Bericht Nahrungs- und Getreideproduktion Nr. 51–52, 20. Dezember 1991.
- FAO: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landwirtschaft“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5-e.
- FAO: Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 16./17. Januar 1992 in Bonn, KD 12/4-g, S. 72–179
- FAO: The Forest Resources of the ECE-Region (Europe, the USSR, North America). Genf 1983
- Flohn, H.: Wasserdampf als Verstärker des Treibhauseffekts. Bericht für die öffentl. Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“ am 16./17. Januar 1992 in Bonn
- Forum für Zukunftsenergien: Gutachten zum „Vorschlag für die gemeinsame Errichtung eines Sonnenkraftwerks von Industrieländern und einem Entwicklungsland im Sonnengürtel der Erde“. Studie im Auftrag der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, AU 12/183. Bonn, März 1992
- Foukal, P., und Lean, J.: An empirical model of total solar irradiance variation between 1874 and 1988. *Science*, Band 247, 1990, S. 556–558
- Gaffen, D. J., Barnett, T. B., Elliot, W. P.: Space and time scales of global tropospheric moisture. *J. Climate*, Band 4, 1991, S. 989–1008
- GECR (Global Environmental Change Report): Fossil Fuel CO<sub>2</sub> Emissions Declined Last Year, Says Worldwatch. Vol. III. No. 24, 20 December 1991, S. 5f
- Gilliland, R. L.: Solar, volcanic and CO<sub>2</sub> forcing of recent climatic changes. *Climat. Change*, Band 4, 1982, S. 111–131
- Graßl, H., Jahnen, W., Hinrichsen, K., Englisch, G. und Hendel, S.: Methanquellen in der industrialisierten Gesellschaft, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Mai 1991.
- Graßl, H.: Klimaänderung durch Abholzung der Tropenwälder, in: *Entwicklung und Ländlicher Raum*, H. 1/1992, S. 7–10
- Graßl, H.: The influence of aerosol particles on radiative parameters of clouds. *Idójaras*, Band 86, 1992, S. 60–74
- Häder, D.-P. and Worrest, R. C.: Effects of enhanced solar radiation on aquatic ecosystems. *Photochem. Photobiol.* 53, 717–725, 1991.
- Haider, K.: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landwirtschaft“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5-b, 1992a
- Haider, K.: Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung II“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 9./10. März 1992b in Bonn, KD 12/6-a, S. 2–38.
- Halpert, M. S., und Ropelewski, C. F. (Hrsg.): *Climate Assessment. A Decadal Review 1981 – 1990*. U. S. Dep. Commerce, National and Oceanic Administration (NOAA), Climate Analysis Center VII, 1991, 109 Seiten
- Hansen, J., Laci, A., Remy, R., und Sato, M.: Potential climate impact of mount Pinatubo eruption. *Geophys. Res. L.*, Band 19, 1992, („Pinatubo“- Heft)
- Harrison, E. F., Minnis, P., Barkstrom, B. R., Ramanathan, V., Cess, R. D., und Gibson, G. G.: Seasonal variation of cloud-radiative forcing derived from the Earth Radiation Budget Experiment. *J. Geophys. Res.*, Band 95 (D 11), 1990, S. 18687–18703
- Hekstra, G. P.: Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 16./17. Januar 1992 in Bonn, KD 12/4-b, S. 57–68
- Hense, A., Krahe, P., Flohn, H.: Recent fluctuations of tropospheric temperature and water vapour in the tropics. *J. Meteorol. Atmos. Phys.*, Band 38, 1988, S. 215–227
- Hofmann, D. J.: Aircraft sulfur emissions. *Nature*, Band 349, 1991, S. 659
- Hofmann, D. J.: Increase in the stratospheric background sulfuric acid aerosol mass in the past 10 years. *Science*, Band 248, 1990, S. 996–1000
- Husar, R. B., Patterson, D. E., Holloway, J. M., Wilson, W. E., und Ellestad, T. G.: Trends of eastern U. S. haziness since 1948. Fourth Symposium on Turbulence, Diffusion and Air Pollution, January 1979, Reno, Nevada, Amer. Meteorol. Soc., S. 249–256
- IEA (International Energy Agency): *Climate Change Policy Initiatives: Update*. Paris: OECD/IEA, 20 November 1991
- IEA (International Energy Agency): Schriftliche Stellungnahme zur Anhörung im internationalen politischen Bereich über Willensbildung und Maßnahmen zum Schutz des globalen Klimas der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 28./29. 1. 1992; Schriftliche Stellungnahmen I, 20. 1. 1992; KD 12/3-a
- IRRI (International Rice Research Institute): *World rice statistics 1990*. 1991
- Jäger, H.: Lidar observed trend in stratospheric background aerosol. In „*Technical Digest on Optical Remote Sensing of the Atmosphere*“, Band 18, Washington, D. C., 1991, S. 153–155
- Jäger, H.: Stratosphärische Aerosole. Bericht für die öffentl. Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“, Januar 1992, Bonn
- Keeling, C. D., Piper, S. C., und Heimann, M.: A three dimensional model of atmospheric CO<sub>2</sub> transport based on observed winds: 4. Mean annual gradients and interannual variations. In „*Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas*“, D. H. Peterson (Hrsg.), *Geophys. Monograph*, Band 55, AGU, Washington, D. C., 1989, S. 305–363
- Khalil, M. A. K., Rasmussen, R. A., und Shearer, M. J.: Trends of atmospheric methane during the 1960s and 1970s. *J. Geophys. Res.*, Band 94, 1989, S. 18279–18288
- Khalil, M. A. K., und Rasmussen, R. A.: Atmospheric methane: Recent global trends. *Environ. Sci. Technol.*, Band 24, 1990, S. 549–553
- Kimball, B. A.: *Carbon Dioxide and Agricultural Yield: an assemblage and analysis of 770 prior observations: Water conservation laboratory report No. 14*, November 1983. USDA, Agricultural Research Service, Phoenix, Arizona.
- Kohlmaier, G. H.: Das Quellen- und Senkenproblem für atmosphärisches CO<sub>2</sub>. Bericht für die öffentl. Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“, Januar 1992, Bonn
- Kohlmaier, G. H.: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landwirtschaft“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdat-

- mosphäre" am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5.
- Kohlmaier, G. H.: Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 16./17. Januar 1992 in Bonn, KD 12/4-e, S. 3–14
- Krause, F. et al.: Energy Policy in the Greenhouse, Vol II. The Cost of Cutting Carbon Emissions in Western Europe; 1992 (forthcoming)
- Kuhn, M.: Über die Entwicklung der Gletscher in den Alpen. Bericht für die öffentliche Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“, März 1992, Bonn
- Lacis, A. A., Wuebbles, D. J., und Logan, J. A.: Radiative forcing of climate by changes in the vertical distribution of ozone. *J. Geophys. Res.*, Band 95 (D 7), 1990, S. 9971–9981
- Lenz, F.: CO<sub>2</sub>-Effekte auf Pflanzen, in: Huber, M. (Hg.): Umweltkrise, Bonn, 1991, S. 55–65
- Liu, S. C., McKeen, S. A., und Madronich, S.: Effect of anthropogenic aerosols on biologically active ultraviolet radiation. *Geophys. Res. L.*, Band 18, 1991, S. 2265–2268
- Madronich et al., in *Geophys. Res. L.*, Band 19, 1992.
- Marchetti, C.: Society as a Learning System: Discovery, Invention, and Innovation Cycles Revisited. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 18 (1980), S. 267–282
- Mather, J. H. und Brune, W. H.: Heterogeneous chemistry on liquid sulfate aerosols: A comparison of in situ measurements with zerodimensional model calculations. *Geophys. Res. L.*, Band 17, 1990, S. 1283–1286
- Mather, J. H., und Brune, W. H.: Heterogeneous chemistry on liquid sulfate aerosols: A comparison of in situ measurements with zero-dimensional model calculations. *Geophys. Res. L.*, Band 17, 1990, S. 1283–1286
- Milankovic, M.: Kanon der Erdbestrahlung. *Königl. Serb. Acad., Spez. Publ. 132, Sekt. Math. Nat. Wiss.*, Band 33, 1941
- Myers, N.: Tropical forests, present status and future outlook, climate change, vol. 19, 1991, S. 3–32
- Neue, H. U.: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 25./26. November 1991, Kommissionsdrucksache 12/1-b.
- Nitsch, J.; Ziesing, H.-J.: Der Beitrag der Solarenergie zur Abwendung der Klimagefahren; Berlin, Stuttgart, 1991
- Norse, D.: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 25./26. November 1991, Kommissionsdrucksache 12/1-b.
- OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development): Schriftliche Stellungnahme zur Anhörung im internationalen politischen Bereich über Willensbildung und Maßnahmen zum Schutz des globalen Klimas der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 28./29.1.1992; Schriftliche Stellungnahmen II, 23. 1. 1992; KD 12/3-b
- Oerlemans, J. und R. Warrick: Sea Level Rise, in: IPCC-WG I: Climate Change – The IPCC Scientific Assessment, 1990, S. 261–281
- Ozon-Symposium: Ozon-Symposium, München, Juli 1991 (AU 12/74 der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“)
- Patzelt, G. und M. Aellen: Gletscher. Mitteilung Nr. 108 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, S. 49–69, 1990
- Pitari, G., Visconti, G., und Rizi, V.: Sensitivity of stratospheric ozone to heterogeneous chemistry on sulfate aerosols. *Geophys. Res. L.*, Band 18, 1991, S. 833–836
- Prognos: Die energiewirtschaftliche Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 2010 unter Einbeziehung der fünf neuen Bundesländer. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft. Textband. Basel, 20. Dezember 1991
- Prognos: Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der verkehrlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005. Basel, 1991
- Raval, A., und Ramanathan, V.: Observational determination of the greenhouse effect. *Nature*, Band 342, 1990, S. 758
- Rind, D., Chiou, E.-W., Chu, W., Larsen, J., Oltmans, S., Lerner, J., McCormick, M. P., und McMaster, L.: Positive water vapour feedback in climate models confirmed by satellite data. *Nature*, Band 349, 1991, S. 500–503
- Sagan, C., Toon, O. B., und Pollack, J. B.: Anthropogenic albedo changes and the earth's climate. *Science*, Band 206, 1979, S. 1363–1368
- Sauerbeck, D. R. und Haider, K.: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Landwirtschaft I“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 25./26. November 1991, Kommissionsdrucksache 12/1-a, S. 280.
- Sauerbeck, D.: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landwirtschaft“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5-a.
- Scharpenseel, H. W.: Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung zum Thema „Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landwirtschaft“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 17./18. Februar 1992 in Bonn, KD 12/5-a, S. 60–81
- Schiffer, H.-W.: Energiemarkt, 91. Primärenergie – Mineralöl – Braunkohle – Steinkohle – Erdgas – Elektrizität. *Energiwirtschaftliche Tagesfragen*, 42. Jg. (1992), Heft 3, S. 154–174
- Schumann, U.: Air Traffic and the Environment – Background, Tendencies and Potential Global Atmospheric Effects. DLR, Bonn, November 1990
- Schumann, U.: Über den Einfluß des Flugverkehrs auf das Klima. Bericht für die öffentl. Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“, Januar 1992, Bonn
- Sieferle, R. P.: Der unterirdische Wald. *Energiekrise und Industrielle Revolution*. München: C. H. Beck 1982
- Sombroek, W. G.: Do Soils matter ... at Global Change?, Wageningen, 1990
- Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 1990 für die Bundesrepublik Deutschland, Stuttgart: Metzler-Poeschel, September 1990
- Steele, L. P., Fraser, P. J., Rasmussen, R. A., Khalil, M. A. K., Conway, T. J., Crawford, A. J., Gammon, R. H., Masarie, K. A., und Thoning, K. W.: The global distribution of methane in the troposphere. *J. Atmos. Chem.*, Band 5, 1987, S. 125–171
- Süddeutsche Zeitung: Entwicklungsländer treiben den Energieverbrauch hoch: Internationale Energieagentur: Bis zum Jahr 2005 Anstieg um 40 Prozent/ Rohölpreis mittelfristig bei 35 Dollar. *Süddeutsche Zeitung* vom 3. Juni 1991
- Tans, P. P., Fung, I. Y., und Takahashi, T.: Observational constraints on the global CO<sub>2</sub> budget. *Science*, Band 247, 1990, S. 1431–1438

- Teramura, A. H., Sullivan J. H. and Ziska, L. H.: Interaction of elevated UV-B radiation and CO<sub>2</sub> on productivity and photosynthetic characteristics in wheat, rice and soybean. *Plant Physiology* 94, 1990, 470–475.
- Toon, O. B., und Turco, R. P.: Polare Stratosphärenwolken und Ozonloch. *Spektr. d. Wissenschaft*, Augustheft, 1991, S. 42–49
- United Nations Centre: Transnational corporations and climate change. New York 1990 United Nations Environment Programme (UNEP): Environmental effects of ozone depletion: 1991 update.
- Vaghjiani, G. L., und Ravishankara, A. R.: New measurement of the rate coefficient for the reaction of OH with methane. *Nature*, Band 350, 1991, S. 406–409
- Volz-Thomas, A., und Kley, D.: Ozone measurements in the 19th century: An evaluation of the Montsouris series. *Nature*, Band 332, 1988, S. 240–242
- WEC (World Energy Conference): 14th Congress of the World Energy Conference, Conservation and Studies Committee, Montreal, September 1989. Paris: Editions Techniques 1989
- Wege, K.: DWD-Observatorium Hohenpeißenberg, 1992
- Weidick, A.: Review of glacier changes in West Greenland. *Zt. Gletscherk. Glazialgeol.*, Band 21, 1984, S. 301–309
- Weigel, H. J.: Stellungnahme im Rahmen der öffentlichen Anhörung „Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landwirtschaft“ der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ am 17./18. Februar 1992, Kommissionsdrucksache 12/5-b,
- Winiger, M.: Fragen zum Klima 2050. Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Ökosysteme und Raumnutzung, in: Huber, M (Hrsg.): *Umweltkrise*, Bonn, 1992, S. 109–128
- Wissenschaftliche Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL): *Klimaveränderungen und Landwirtschaft* Teil 1, Sonderheft 117, 1990
- WMO/UNEP Global Ozone Research and Monitoring Project Nr. 18, Genf, 1989
- WMO/UNEP Global Ozone Research and Monitoring Project, Nr. 25, Genf, 1992
- WMO/UNEP, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1990
- WMO/UNEP, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Supplement, 1992
- WWF (World Wildlife Fund): *Wie überlebt die Natur die globale Erwärmung/Can Nature survive Global Warming?*, Gland, 1992
- Zellner, R.: *Atmosphärisches Ozon. Bericht für die öffentl. Anhörung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Wissenschaftlicher Sachstand über Treibhauseffekt und Auswirkungen einer Klimaänderung“*, Januar 1992, Bonn
- Zellner, R.: *Ozonabbau in der Stratosphäre. Studie für die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zu den neuesten Ergebnissen zweier Meßkampagnen (EASOE, Ozonmeßkampagne der NASA) im Winter 1991/92*, 1992
- Zwally, H. J.: Growth of Greenland ice sheet: Interpretation. *Science*, Band 246, 1989, S. 1589–1591



