

# Klimaänderung durch erhöhte Spurenstoffgehalte in der Atmosphäre<sup>1</sup>

Von H. GRASSL

## 1 Fragen an die Klimaforschung

Klimaänderungen sind in den letzten Jahren verstärkt in das öffentliche Interesse gerückt. In allen Industrieländern wird die Klimaforschung heute mit steigendem Einsatz verfolgt. Der Anlaß dazu ist eine Reihe sich verdichtender Hinweise, daß der Mensch – nachdem von ihm verursachte lokale, teils auch regionale Veränderungen offensichtlich sind – zu globalen Klimaänderungen beiträgt. Die folgenden Abschnitte sollen auf drei wesentliche Fragen antworten:

- Welche Klimaänderungen durch den Menschen sind zu erwarten?
- Wie entstehen natürliche Klimaschwankungen? Sind sie vorhersagbar?
- Wie zuverlässig kann eine künftige Klimaentwicklung vorhergesagt werden?

Bei der Beantwortung dieser Fragen wird, soweit notwendig, auch auf Definitionen zurückgegriffen.

## 2 Welche Klimaänderungen sind durch Einwirkungen des Menschen zu erwarten? Was sind die Probleme?

Es sind viele Modellrechnungen durchgeführt worden zur Ermittlung der Klimaänderungen, die durch Erhöhung der Konzentration von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen oder durch andere anthropogene Einwirkungen hervorgerufen werden. Zum besseren Verständnis der Aussagen dieser Simulationen seien zunächst die Begriffe „Klima“ und „Treibhausgas“ erläutert:

Unter *Klima* werden nach moderner Definition alle Eigenschaften des Wetters sowie der mit der Atmosphäre in Wechselwirkung stehenden Systeme Ozean, Kryo(Eis)-sphäre, Biosphäre verstanden, die über einen Zeitraum von mindestens einem Monat gemittelt sind. Hierzu gehören neben mittleren Verteilungen z. B. der Luft- und Meerestemperatur, des Niederschlags, der Bodenfeuchte oder der Strahlung auch sämtliche – für die Praxis besonders wichtige – statistische Eigenschaften, wie die Häufigkeit und Stärke von extremen Wetterbedingungen oder die Unterschiede der jahreszeitlichen Mitteltemperaturen von einem Jahr zum nächsten.

Das Klima stellt nach dieser Definition keinen stationären Zustand dar, sondern wird als zeitlich veränderlicher Zustand aufgefaßt.

In der Tat wurden Klimaschwankungen auch in allen Zeitskalen von Monaten, Jahren, Jahrzehnten bis hin zu Jahrtausenden und Jahrmillionen gefunden.

Der kleinste auflösbare Zeitbereich (eine Mittelungsperiode) ist bei dieser Definition bewußt als ein Monat gewählt, um die Wettervorhersage, d. h. die Vorhersage von detaillierten Wettererscheinungen, wie die Lage wandernder Hoch- und Tiefdruckgebiete oder den Zeitpunkt von Niederschlägen, aus dem Bereich des Klimas auszuschließen. Detaillierte Wetterver-

<sup>1</sup> Die Ausführungen stützen sich auf Diskussionen des Sachverständigenkreises „Klimatologische Grundlagenforschung“ beim BMFT. Sie sind in ähnlicher Form im Februar 1987 schon in der Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht und Technik erschienen.

änderungen sind über einen Zeitraum von einem Monat hinaus prinzipiell nicht mehr vorhersehbar.

Die dynamischen Eigenschaften des Klimasystems müssen bei der Simulation von Klimaänderungen infolge anthropogener Einwirkungen berücksichtigt werden. Die Anpassung des Klimas an eine Veränderung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts z. B. kann nicht als Gleichgewichtsvorgang behandelt werden. Wegen der langsamen Einstellung des Klimas auf die veränderte  $\text{CO}_2$ -Konzentration hängt die Form der Klimaänderung nicht nur vom Ausmaß der  $\text{CO}_2$ -Änderungen ab, sondern auch vom Zeitverlauf.

Als *Treibhausgas* wird ein Gas bezeichnet, das (wie eben das Glas eines Treibhauses) für den wesentlichen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung durchlässig ist, aber die Wärmestrahlung der Erdoberfläche teilweise absorbiert und davon einen Teil wieder auf die Erde zurückstrahlt. Die zurückgestrahlte Wärmestrahlung führt zu einer Erwärmung der Erdoberfläche (siehe Abb. 1), die erst dann stoppt, wenn die Energiebilanz der Erde insgesamt wieder ausgeglichen

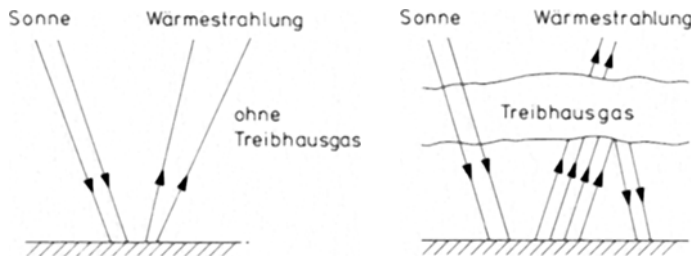


Abb. 1. Schema der Wirkung eines Treibhausgases. Es läßt Sonnenlicht durch, absorbiert Infrarot-Wärmestrahlung und strahlt einen Teil wieder zurück

Fig. 1. Diagram of the effects of a greenhouse gas

ist. Die meisten heute diskutierten Treibhausgase sind in der Atmosphäre, wie das  $\text{CO}_2$ , gut durchmischt und verhalten sich daher in ihrer Treibhauswirkung wie das  $\text{CO}_2$ . Die berechneten globalen Änderungen der Erdoberflächentemperatur, z. B. bei einer Zunahme des  $\text{CO}_2$ -Gehalts, kann somit auch interpretiert werden als das Ergebnis einer Erhöhung der Konzentration sämtlicher Treibhausgase mit gleichem Gesamttreibhauseffekt (eine Ausnahme bildet das sehr variabel verteilte Ozon, dessen Änderungen in der Stratosphäre – oberhalb  $\sim 10$  km – anders verlaufen als in der Troposphäre).

## 2.1 Berechnete Klimaänderungen

Modellrechnungen – unter anderem basierend auf Extrapolationen des Energieverbrauchs – sagen eine mögliche mittlere Erwärmung an der Erdoberfläche infolge menschlicher Aktivitäten im Bereich von etwa  $1,5$ – $4,5$  °C im Verlauf der nächsten 50–100 Jahre voraus (WMO 1985). Der Betrag dieser Temperaturänderung liegt in der gleichen Größenordnung wie der Unterschied zwischen der letzten Eiszeit vor 18 000 Jahren und dem heutigen Klima und würde wesentliche Veränderungen in den regionalen Klimaverhältnissen der Erde bedingen.

Die berechneten Temperaturänderungen zeigen jedoch starke regionale und jahreszeitliche Unterschiede. In höheren Breiten ist die Temperaturerhöhung (bedingt durch den Rückgang der die einfallende Strahlung stark reflektierenden Schnee- und Meereisflächen) etwa doppelt so hoch wie in den Tropen. Im Winter ist die Temperaturerhöhung ebenfalls wesentlich stärker als im Sommer. Beide Effekte bedeuten eine Abschwächung der Temperaturkontraste auf der Erde und weisen somit in Richtung Verringerung der durch diese Kontraste verursachten Zirkulation in Atmosphäre und Ozean.

Neben diesen allgemeinen Strukturen zeigen die Modellrechnungen zwar auch regionale Temperaturänderungen, die in Verbindung mit entsprechenden Änderungen des Nieder-

schlags, der Strahlung usw. wesentliche Verschiebungen der landwirtschaftlichen Regionen und auch andere bedeutende Änderungen der lokalen Lebensbedingungen implizieren, ihre Aussagekraft bleibt jedoch wegen der schwachen räumlichen Auflösung der numerischen Modelle gering.

Als wichtigste anthropogene Einwirkung auf das Klima ist die Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Atmosphäre zu nennen, verursacht durch den Verbrauch fossiler Brennstoffe und (in geringerem Maße) durch Waldabholzungen. Der hierdurch bedingte erhöhte Treibhauseffekt wird aber in etwa gleichem Maße verstärkt durch die Emissionen weiterer Treibhausgase (Chlorfluorkohlenwasserstoffe, Methan, Lachgas), die in ihrer Summe noch einmal einen fast so großen Effekt wie das  $\text{CO}_2$  erbringen. Diese und andere Gase greifen ferner in die komplexe Ozonchemie ein und können dadurch das empfindliche Gleichgewicht der gegenwärtigen vertikalen Ozonverteilung in der Atmosphäre signifikant stören. Dies hätte dann auch Auswirkungen auf das Klima und das Durchdringen der UV-Strahlung bis zur Erdoberfläche. Änderungen des Klimas können weiterhin hervorgerufen werden durch Aerosole (veränderte Rückstreuung und Absorption des einfallenden Sonnenlichts, auch in den durch sie veränderten Wolken) und durch veränderte Landnutzung (Änderung der Licht-Reflexionseigenschaften und der Wasserspeicherung und Verdunstung). Diese möglichen anthropogenen Einflüsse (GRASSL et al. 1985) sind bisher nicht verlässlich genug abgeschätzt, um hier wie beim Treibhauseffekt durch Spurengase bereits Richtung und erwartete Bandbreite anzugeben.

## 2.2 Unsicherheiten der Modellrechnungen

Die Aussagen der bisherigen Modellrechnungen sollten jedoch nur qualitativ für die zu erwartenden Änderungen interpretiert und nicht als Grundlage für regionale Strategien verwendet werden. Sie leiden noch unter einer Reihe von Unzulänglichkeiten.

- Die Modellrechnungen sind auf die atmosphärische Zirkulation beschränkt und berücksichtigen nicht (oder nur sehr unzureichend) die Änderungen des Ozeans, der Meereisverteilung oder der Biosphäre. Das Außerachtlassen z. B. der Änderungen der wärmetransportierenden ozeanischen Strömungen, wie dem Golfstrom, kann zu einer wesentlichen Verfälschung der Ergebnisse führen. Ferner werden durch die Beschränkung auf das am schnellsten reagierende Klimauntersystem, die Atmosphäre, die Verzögerungseffekte der anderen, trägeren Komponenten des Klimasystems nicht berücksichtigt, die eine etwa 10- bis 20jährige Verschiebung der zu erwartenden Klimaänderungen bewirken können.
- Die atmosphärischen Modelle enthalten auch noch einige Unsicherheiten, die die Ergebnisse wesentlich verändern könnten. Hierzu gehört die Entstehung von Wolken. Eine Abnahme der Bedeckung mit tiefen Wolken um nur 4 % ändert das Klima etwa wie eine Verdoppelung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes. Fehler in dieser Größenordnung sind bei der Berechnung der Änderung der Wolkenbedeckung bei einem  $\text{CO}_2$ -Anstieg nicht auszuschließen.
- Die Auflösung der Modelle (bestenfalls 200 km) reicht nicht aus, um kleinskalige Klimaänderungen, z. B. im Bereich Europa, zuverlässig zu berechnen. Genauere Rechnungen können erst mit leistungsfähigen Rechnern, die in den nächsten Jahren zur Verfügung stehen, durchgeführt werden.

## 2.3 Weitere mögliche Folgen der veränderten Spurengaskonzentration

### 1. Meeresspiegel

Abschätzungen über die Meeresspiegelerhöhung, die sich aus einem allgemeinen Temperaturanstieg ergeben könnten, liegen zwischen 0,3 bis 1,2 m im nächsten Jahrhundert (WMO 1985). Sie wird in erster Linie bedingt durch die Ausdehnung des erwärmten Ozeans und durch ein Abschmelzen kleinerer Gletscher. Spekulationen, wonach dieser Meereshöhenanstieg zu einem Abgleiten des westantarktischen Eisschildes führen könnte, welches einen wesentlich höheren

Meeresspiegelanstieg um 6 m ergeben würde, werden von der Mehrheit der Wissenschaftler als äußerst unwahrscheinlich abgetan. Es wird jüngst von OERLEMANS (1986) sogar auf die hohe Wahrscheinlichkeit einer Zunahme des Volumens des Antarktischen Eisschildes bei einer Erwärmung hingewiesen.

## 2. Ozonabbau

Photochemische Modelle sagen eine erhebliche Verringerung des stratosphärischen Ozons oberhalb 25 km voraus vor allem durch Chlorfluorkohlenwasserstoffe. Diese Abnahme wird teilweise kompensiert durch Zunahmen in der unteren Stratosphäre und in mittleren Breiten der nördlichen Halbkugel. Eine Abnahme bis zu 35 % wird für höhere Schichten der Stratosphäre berechnet. Diese veränderte vertikale Verteilung des Ozons hat Einfluß auf das Klima und besonders auf das „Wetter“ der Stratosphäre.

Auch auf das Klima in Bodennähe üben diese Ozonänderungen einen gewissen Einfluß aus; eine Aufrechterhaltung des Ozongehalts ist wegen seiner Abschirmung der das Leben schädigenden harten UV-Strahlung der Sonne von großer Bedeutung. Eine größere Abnahme des Ozons ist eventuell möglich, wenn wichtige Reaktionen noch nicht berücksichtigt wären. Vorläufige Studien des antarktischen „Ozonlochs“ deuten darauf hin.

## 3 Wie entstehen natürliche Klimaschwankungen? Sind sie vorhersagbar?

Natürliche Klimaschwankungen verursachen erhebliche ökonomische und gesellschaftliche Belastungen (Dürren, Überflutung, Kälteperioden . . .). Ein besseres Verständnis der Ursachen dieser Schwankungen und die Entwicklung von Methoden, solche Schwankungen wenigstens begrenzt vorherzusagen, ist daher ein wichtiges Anliegen der Klimaforschung. Daneben ist aber die Erfassung der statistischen Struktureigenschaften natürlicher Klimaschwankungen von zentraler Bedeutung, um die vorhergesagten anthropogenen Klimaänderungen rechtzeitig erkennen zu können. Bisher sind die nach Modellrechnungen bereits heute eingetretenen anthropogenen Klimaverschiebungen im natürlichen „Klimarauschen“ noch nicht eindeutig zu identifizieren. Wenn wir jedoch abwarten, bis die anthropogenen Effekte so weit angewachsen sind, bis sie sich ganz zweifelsfrei aus den natürlichen Schwankungen herausheben (Abb. 2), kann es für eine Korrektur bereits zu spät sein. Die Entwicklung von verfeinerten Methoden der „Signal-zu-Rauschen“-Analyse ist daher eine dringliche Aufgabe für die Früherkennung von Klimaänderungen durch den Menschen.

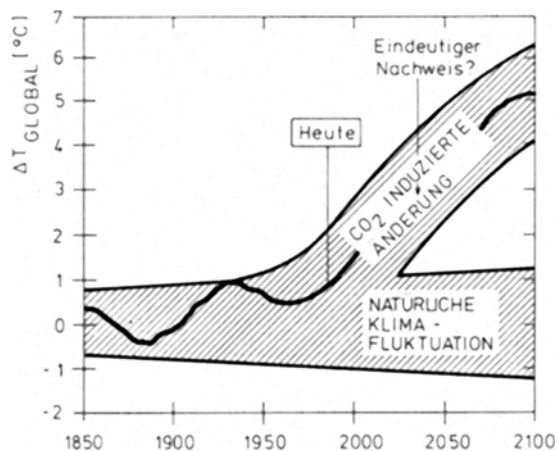


Abb. 2. Natürliche Klimaschwankungen und CO<sub>2</sub>-Signal

Fig. 2. Natural fluctuations of the climate, and CO<sub>2</sub>-signal

Im Rahmen des Spurengasproblems sind großräumige Betrachtungen notwendig, die damit viele Beobachtungsstationen einschließen, aber auch mehrere Klimaparameter umfassen sollten. Obwohl Lufttemperatur, Niederschlag, Bodenfeuchte, Wasserabfluß, Verdunstung, Eisbedeckung und andere Klimaparameter eng miteinander verknüpft sind, und zwar über Bewegungen in der Atmosphäre, im Ozean und in den Eisgebieten, weisen sie doch eine stark unterschiedliche zeitliche und räumliche Variabilität auf. Im wesentlichen eignen sich nur die folgenden Größen als Indikatoren für großräumige und relativ langfristige Klimaänderungen:

- Lufttemperatur,
- Meeresoberflächentemperatur,
- Meeresspiegelhöhe,
- Eisbedeckung,
- ggf. auch Häufungen von extremen Wetterereignissen.

Bisher sind natürliche Klimaschwankungen im Zeitbereich Monate und Jahre nicht vorhersehbar. Im Rahmen des Weltklimaforschungsprogramms ist jedoch der Versuch einer Vorhersage ein wesentlicher Pfeiler. Die natürlichen Klimaschwankungen in den unsere Gesellschaft betreffenden Zeitskalen entstehen wesentlich durch das Zusammenspiel unterschiedlich schnell reagierender Teile des Klimasystems. So kann beispielsweise eine bestimmte Temperatur- und Salzgehaltkombination des im Bereich zwischen Grönland und Spitzbergen im Winter gebildeten Nordatlantischen Tiefenwassers nach Jahrzehnten noch in der Tiefsee erkannt werden. Noch viel später, beim Hochquellen in Äquatornähe, bestimmt es den Zeitpunkt mit und gibt der Atmosphäre sozusagen erneut einen kleinen Anstoß.

Bevor auf Beobachtungsdaten der zeitlichen Größenordnung, die für das Spurengasproblem relevant sind, näher eingegangen wird, soll ein Blick auf die Klimaschwankungen geologischer Zeitspannen geworfen werden. Die Abbildung 3 gibt das Ergebnis einer Temperaturrekonstruktion wieder, die auf einer 2,1 km mächtigen Eisbohrung in der Antarktis beruht (LORIUS et al. 1986). Dieses Profil umfaßt die Zeitspanne seit dem Ausgang der Saale-Riß-Eiszeit über die Eem-Warmzeit und die Weichsel-Würm-Eiszeit bis zur gegenwärtigen Warmzeit. Die vier Hauptmaxima und -minima im Abstand von rund 40 000 Jahren sowie Modellrechnungen belegen den Zusammenhang dieser sehr langfristigen Temperaturschwankungen mit den Erdbahnelementen (Variationen der Erdumlaufbahn um die Sonne). Das Maximum (sog. Klimaoptimum) der jetzigen Warmzeit ist vor ca. 6000 Jahren überschritten worden, und wir bewegen uns ganz langsam auf die nächste Eiszeit zu. Es ist jedoch die Frage zu stellen, ob dieser langfristige, in den direkten Meßdaten nicht erkennbare Trend durch den anthropogenen Spurengas-Einfluß unterbrochen wird und sich vielleicht ein noch etwas höheres Temperaturniveau einstellt, als das in der Eem-Warmzeit vor ca. 120 000 Jahren der Fall war. Interessant ist in diesem

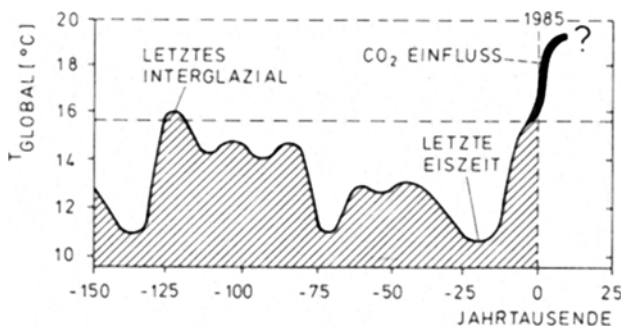


Abb. 3. Temperaturrekonstruktion (globaler Mittelwert) aufgrund von Eisbohrungen in der Antarktis nach LORIUS et al. (1986). In der erfaßten Zeitspanne seit 150 000 Jahren sind die ausgehende Saale-Riß-Eiszeit, das Eem-Interglazial, die Weichsel-Würm-Eiszeit und die derzeitige Warmzeit (rezentes Interglazial) zu erkennen. Hypothetisch ist für die Zukunft ein möglicher anthropogener Spurengas-Einfluß eingezeichnet.

Fig. 3. Tracing back temperatures (global average) on the basis of ice cores from Antarctica

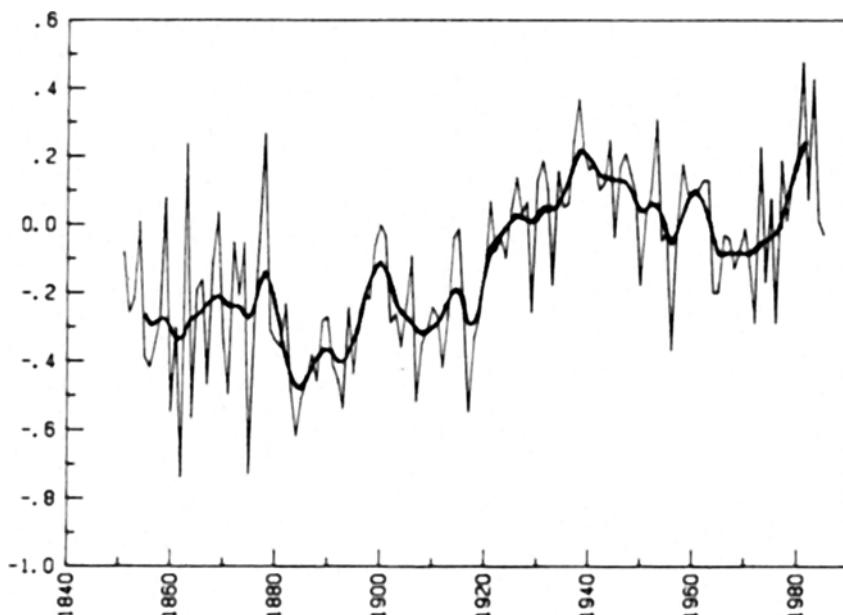


Abb. 4. Jahreswerte der nordhemisphärischen Mitteltemperatur 1851–1985 nach JONES (1985), ergänzt; zusätzlich sind dick ausgezogen die längerfristigen Fluktuationen (10-Jahre-Filter) eingezeichnet. Im Rahmen dieser Fluktuationen ist die nordhemisphärische Mitteltemperatur in der Zeit ca. 1885–1940 um  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  angestiegen, danach bis ca. 1970/75 um  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  gefallen und in jüngster Zeit wieder angestiegen. Trotz mancher Erklärungsversuche sind die Ursachen dafür noch nicht sicher bekannt

Fig. 4. Annual data of northern hemisphere mean temperatures 1851–1985

Zusammenhang, daß die atmosphärische Kohlendioxid-Konzentration während der in Abbildung 3 erfaßten Zeit zwischen 150 ppm und 300 ppm geschwankt hat. Diese Schwankungen laufen zur Temperatur parallel, aber die ursächlichen Zusammenhänge sind nicht bekannt.

Kehren wir in die Zeitskala von Jahren bis Jahrhunderten zurück, so spielt der allmähliche Trend, der uns in die nächste Eiszeit führen sollte, keine Rolle mehr, sondern wir erkennen ausgeprägte Fluktuationen in diesen kürzeren Zeitspannen. Einer der am besten gesicherten Datensätze beschreibt die Jahr-zu-Jahr-Variationen der nordhemisphärischen Mitteltemperatur über Land (JONES 1985) (Abb. 4). Wiederum mit Hilfe zeitlicher Mittelung (nunmehr zehnjährig, repräsentiert durch die dick ausgezeichnete Kurve in Abb. 4) werden relativ langfristige Trends sichtbar: Etwa von 1885 bis 1940 hat ein Temperaturanstieg um ca.  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  stattgefunden, gefolgt von einem Rückgang um ca.  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis ca. 1970/75; in jüngster Zeit ist die Temperatur wieder angestiegen. Im Gegensatz zur Zeitskala von Jahrhunderttausenden gibt es trotz einiger Versuche (z. B. mit Hilfe ozeanischer Phänomene oder des Vulkanismus) keine gesicherten Erklärungsversuche für diese Temperaturfluktuationen. Daten der Südhemisphäre, die allerdings weniger gut gesichert sind, enthalten den Temperaturrückgang ca. 1940–1970/75 nicht.

Es erweist sich als zweckmäßig, wegen des unterschiedlichen thermischen Verhaltens von Land und Meer (was ein unterschiedliches „Nachhinken“ der Effekte hinter den Anregungsmechanismen einschließt) getrennt davon die ozeanischen Oberflächentemperaturen zu betrachten, die im globalen Mittel nur in der Zeit ca. 1910–1945 einen ansteigenden Trend von ca.  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  aufweisen. Dagegen ist die Meeresspiegelhöhe in den letzten 100 Jahren fast kontinuierlich um ca. 15 cm angestiegen.

Der in der Stratosphäre bei etwa 25 km Höhe seit ca. 1958 bzw. 1964 (jeweiliger Beginn der Beobachtungsdaten) schwach ausgeprägte Temperaturrückgang steht zwar im Einklang mit

den Klimamodellrechnungen bei einer erhöhten  $\text{CO}_2$ -Konzentration, läßt sich aufgrund der Kürze der Beobachtungsreihe, der Meßgenauigkeit und der überlagerten ausgeprägten Jahr-zu-Jahr-Variationen noch nicht sicher bewerten.

#### 4 Wie zuverlässig kann die künftige Klimaentwicklung vorhergesagt werden?

Die zeitliche Entwicklung des künftigen Klimas wird sowohl durch natürliche Klimaschwankungen als auch in zunehmendem Maße durch menschliche Einflüsse bestimmt. Die Berechnung der zu erwartenden Klimaänderungen mit numerischen Modellen erfordert drei getrennte Schritte:

- a. Eine Vorhersage der künftigen Emissionen von  $\text{CO}_2$ , Spurengasen und Aerosolen und der künftigen Form der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung,
- b. eine Berechnung des Verbleibs der Spurenstoffe im System Atmosphäre-Ozean-Biosphäre und der Anpassung der Landvegetation an die land- und forstwirtschaftliche Nutzungsform,
- c. eine Berechnung der Klimaänderung, die sich aus den veränderten  $\text{CO}_2$ -, Spurengas- und Aerosolkonzentrationen in der Atmosphäre und den veränderten Landoberflächeneigenschaften ergeben. Für eine genaue Berechnung muß die Rückwirkung der Klimaänderung auf die Berechnungen der Klimaeinflußfaktoren in Schritt (b) bereits mit berücksichtigt werden.

Jeder dieser drei Schritte beruht auf einer Reihe von nicht ausreichend gesicherten Annahmen. Die Folgen dieser Annahmen müssen einzeln analysiert und quantifiziert werden, wenn Klimamodellrechnungen sinnvoll als Entscheidungshilfe für die künftige Energie- und Umweltpolitik eingesetzt werden sollen.

Bevor zu b. und c. Modellergebnisse vorgestellt werden, soll der physikalische Hintergrund einer Bedeutung von Spurenstoffen für das Klima kurz erläutert, die Liste der klimawirksamen Spurengase vorgestellt und die gemessene Zu- und Abnahmerate (in Tabelle 1) zusammengetragen werden.

##### 4.1 Klimawirksame Spurenstoffe

Zu den wesentlich absorbierenden Gasen gehören in der Atmosphäre nicht die Hauptbestandteile Stickstoff und Sauerstoff, sondern die Spurengase. Die für einen *zunehmenden* Treibhauseffekt verantwortlichen und damit klimaändernden Gase sind gegenwärtig:

- Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )
- Methan ( $\text{CH}_4$ )
- Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ , Lachgas)
- Chlorfluorkohlenwasserstoffe (insbesondere  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{CFCl}_3$ )

Diese Gase sind in der Troposphäre gut durchmischt. Ihre Konzentration nimmt – mit Ausnahme des  $\text{CO}_2$  – jedoch in der Stratosphäre durch photochemischen Abbau mit der Höhe ab, wobei ihre Umwandlungsprodukte für die Ozonkonzentration Bedeutung bekommen.

Daneben gibt es eine Gruppe von klimawirksamen Gasen, deren Konzentration räumlich und zeitlich sehr stark schwankt; die zwei wichtigsten sind:

- Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- Ozon ( $\text{O}_3$ )

Wegen der starken Schwankung ist es im Augenblick nicht möglich, einen Trend anzugeben, obwohl Wasserdampf als das zentrale Treibhausgas der Atmosphäre bei erhöhtem Treibhauseffekt der anderen Gase den wesentlichen Beitrag liefert, und zwar ebenfalls durch erhöhte Konzentration als Reaktion auf eine in Gang gekommene Erwärmung.

Tabelle 1

Spurenstofftrends

Trace substance trends

a. In der Troposphäre gut durchgemischte Gase				
Stoff		Mischungsverhältnis	Zuwachs in % Jahr	Gründe für die Veränderung
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	345 ppm <sup>1</sup>	~ 0,5	Verbrauch fossiler Brennstoffe, Zerstörung der Biosphäre
Methan	CH <sub>4</sub>	1,65 ppm <sup>1</sup>	~ 1,0	Reisanbau, Wiederkäuer, Mülldeponien, fossile Brennstoffe, Zerstörung der Biosphäre durch Verbrennung
Distickstoffoxid (Lachgas)	N <sub>2</sub> O	0,32 ppm <sup>1</sup>	~ 0,2	Stickstoffdüngung, fossile Brennstoffe, Zerstörung der Biosphäre
Chlorfluorkohlenwasserstoffe	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	~ 400 ppt <sup>2</sup>	~ 4,0	Kühlmittel, Sprühdosen, Isolierschaumproduktion
	CFCI <sub>3</sub>	~ 270 ppt <sup>2</sup>	~ 5,0	Kühlmittel, Sprühdosen, Isolierschaumproduktion

<sup>1</sup> ppm = parts per million = 10<sup>-6</sup> Volumenanteil  
<sup>2</sup> ppt = parts per trillion = 10<sup>-6</sup> Volumenanteil

b. Stark variable Spurenstoffe (Trends besonders schwierig zu erkennen)				
	Teil der Atmosphäre	Zunahme Abnahme	Gründe	Bemerkungen
O <sub>3</sub>	Troposphäre	Zunahme um etwa 1 % pro Jahr	Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas	Nur in der unteren Troposphäre mittlerer Breiten der Nordhalbkugel
	Stratosphäre	Abnahme um 0,3 % pro Jahr?	Photolytische Spaltung von CFCl <sub>3</sub> und CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Mittlere Breiten
		Abnahme um 40 % seit 1979 in der Antarktis (nur im September und Oktober)	Abbauprodukte von CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> und CFCI <sub>3</sub> ?	Bekannt unter dem Schlagwort Ozonloch
Gesamt ozon	Nahezu unverändert außer in der Antarktis			
H <sub>2</sub> O-Dampf	Troposphäre	Zunahme über dem tropischen Pazifik		Wichtigstes Treibhausgas der Erdatmosphäre
	Stratosphäre	Kein durchgehender Trend		Sonden- und Satellitenmessungen
Aerosolteilchen	Stratosphäre	Optische Tiefe 0,003–0,2 bei 0,55 µm Wellenlänge		Starke Variabilität durch Vulkanausbrüche, mittlere Verweilzeit etwa 2 Jahre, definiert als Abfall auf 1/e = 37 %
	Troposphäre	Optische Tiefe 0,1–1,0 bei 0,55 µm Wellenlänge, Zunahme in begrenzten Regionen, wegen extremer Variabilität nur qualitativ bekannt	Gas-Teilchen Umwandlung in der Atmosphäre; Vorläufergase SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	



Als ebenfalls hochgradig variabler und global klimawirksamer Bestandteil der Atmosphäre müßten die Aerosolteilchen und die Wolken in diese Diskussion mit einbezogen werden, aber leider sind keine gesicherten Trends bekannt und somit alle Folgerungen spekulativ.

#### 4.2 Gemessene Veränderungen der Spurenstoffkonzentrationen

Die Tabelle 1 soll – sofern bestimmbar – Trends, die Gründe dafür und Besonderheiten einzelner klimawirksamer Spurenstoffe vorstellen. Abbildung 5 zeigt beispielhaft für viele Spurengase den  $\text{CO}_2$ -Anstieg seit der Industrialisierung.

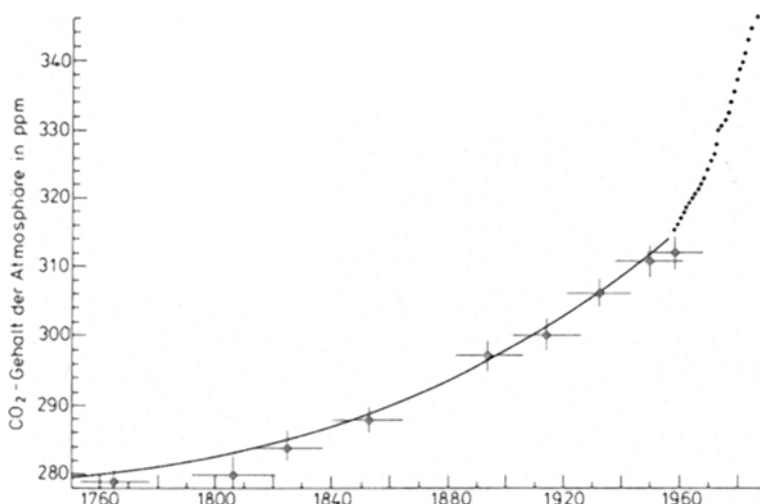


Abb. 5. Anstieg des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung (Quellen: Messung in Eisbohrkernen [NEFTEL et al. 1985] und direkte Messungen auf dem Mauna Loa in Hawaii)

Fig. 5. Increase of the  $\text{CO}_2$ -content of the atmosphere since the beginning of industrialization

#### 4.3 Strahlungseffekte

Der Treibhauseffekt der Atmosphäre nimmt nur dann zu, wenn Spurengase die Wärmestrahlung stärker absorbieren als Sonnenstrahlung und in Bereichen absorbieren und emittieren, die nicht bereits von Wasserdampfabsorption belegt sind. Während der Treibhauseffekt bei den noch gering konzentrierten Spurengasen wie den Chlorfluorkohlenwasserstoffen linear mit der Masse wächst, ist bei höher konzentrierten Spurengasen wie  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  die Zunahme in einzelnen Absorptionsbanden bereits schwächer als linear. Zu berücksichtigen ist außerdem, daß die einzelnen Spurengase zum Teil sich überlappende Absorptionsbereiche besitzen, was den Gesamteffekt teilweise mindert.

#### 4.4 Kombinierte Effekte

Die Wirkung all der genannten Gase auf den Strahlungshaushalt ist unumstritten und auch recht genau zu bestimmen. Die Hauptunsicherheit bei der Diskussion um die Auswirkung des erhöhten Treibhauseffektes auf Klimagrößen liegt in der schwer abschätzbaren Reaktion von Wasserdampf, Wolken und Ozean.

Zudem modifizieren Vulkanausbrüche durch Ausstoß von Gasen und Aerosolteilchen den Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Auch sind Messungen bekannt, die auf eine langperiodische Änderung der Sonnenstrahlung hindeuten.

## 4.5 Chemische Einflüsse auf das Klima

### 4.5.1 Bedeutung des atmosphärischen Ozons

Aus mehreren Gründen spielt das Spurengas Ozon eine äußerst bedeutende Rolle in der Erdatmosphäre:

1. Es schützt die Biosphäre vor zu starker Einstrahlung von ultravioletter Sonnenstrahlung,
2. es steuert die meisten photochemischen Prozesse,
3. es bestimmt neben dem  $\text{CO}_2$  die thermische und dynamische Struktur der Stratosphäre,
4. es trägt etwas zum Treibhauseffekt der Erdatmosphäre bei.

### 4.5.2 Störungen des atmosphärischen Ozons durch menschliche Aktivitäten

Während der letzten 15 Jahre wurde immer klarer, daß sich in der Stratosphäre besonders durch die stark zunehmende Konzentration von Chloratomen (Cl) und Chlormonoxidmolekülen (ClO) eine zusätzliche Senke für Ozon aufbaut. Diese chemisch sehr aktiven Gase entstehen aus dem photochemischen Zerfall von Chlorfluorkohlenwasserstoffen (Chlorfluormethane).

In der Troposphäre hat das Ozon durch die stark angestiegene Emission von anthropogenen Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ), besonders in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre, stark zugenommen. Beide Effekte sind etwa zur selben Zeit aufgetreten. Sie heben einander in der nördlichen Erdhälfte teilweise auf. Neuere Messungen aus der Antarktis, die eine sehr starke Abnahme des stratosphärischen Ozons zeigen, könnten auf eine bisherige Unterschätzung dieser Problematik hindeuten.

## 4.6 Energie-Szenarien und Modelle des $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Atmosphäre

Bevor Modelle der  $\text{CO}_2$ -Zunahme diskutiert werden, muß als wesentliche und bisher sehr schlecht abgeschätzte Eingabe die zeitliche Entwicklung des Energieverbrauchs bei Nutzung verschiedener Energieträger, ein Energie-Szenario, vorliegen. Um diese Schwierigkeiten zum Teil zu umgehen und um den entscheidenden Einfluß zu demonstrieren, seien vier weit voneinander entfernte Szenarien für die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas vorgestellt:

- + 4,3 % Zunahme pro Jahr; totaler Verbrauch bekannter Lagerstätten,
- + 2,3 % Zunahme pro Jahr; totaler Verbrauch bekannter Lagerstätten,
- Einfrieren auf gegenwärtigem Stand.

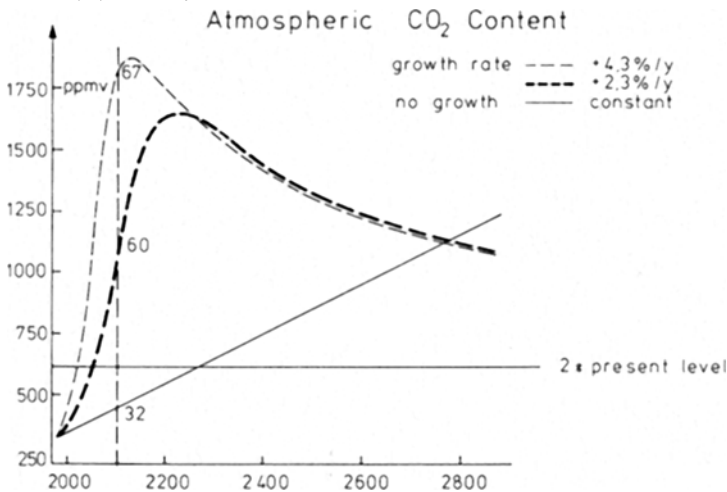


Abb. 6. Zeitliche Entwicklung der Konzentration des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre bei Ankopplung eines realistischen Ozeans

Fig. 6. Temporal development of  $\text{CO}_2$ -concentration in the atmosphere, coupled to a realistic ocean

Zu diesen Szenarien ist in Abbildung 6 der  $\text{CO}_2$ -Gehalt bei Ankopplung eines realistisch modellierten (dreidimensional mit Chemie) Ozeans dargestellt (MAIER-REIMER u. HASSELMANN 1987). Das wesentliche Ergebnis lautet: Der in der Atmosphäre verbleibende Teil des anthropogenen  $\text{CO}_2$  sinkt bei Abnahme der Emissionsrate, d. h., der Ozean braucht Zeit, um als effektive Senke zu wirken. In anderen Worten: Die Eintrittszeit für die Verdoppelung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes in der Atmosphäre wird um mehr als die doppelte Zeitspanne verschoben, wenn die Emission halbiert wird. Andere Spurengase werden nicht nennenswert vom Ozean aufgenommen.

#### 4.7 Gemeinsame Wirkung der Spurengase

Seit Beginn der achtziger Jahre ist bekannt, daß wegen der raschen Zunahme anderer Gase als des  $\text{CO}_2$  auch deren Wirkung auf den Strahlungshaushalt der Erde für den Treibhauseffekt wichtig sein wird. Die zumindest in der Troposphäre gut durchmischten Gase, nämlich  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und die Chlorfluorkohlenwasserstoffe, können leicht in eine zur  $\text{CO}_2$ -Zunahme äquivalente Einheit umgerechnet werden, so daß Klimamodelle für erhöhte  $\text{CO}_2$ -Gehalte (Abb. 7) auch als solche für die kombinierte Spurengaswirkung verwendet werden können. Die von

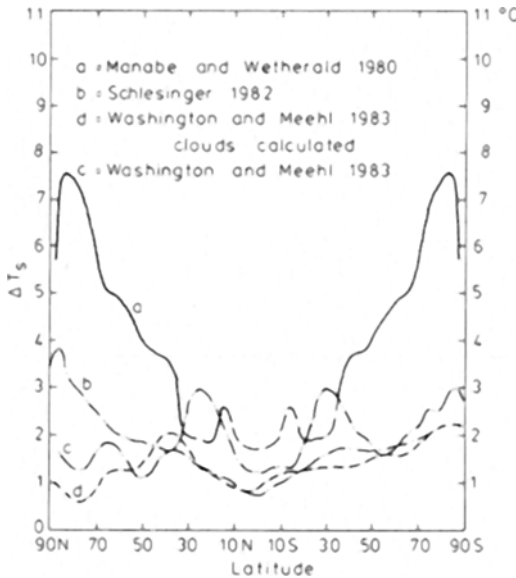


Abb. 7. Temperaturänderung bei  $2 \times \text{CO}_2$   
 Probleme 1. Änderung der Ozeane nicht berücksichtigt  
 2. Änderung der Wolken (im % Bereich) außerordentlich kritisch und nicht zuverlässig  
 3. Räumliche Auflösung (ca. 500 km) unzureichend, in Verbindung mit (1), (2): Regionale Änderungen nicht verlässlich  
 Fig. 7. Temperature change at  $2 \times \text{CO}_2$

solchen Modellen ohne Berücksichtigung des Ozeans berechneten Änderungen der globalen Mitteltemperatur geben für die schon eingetretene Zunahme der angesprochenen Treibhausgase einen beachtlichen Temperaturzuwachs von etwa 1–2,5 K an. Die Summe der Wirkung aller Gase neben dem  $\text{CO}_2$  ist von der gleichen Größe wie die des  $\text{CO}_2$ !

Bei grober Berücksichtigung der verzögernden Wirkung des Ozeans berechnet man für heute eine mittlere globale Temperaturzunahme von etwa 0,5–1,0 °C, die noch nicht von den natürlichen Schwankungen getrennt werden kann, aber auch nicht in Widerspruch zu den Beobachtungen steht.

### 5 Schlußbemerkung

Klimaänderungen vorherzusagen, ist eine sehr schwer zu lösende Aufgabe, weil ein komplexes System mit unterschiedlich schnell reagierenden Teilen verstanden werden muß. Bei den „Vorhersagen“ des Klimas bei einem zunehmenden Treibhauseffekt bleibt ein für viele Menschen

deprimierend großer Unsicherheitsbereich. Das ist allerdings kein Anlaß dafür, das Klimaproblem zu bagatellisieren. Wie bei allen Umweltproblemen ist die einfachste und beste Reaktion, sparsam mit den Ressourcen umzugehen und die Zusammenhänge systematisch zu erforschen. Im Falle des CO<sub>2</sub> z. B. wird nach Abbildung 6 sparsamer Umgang sogar überproportional belohnt.

### Danksagung

Ich möchte ganz herzlich meinen Kollegen im Sachverständigenkreis „Klimatologische Grundlagenforschung“ für die vielen Diskussionen danken, die zu einer hoffentlich abgeklärten Darstellung führten. Im besonderen danke ich Herrn Dr. Ernst MAIER-REIMER, MPI für Meteorologie in Hamburg, für die Erlaubnis, neueste Ergebnisse (Abb. 6) vor der Veröffentlichung in Fachzeitschriften übernehmen zu dürfen.

### Zusammenfassung

Der Strahlungshaushalt der Atmosphäre wird wesentlich von Wasserdampf, Wolken und Spurengasen bestimmt. Die durch Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas sowie industrielle Aktivität in die Atmosphäre entlassenen Spurengase erhöhen den Treibhauseffekt der Atmosphäre, geben also Anstoß zu einer Erwärmung in der unteren Atmosphäre und an der Oberfläche, die bereits im Jahre 2030 im globalen Mittel 1,5–4,5 °C betragen könnte.

Nach der Vorstellung der an die Klimaforschung gestellten Fragen werden die insgesamt erwarteten anthropogenen Klimaänderungen aufgeführt, bevor auch die starken natürlichen Klimaschwankungen diskutiert werden; denn letztere verhindern bisher einen eindeutigen Nachweis einer bereits angestoßenen Erwärmung.

Nach einer Betrachtung der Fehlerquellen für die „Vorhersage“ mit Rechenmodellen werden die Trends der wichtigsten klimawirksamen Spurengase zusammengefaßt, deren Strahlungseffekte gestreift und die chemischen Einflüsse auf das Klima angesprochen.

Die Wirkung weit voneinanderliegender Energieszenarien auf den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre deuten zum Schluß die Unsicherheit in der Energiepolitik an, zeigen aber auch den dem Menschen überlassenen Spielraum.

### Summary

#### *Change of climate caused by increased trace substance contents in the atmosphere*

The atmospheric radiation balance is dominated by water vapour, clouds, and trace substances. Gases emitted into the atmosphere through the burning of coal, oil, and natural gas, as well as industrial activity increase the greenhouse effect of the atmosphere, thus starting a warming of the lower atmosphere and at the earth's surface. This warming could amount to 1.5–4.5 °C in the global mean as early as 2030.

After presenting the questions asked, all the anticipated anthropogenic climate changes are listed, and then also the natural fluctuations of climate are discussed. The latter are as yet hampering a definite proof of an already beginning warming trend.

After examining error sources in climate forecasts by using numerical models, the concentration trends of the most important trace gases are compiled, their radiation effects touched, and the influence of air chemistry on climate mentioned.

The impact of strongly different energy use scenarios on atmospheric carbon dioxide content finally points to the uncertainty in energy policy and also shows the broad range of reaction, left to mankind.

### Literaturangaben

- WMO/UNEP/ICSU, 1985: Conference Statement: "The Role of Carbon Dioxide and of other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts". Villach, 9.–15. Oktober.  
GRASSL, H.; LEVKOV, L.; NEWIGER, M.; REHKOPF, I., 1984: Umweltforschungsplan des BMI. Forschungsbericht 104 02 621. Umweltbundesamt Berlin.

- DERLEMANS, L., 1986: Contribution No. 45 Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.
- LORIUS, C.; JOUZEL, J.; RITZ, C.; MERLIVAT, L.; BARKOV, N. I.; KOROTKEVICH, Y. S.; KOTLYAROV, V. M., 1986: Nature 316, 591–596.
- JONES, P. D., 1985: Climate Monitor 14, 14–21.
- NEPTEL, A.; MOOR, E.; OESCHGEGER, H.; STAUFFER, B., 1985: Nature 315, 45–47.
- MAIER-REIMER, E.; HASSELMANN, K., 1987: Climate Dynamics, im Druck.

*Anschrift des Verfassers:* Prof. Dr. HARTMUT GRASSL, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, Max-Planck-Straße, D-2054 Geesthacht

## Das Ozonloch und seine möglichen Folgen

Von UTA SCHMAILZL

### Einleitung

Seit der Warnung von ROWLAND und MOLINA (1975) vor einer Zerstörung der atmosphärischen Ozonschicht durch Spraydosengase wurde die Ozonchemie zum Ziel intensivster Forschung. Seit 1975 simulierten einfache Modellrechnungen die für die Ozonverteilung wichtigen chemischen Reaktionen als Funktion der Höhe. Die Computermodelle wurden durch Labormessungen, von Geschwindigkeiten der relevanten chemischen Reaktionen und Photodissoziationsprozesse unterstützt und anhand von Feldmessungen der Spurengaskonzentrationen überprüft. Die Ozonprognosen für den Gleichgewichtszustand nach Einfrieren der Emissionen der Fluorchlorkohlenwasserstoffe auf dem Niveau von 1974, die beim Wissensstand von 1979 mit 19 % Ozonabnahme ihren Höchstwert erreichten, pendelten sich seit 1981 auf einen Wert um 5 % ein (WMO-Report, 1986). Diese vorausgesagte Abnahme ist allein auf das Ansteigen der atmosphärischen Chlorverbindungen bei gleichbleibenden Bodenemissionen zurückzuführen. Dazu kommt jedoch in Wirklichkeit der Einfluß anderer Spurengase, die ebenfalls durch menschliche Aktivitäten ihre Konzentrationen in der Atmosphäre fortlaufend ändern. Vollständigere Modelle simulieren die gekoppelte Wirkung der natürlichen und anthropogenen Spurengase in guter Übereinstimmung mit statistischen Analysen der gemessenen Ozontrends. Eine überraschende Diskrepanz ergab sich mit der Entdeckung des antarktischen Ozonlochs im Jahre 1985 (FARMAN et al.). Damit wurde deutlich, daß die vorhandenen Modelle noch nicht alle relevanten Prozesse berücksichtigten. Man vermutete zunächst, daß aufgrund der besonderen Strahlungs- und Wetterbedingungen im antarktischen Frühjahr die bekannten Ozonabbauprozesse beschleunigt werden (FARMAN et al. 1985). Bald wurde aber deutlich, daß zur Deutung des Ozonlochs zusätzliche chemische und/oder dynamische Prozesse hinzugezogen werden müssen, Prozesse, die entweder nur in der Antarktis auftreten oder dort als erstes in Erscheinung treten. Daraus ergeben sich unterschiedliche Konsequenzen für den Ozontrend bei mittleren und niedrigen Breiten. Wenn wir die Folgen einer Ozonänderung auf unsere Zivilisation abschätzen, müssen wir drei Faktoren berücksichtigen: die direkten Umweltwirkungen des troposphärischen Ozons, die verstärkte Einstrahlung von UV-B bei einer Verringerung der Gesamtozonsäule und mögliche Klimaänderungen durch eine veränderte Ozonverteilung.

### Der atmosphärische Ozonkreislauf

Ozon wird in der Stratosphäre durch Aufspaltung von Luftsauerstoff durch ultraviolettes Sonnenlicht von Wellenlängen  $< 243$  nm und durch Rekombination der Sauerstoffatome mit weiteren Sauerstoffmolekülen gebildet.