

## Umwelt

# Das CO<sub>2</sub>-Klima-Problem

Das Problem einer möglichen Änderung des Klimas in globaler Skala ist in den letzten Jahren vielfach behandelt worden; eine Auswahl zusammenfassender Darstellungen wird am Schluß gegeben. Es handelt sich um eine multi-disziplinäre Fragestellung, die schon allein in ihren kausalen Zusammenhängen – auf die wir uns hier beschränken – aus der Sicht sehr verschiedener Fachgebiete behandelt werden muß. Dazu gehören u. a. Klimatologie, Physik und Chemie der Atmosphäre und des Ozeans, die Rolle biologischer Vorgänge auf dem Festland und im Meer, Glaziologie und Vulkanologie, aber auch Klimageschichte der letzten drei bis fünf Millionen Jahre. Im Rahmen dieser kurzen Übersicht muß leider die Rolle der Ozeane und der Biosphäre weitgehend vernachlässigt werden. Nach einem einleitenden Abschnitt über den CO<sub>2</sub>-Haushalt und den Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehalts seit etwa 1850 wird anhand eines sehr stark vereinfachten Modells der Zusammenhang zwischen dem CO<sub>2</sub> und der mittleren Temperatur der Erdoberfläche dargestellt. Der Treibhauseffekt des CO<sub>2</sub> wird durch eine Reihe anderer Spurengase erheblich verstärkt. Aus einem kurzen Rückblick in die Klimageschichte ergibt sich abschließend ein kritischer Ausblick in die nahe Zukunft.

## CO<sub>2</sub>-Haushalt und CO<sub>2</sub>-Anstieg

Der rezente Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Atmosphäre (Abbildung 1) ist nur zu verstehen (und zu extrapolieren), wenn wir den heutigen Haushalt für Speicher (Atmosphäre, Ozean, Biosphäre, fossile Sedimente) und Transportvorgänge zahlenmäßig abschätzen können. Die Diskussion dieser Probleme ist noch keinesfalls abgeschlossen, doch sind in den letzten Jahren die Fehlerquellen deutlich eingeschränkt worden. Auch bestehen einige Randbedingungen, die diese Fehler begrenzen und einen künftigen Kompromiß zwischen den Zahlen ver-

schiedener Fachrichtungen ermöglichen. Abbildung 2 gibt die wesentlichen Größen des CO<sub>2</sub>-Haushaltes wieder, wobei von den fossilen Sedimenten nur die Brennstoffe berücksichtigt werden: die übrigen (z. B. die Kalke) sind zwar zahlenmäßig sehr viel größer, haben aber nur an langsamen Umsetzungen teil. Der Austausch unter natürlichen Gleichgewichtsbedingungen ist erheblich größer, als es die vom Menschen in Gang gesetzten Transporte sind (gestrichelte Pfeile in Abbildung 2). Alle Zahlen werden in Gigatonnen (10<sup>15</sup> g) Kohlenstoff angegeben. Einwandfrei bekannt ist die jährliche Zufuhr von CO<sub>2</sub> aus Kohle, Erdöl und Erdgas in das Klimasystem, ebenso seine Speicherung in der Atmosphäre (Tabelle 1, Zeile 1 und 3 der Bilanz). Immer noch ungenügend ist unsere Kenntnis über den Austausch mit der Biosphäre, in der (nach heute allgemeiner Überzeugung) die Abgabe von

Abb. 1. Jährliche Emission von CO<sub>2</sub> aus fossilen Brennstoffen (a) und CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre 1958 bis 1980 (b).

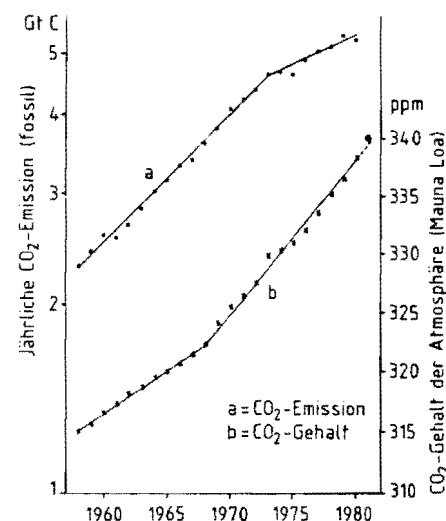
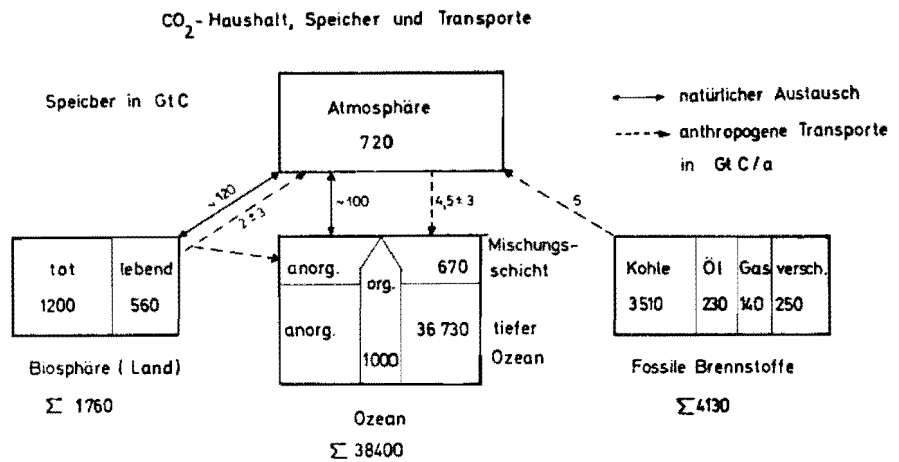


Tabelle 1. Jährliche Bilanz des Kohlenstoff-Haushalts (Mittel 1973–80).

1. Zufuhr in die Atmosphäre aus fossilen Brennstoffen:	4,9 Gt C (1981): 5,3 Gt
2. Zufuhr in die Atmosphäre aus Vegetations-Zerstörung:	1,2 Gt C
3. Speicherung in der Atmosphäre:	2,6 Gt C
4. Speicherung im Ozean insgesamt:	3,5 Gt C

Abb. 2. CO<sub>2</sub>-Haushalt mit Speichern (Atmosphäre, Biosphäre/Land, Ozean und fossile Brennstoffe) und jährlichen Transporten unter natürlichen Bedingungen (ausgezogene Doppelpfeile) sowie anthropogen (gestrichelt). Einheit Gigatonnen (1 Gt = 10<sup>15</sup> g Kohlenstoff) (C).



## CO<sub>2</sub>-Gehalt und Klima

Auf einen Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Gehalt und Klima haben zuerst der Geologe Th. Chamberlin (1897) und der Physikochemiker Sv. Arrhenius (1896) hingewiesen; dieser gab auch schon eine in der Größenordnung richtige Abschätzung des Effektes. Seit 20 Jahren hat eine wachsende Zahl von Arbeitsgruppen dieses Problem aufgegriffen und mit Hilfe von Klima-Modellen bearbeitet. Wenn wir ihre Ergebnisse als realistisch betrachten sollen, müssen solche Modelle Atmosphäre und Ozean hinsichtlich ihres dreidimensionalen Aufbaus, ihrer Bewegungsvorgänge und ihres Gasaustauschs erfassen; hierzu gehören auch Eis und Schnee (Kryosphäre) sowie die Biosphäre, die für Verdunstung, CO<sub>2</sub>-Austausch und Strahlungshaushalt (z. B. Albedo) eine Rolle spielen. Auf diesem Gebiet sind zweifellos große Fortschritte erzielt worden. Aber zwei Prozesse von entscheidender Bedeutung haben sich bisher weitgehend dieser Modellierung entzogen: die Rolle der Bewölkung in ihren verschiedenen Formen und Höhen sowie die Rolle der Transportvorgänge im Ozean. Doch darf erwartet werden, daß auch diese Probleme in absehbarer Zeit in befriedigender Weise behandelt werden können. Wenn wir von diesen beiden Prozessen einmal absehen, so ist – nach den Feststellungen von zwei hervorragend besetzten Experten-Kommissionen der USA – bei einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehalts mit einer mittleren Zunahme der Oberflächentemperatur um 1,5 bis 3 °C zu rechnen. Aus der Zunahme der Ozeantemperatur ergibt sich auch eine geringe Zunahme der globalen Verdunstung und des Niederschlags.

Anstelle einer Besprechung der verschiedenen, z. T. noch recht widerspruchsvollen Ergebnisse der großen Klimamodelle beschränken wir uns hier auf ein extrem vereinfachtes (null-dimensionales) Gleichgewichtsmodell. Es geht aus von der Strahlungsbilanz  $Q$  des Klimasystems Erde + Atmosphäre, in der an der Obergrenze der Atmosphäre die Einstrahlung und die (infrarote) Ausstrahlung  $E_0$  von gleicher Größe sind.

$$Q = (1 - a_p) \frac{S_0}{4} = E_0$$

Mit der planetarischen Albedo  $a_p$  ( $\sim 0,294$ ) und der Solarkonstanten  $S_0$  ( $1368 \text{ Watt} \cdot \text{m}^{-2}$ ) auf eine zur Strahlung senkrechte Fläche wird  $E_0 = 240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; die Unsicherheit dieser Größen liegt unter 1%. Andererseits kann man näherungsweise  $E_0$  als Summe von zwei Termen darstellen, von denen der erste von der Oberflächentemperatur der Erde  $T_E$  und der zweite von dem über alle Gase integrierten Treibhauseffekt abhängt. Letzterer enthält die Änderung  $\Delta$  des CO<sub>2</sub>-Gehalts  $\Delta A/A^*$  bezogen auf einen Referenzwert  $A^* = 300 \text{ ppm}$  sowie die über alle weiteren, treibhauswirksamen Spurengase summierte Größe:

$$n = \frac{\Delta Q (\text{alle Spurengase})}{\Delta Q (\text{CO}_2 \text{ allein})}$$

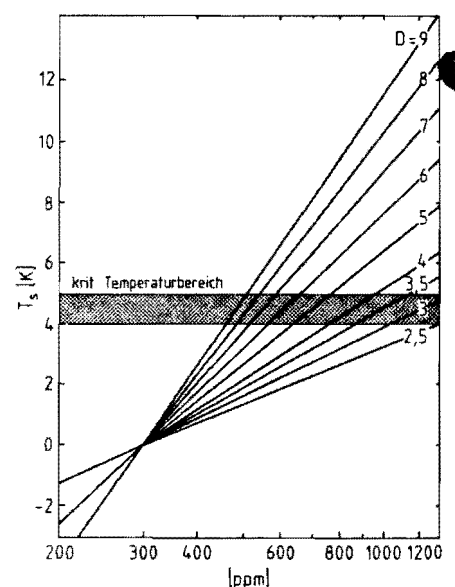


Abb. 3. Änderung der mittleren Temperatur der Erdoberfläche ( $T_s$ ) in Abhängigkeit vom CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre und dem (modellabhängigen) Parameter  $D = nCB^{-1}$  (siehe Text).

Die überragende Rolle des Wasserdampfes ist in den meisten Modellen implizit bereits enthalten, z. B. als Funktion der Oberflächentemperatur der Ozeane. Die Sensitivitätsparameter B und C für beide Terme lassen sich aus den Modellrechnungen abschätzen (Flohn 1981). B auch empirisch. Dann wird an der Obergrenze der Atmosphäre bei Gleichgewicht ( $E_n = Q$ ):

$$\Delta E = \Delta T_s, -n C \ln A = 0$$

Hieraus ergibt sich eine sehr einfache Beziehung, die allerdings nur zu einer Abschätzung erster Näherung brauchbar ist:

$$\Delta T_s = n C B^{-1} \ln A$$

Diese Beziehung läßt sich in einem Koordinatensystem aus  $\Delta T_s$  und  $\ln A$  durch eine Schar von Geraden mit dem Parameter  $D = n C B^{-1}$  darstellen (Abbildung 3), die durch den Referenzpunkt  $\Delta T_s = 0$  K und  $A^* = 300$  ppm gehen. Mit  $B = 1,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $C = 6,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  – beide mit Unsicherheiten nahe 20 % – und  $n = 1,5(2)$  ergibt sich  $D \sim 5,5(7)$ .

## Rolle der treibhauswirksamen Spurengase

Im langwelligen Spektralbereich (Infrarot) überdecken die breiten Absorptionsbanden von Wasserdampf und  $\text{CO}_2$  weite Teile des Spektrums. Nur ein größeres „Fenster“ verbleibt, etwa zwischen den Wellenlängen 7,5 und 12  $\mu\text{m}$ , in dem die Atmosphäre fast ganz durchlässig ist. In diesem Fenster arbeiten die meteorologischen Satelliten, welche die Albedo und die Strahlungstemperatur der Erdoberfläche und der Wolken regelmäßig messen. Diese Daten haben der Meteorologie und Klimatologie inzwischen zu entscheidenden Fortschritten verholfen, zumal sie nahezu lückenlos die ganze Erde erfassen.

In diesem „Fenster“ haben nun wichtige Spurengase schmale, aber wirksame Absorptionsbanden (Abbildung 4), die wie die

Stäbe einer Jalousie wirken. Sie erhöhen also den Treibhauseffekt der Atmosphäre, und eine Reihe von Arbeiten der letzten acht bis zehn Jahre hat ihre Bedeutung immer mehr in den Vordergrund gestellt. Konnte man 1978 noch ihren zusätzlichen Beitrag zum Treibhauseffekt des  $\text{CO}_2$  auf höchstens 50 % schätzen, so sind die Experten darin einig, daß schon heute dieser Beitrag etwa bei 100 % liegt und wahrscheinlich in Zukunft weiter wachsen wird. Deshalb müssen wir wenigstens die wichtigsten dieser Spurengase kurz hier behandeln: Tabelle 2 enthält ihren Anteil an der Zusammensetzung der Atmosphäre in ppb, die Lage ihrer Absorptionsbanden in  $\text{cm}^{-1}$  und die bei einer Verdoppelung des Anteils zu erwartende Temperaturerhöhung (im Vergleich zu rund 2 K beim  $\text{CO}_2$ ). Leider sind die Bilanzen aller dieser Gase noch wenig bekannt.

Den größten Anteil – aber doch nur 0,5 % des  $\text{CO}_2$ -Anteils – hat das Methan ( $\text{CH}_4$ ), das als Sumpfgas, auch in Reisfeldern, als Verdauungsprodukt von Rindern (oder von Termiten – hier zunächst stark überschätzt) unabhängig vom Menschen vorkommt; seine Zunahme scheint bei 2 bis 3 ppb jährlich zu liegen. Sein Treibhauseffekt (Spalte  $\Delta T$ ) ist z. Zt. noch relativ unbedeutend. Doch kann dieses Gas in absehbarer Zukunft eine besondere Rolle spielen: Es ist in großen Mengen in den Permafrostböden der Subarktis als Hydrat eingeschlossen und wird mit ihrem Auftauen freigesetzt. Das ist einer der vielen (positiven) Rückkopplungseffekte, die in diesem Zusammenhang in Rechnung gestellt werden müssen.

Lachgas (Distickstoffmonoxid  $\text{N}_2\text{O}$ ) gehört in seinem Temperatureffekt zu den wirksamsten Spurengasen. Es bildet sich u. a. im Boden bei der Zersetzung der Stickstoffdünger. Diese sind bei dem heutigen Bevölkerungswachstum für das Ernährungsproblem ebenso wenig entbehrlich wie die fossilen Brennstoffe für das Energieproblem. Wegen der langen Verweilzeit in der Atmosphäre (Größenordnung 50 bis 100 Jahre gegenüber 4 Jahre beim  $\text{CO}_2$ ) und der wohl weiter stei-

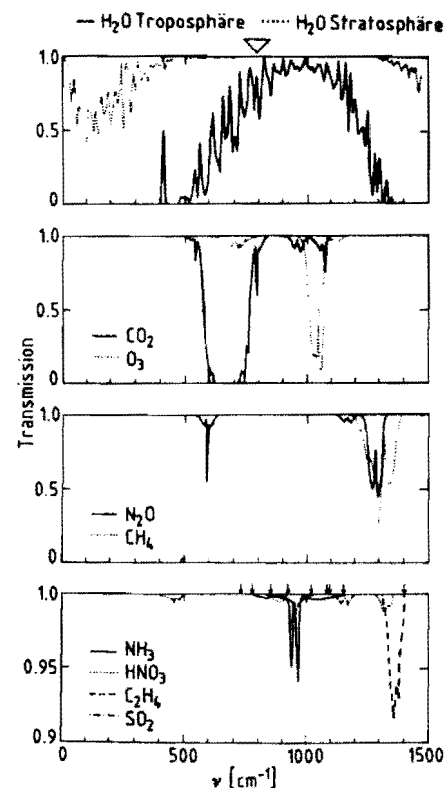


Abb. 4. Transmissionsspektren von Wasserdampf,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$ . Die Frequenz 500 (1000)  $\text{cm}^{-1}$  entspricht einer Wellenlänge von 20  $\mu\text{m}$  (10  $\mu\text{m}$ ). Pfeile (unten) weisen auf die schwachen Banden von  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ,  $\text{CCl}_3\text{F}$ ,  $\text{CCl}_4$  und  $\text{CH}_3\text{Cl}$  hin. Die vertikale Skala bezeichnet den Transmissionskoeffizienten, d. h. den Anteil der durchgelassenen Strahlung (0 = vollständige Absorption; unteres Bild verkürzte Skala; Entwurf R. Glowienka).

genden Zunahmegeschwindigkeit spielt es anscheinend die wichtigste Rolle.

Die Chlorfluormethane (Frigen) kommen in der Natur nicht vor, werden aber mit etwa 0,7 Mt jährlich produziert und (wegen ihres niedrigen Siedepunktes und ihrer großen chemischen Stabilität) in Kühlschränken und Aerosol-Sprüh Dosen viel verwendet; aus diesen Gründen liegt ihre Zunahmegeschwindigkeit mit rund 7 % pro Jahr besonders hoch. Bei konstanter Produktion dürfte ihr z. Zt. noch minimaler Anteil in den nächsten 40 bis 80 Jahren um einen Faktor 5 bis 10 steigen und dementsprechend auch  $\Delta T$  auf 0,1 bis 0,2 K.

Wesentlich wichtiger ist das Ozon ( $\text{O}_3$ ), dessen komplexe Umsetzungen erst in den letzten Jahren aufgeklärt worden sind. Während es in der Stratosphäre anscheinend – als Folge photochemischer Abbauprozesse, vor allem durch Chlorverbindungen – allmählich abnimmt, nimmt es in der Troposphäre zu, da hier entsprechende Reaktionen mit den (ebenfalls wachsenden) anthropogenen Spurengasen  $\text{CO}$  und  $\text{NO}_x$  Ozon aufbauen. Das geschieht vor allem beim Smog in den Industriegebieten (Los Angeles, Kölner Bucht),

Tabelle 2. Treibhauseffekt der Spurengase.

Formel	Mischungsverhältnis [V]	Absorptionsbande [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$\Delta T$ [K]*)
$\text{O}_3$	0–50 ppb	1042	0,4 (+25 %)
$\text{CH}_4$	1700	1305 (R)	~ 0,24
$\text{N}_2\text{O}$	320	1282 (R)	~ 0,56
$\text{CFCl}_3$	0,16	1087,847	} 0,045
$\text{CF}_2\text{Cl}_2$	0,26	1100, 917 1149	
$\text{NH}_4$	6	952	
$\text{SO}_2$	0,5	1151	0,10
$\text{CF}_4$	0,06	1280 (R)	0,03
$\text{CCl}_4$	0,6	770	0,15
(+ $\text{CH}_3\text{Cl}$ )		(732, 1015)	

R = am Rand des Fensters: Überlappung?

\*)  $\Delta T$  für Verdoppelung

und eine entsprechende Zunahme ist inzwischen nachweisbar. Die seit langem bekannte Absorptionsbande liefert schon bei einer Zunahme um 25 % eine deutliche Erwärmung  $\Delta T$ .

Die übrigen Spurengase spielen anscheinend beim Treibhauseffekt nur eine geringe Rolle: über ihren Synergismus ist wenig bekannt. Auf jeden Fall darf eine quantitative Abschätzung heute diese Spurengase und ihren erwarteten Anstieg nicht mehr vernachlässigen. Auch muß geprüft werden, ob eine einfach additive Behandlung (im Sinne des oben verwendeten Parameters  $n \text{ C B}^{-1} = D$ ) berechtigt ist.

## CO<sub>2</sub> und Klima in den letzten 40 000 Jahren

Die oben erwähnten physikalischen Laboratorien in Bern und Grenoble haben 1980 unabhängig voneinander eine fundamentale Entdeckung gemacht: Sie haben in Eisbohrkernen von Grönland und der Antarktis gefunden, daß zum Höhepunkt der letzten Eiszeit, vor 15 000 bis 20 000 Jahren, der CO<sub>2</sub>-Gehalt der im Eis eingeschlossenen Luftblasen auf 180 bis 200 ppm gesunken war. Das hat sich inzwischen nach Ausmerzung aller Fehlerquellen, nach Vergleichsmessungen und Verfeinerung der Meßmethoden voll bestätigt. Diesem CO<sub>2</sub>-Gehalt entspricht (Abbildung 3, links) eine Abkühlung um nahezu 2 K; dies erklärt eine Anzahl bisher unverstandener Befunde in einem größeren Zusammenhang. Die erwähnte Verfeinerung durch Verwendung der Laser-Spektroskopie (Oeschger, Bern) macht eine zeitliche Feinauflösung bis zur Größenordnung von 100 Jahren möglich. Das erstaunlichste Resultat – die Arbeiten sind noch im Druck – sind die parallelen Änderungen von Temperatur (aus dem <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O-Verhältnis abgeleitet) und CO<sub>2</sub>-Gehalt. Änderungen der Jahresmitteltemperatur von ca. 2 K, des CO<sub>2</sub>-Gehalts von 60 bis 80 ppm in rund 100 Jahren sind in der Zeitspanne der letzten 40 000 Jahre, d. h. unter völlig natürlichen Bedingungen, wiederholt gefunden worden. Solche Änderungen ohne menschliche Einwirkung mit gleicher Zeitskala und Amplitude wie heute geben der in naher Zukunft erwarteten Entwicklung – deren Nachweis in dem aktuellen Temperaturverlauf von Land und Meer seit 1880 noch nicht gesichert erscheint – einen noch höheren Stellenwert. Eine Diskussion dieser Störungen im Haushaltsgleichgewicht (Doppelpfeile in Abbildung 2) ist hier nicht möglich.

## Ausblick auf die Zukunft

Was sich in der Vergangenheit ohne Zutun des Menschen ereignet hat, kann sich unter der vielfältigen Einwirkung des Menschen, unter nicht grundsätzlich abweichenden Randbedingungen, wiederholen. Wir stehen mitten in dem größten je unternommenen, geophysikalischen Experiment: Wir verbrennen die fossilen Brennstoffe, die die Natur

mit Hilfe der Photosynthese in 400 Millionen Jahren aufgebaut hat, in wenigen hundert Jahren und ändern so die Zusammensetzung der Atmosphäre, ihren Strahlungs- und Wärmehaushalt. In die möglichen Folgen für Klima- und Wasserhaushalt, für Landwirtschaft und Fischerei gewinnen wir erst allmählich einen Einblick (Bach, Clark, Kellogg und Schwabe). Eine mögliche Konsequenz ergibt sich auch aus der Klimageschichte: In der Zeit vor 15 bis 3 Millionen Jahren war die Antarktis bereits hoch vereist (sie ist auch heute größtenteils stabil), während die Arktis noch eisfrei war. Dieser ganz ungewöhnliche Zustand könnte durchaus wiederkehren, wenn wir eine globale Erwärmung von 4 bis 5 K zuließen, entsprechend einer CO<sub>2</sub>-Zunahme auf 550 bis 700 ppm (Abbildung 3). Eine so enorme Asymmetrie des Klimas wäre begleitet von einer Verlagerung aller Klimazonen um 400 bis 800 km nach Norden sowie einer Abschwächung der subtropischen Winterregenzone im Mittelmeergebiet, im Nahen Osten und in Kalifornien. Eine Austrocknung der Breitenzone 35 bis 45 °N ist viel wichtiger als die (nur scheinbar geringfügigen) Temperaturänderungen: Sie gefährdet die Wasserversorgung ganzer Zonen. Diese Konsequenz ergibt sich übereinstimmend aus Modellversuchen (Manabe und Wetherald), Klimageschichte (Budyko) und Extrapolation empirischer Zusammenhänge (Flohn). Eine solche Konkordanz spricht für die grundsätzliche Richtigkeit dieser Ergebnisse. Den Zeitpunkt solcher Änderungen haben wir in gewissem Umfang noch in der Hand: Geschwindigkeit und Ausmaß der CO<sub>2</sub>-Zunah-

me hängen von unserer Energiepolitik, besonders von der künftigen Rolle alternativer Energiequellen ab (Bach). Die klimatischen Auswirkungen sind teils positiv, großenteils aber katastrophal; bei dem erwarteten Anwachsen der Erdbevölkerung auf 8 bis 12 Milliarden in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts ist Auswanderung keine Lösung.

Hermann Flohn

### Zusammenfassende Literatur:

- W. Bach: Gefahr für unser Klima? C. F. Müller, Karlsruhe 1982.  
 A. Berger (Hrsg.): Climatic Variations and Variability: Facts and Theories. NATO Advanced Studies Series C 72. D. Reidel, Dordrecht 1981.  
 W. C. Clark (Hrsg.): Carbon Dioxide Review 1982. Oxford University Press 1982.  
 W. W. Kellogg und R. Schwabe: Climate Change and Society. Westview Press, Boulder, Colorado/USA 1981.  
 G. J. McDonald (Hrsg.): The Long-Term Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide Levels. Ballinger, Cambridge, Massachusetts/USA 1982.  
 H. Oeschger, B. Messerli und M. Svilar: Das Klima: Analysen und Modelle. Geschichte und Zukunft. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg 1980.

Über die grundlegenden biogeochemischen Cyclen unterrichten ausführlich die von B. Bolin und Mitarbeitern herausgegebenen SCOPE-Reports 13 (1979), 16 (1981) und 21 (1983) bei J. Wiley and Sons, Chichester-New York.