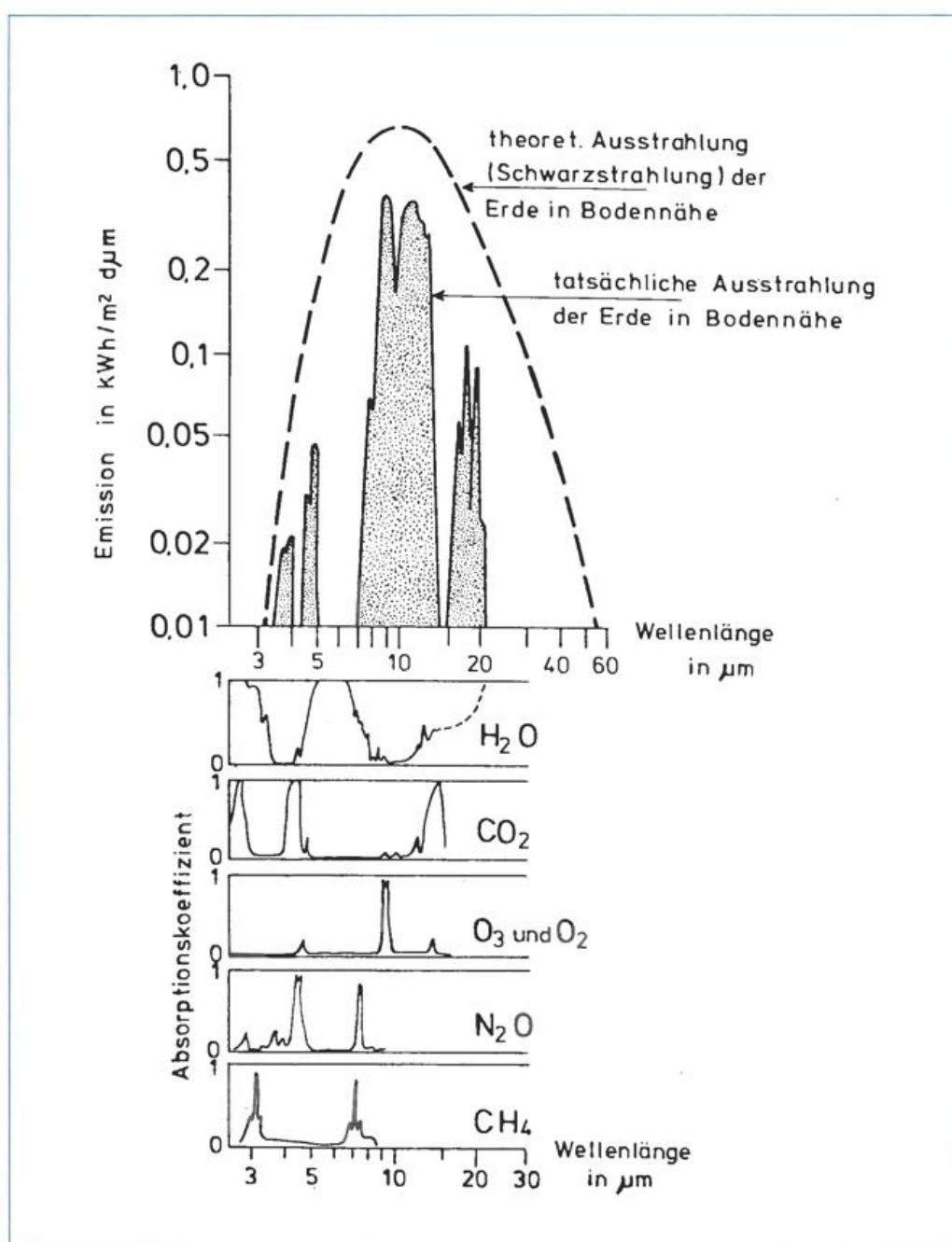


Klimarelevante Spurenstoffe I



Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter

Dipl.-Met. M. Schlegel

Redaktionsausschuß

Prof. Dr. A. Baumgartner (München)
Prof. Dr. F. Fiedler (Karlsruhe)
Prof. Dr. H.-W. Georgii (Frankfurt)
Prof. Dr. H. Hinzpeter (Hamburg)
Dr. H. Reiser (Offenbach)
Dr. R. Simonis (Neustadt a. d. Weinstr.)
Dr. S. Uhlig (Traben-Trarbach)
Prof. Dr. F. Wippermann (Darmstadt)

Zum Titelbild

Das Bild zeigt oben die terrestrische Ausstrahlung in Bodennähe (IR-Bereich) nach FORTAK (1982), unten die zugehörige Absorption einiger wichtiger Spurengase nach FLEAGLE und BUSINGER (1963).

promet erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes — Zentralamt — Frankfurter Straße 135, 6050 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang (4 Hefte) DM 36,—, Einzelheft DM 10,—.

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Druck: Schön & Wetzel GmbH, Offenbacher Landstraße 368, 6000 Frankfurt (Main).

ISSN 0340-4552

Meteorologische Fortbildung

15. Jahrgang, Heft 4, 1985

Thema des Heftes:

Klimarelevante Spurenstoffe I

(Fachliche Redaktion: C.-D. Schönwiese, Frankfurt am Main)

Beiträge:	Seite
Zur Einführung (C.-D. SCHÖNWIESE)	1
1 C.-D. SCHÖNWIESE Kohlendioxid	2
2 H.-W. GEORGII Weitere klimarelevante Spurengase	5
3 G. H. KOHLMAIER, H. BRÖHL, U. FISCHBACH, A. JANICEK, G. E. K. BENDEROTH Die Modellierung des globalen Kohlenstoffkreislaufes	12
4 W. BACH Energieszenarien	19
Aus dem Deutschen Wetterdienst	
MOS: Die statistisch-numerische Modellinterpretation im DWD (W. KUSCH, R. v. PANDER, W. PEYINGHAUS)	29
Buchbesprechungen — Neuerscheinungen	32

Thema des Heftes:

Klimarelevante Spurenstoffe I

Zur Einführung

Es ist sicherlich eine Binsenweisheit, daß auch in der Atmosphäre die Qualität zunächst wichtiger als die Quantität ist: Die Hauptbestandteile interessieren uns vergleichsweise wenig, umso mehr die — wie der Name sagt — in geringen Konzentrationen auftretenden Spurenstoffe (Spurengase und Aerosole). Dafür gibt es im wesentlichen zwei Gründe: erstens deren toxische Wirkung („umweltrelevante“ Spurenstoffe) und zweitens bestimmte Strahlungseigenschaften, verbunden mit einer relativ langen atmosphärischen Verweilzeit („klimarelevante“ Spurenstoffe). Ob nun das Klima zur Umwelt gehört oder umgekehrt, das soll hier nicht diskutiert werden; jedenfalls läßt sich — trotz weitgehend unterschiedlicher Betrachtungsweise — das eine nicht strikt vom anderen trennen.

In diesem und dem folgenden Heft (Promet 1'86) wollen wir uns mit der **Klimarelevanz** der Spurenstoffe beschäftigen. Das Titelbild macht den physikalischen Hintergrund deutlich: die Absorptionseigenschaften bestimmter Spurengase im relativ langwelligen (IR) Spektralbereich, allem voran des Wasserdampfs, die (ohne Kompensation im relativ kurzwelligen Bereich) eine Erhöhung der atmosphärischen Gegenstrahlung und somit eine Temperaturerhöhung der bodennahen Luftschicht bewirken (sog. Glashauseffekt). Kommt es zu einem langfristigen atmosphärischen Konzentrationsanstieg solcher Spurengase, wobei eine relativ lange atmosphärische Verweilzeit (auf Grund der chemischen Reaktionsgegebenheiten, i. a. mindestens einige Jahre) Vorbedingung ist, so muß eine Klimaänderung, primär eine Erwärmung der bodennahen Luftschicht, erwartet werden.

Zu der oben genannten Binsenweisheit läßt sich noch eine zweite hinzufügen: Im Klimasystem hängt alles mit allem zusammen. Das bedeutet, eine beispielsweise durch Kohlendioxid-(CO₂-)Erhöhung hervorgerufene bodennahe Erwärmung führt unter anderem zu intensiverer Verdunstung und somit zu einer höheren Wasserdampfkonzentration der Atmosphäre, was auf Grund der IR-Absorptionseigenschaften des Wasserdampfes (vgl. Titelbild) den CO₂-Effekt ganz wesentlich verstärkt (positive Rückkoppelung). Wenn daher im folgenden vereinfachend vom „CO₂-Effekt“ und anderen Effekten die Rede ist, kann damit sozusagen nur der erste Anstoß gemeint sein, der einen ganzen Komplex atmosphärischer Zustandsgrößen ändert, natürlich auch die atmosphärische Zirkulation. Dies wiederum ändert die Niederschlagscharakteristika, was ökologisch und sozioökonomisch weit wichtiger als die Temperaturänderung ist.

In diesem Heft gehen wir vom CO₂ aus (Beitrag 1: SCHÖNWIESE), wobei zunächst nur die Fakten behandelt werden, die aus den Messungen ersichtlich sind. Die erhebliche Zahl weiterer klimarelevanter Spurengase, die im Laufe der Zeit immer bedeutsamer werden, behandelt der Beitrag 2 (GEORGII). Sollte es zu einer Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration kommen, so fallen diese weiteren Spurengase rein thermisch gesehen nach heutiger Überzeugung etwa genauso stark ins Gewicht wie der CO₂-Effekt allein. Heute liegt ihre Wirksamkeit allerdings noch unter 50% der CO₂-Wirkung. Trotzdem ist es aber schon heute wichtig, das Spurengasproblem in seiner Gesamtheit zu sehen und sich nicht auf CO₂ zu beschränken, will man später den Effekten nicht hinterherlaufen (wie derzeit leider beim Waldsterben).

Wie dieses Spurengasproblem auch angepackt werden mag, die Gretchenfrage lautet doch: Wie sieht die Zukunft aus, in 50 Jahren, in 100 Jahren? Welche Klimaauswirkungen sind dann zu erwarten? Welche sind möglicherweise schon eingetreten? Hier, spätestens, ist nach der Qualität offenbar doch wieder die Quantität gefragt. Zur Beantwortung dieser Fragen ist es notwendig, den bzw. die Kohlenstoffkreislauf (-läufe) zu verstehen und daher möglichst realistisch zu modellieren; dies wird im Beitrag 3 (KOHLMAYER et al.) diskutiert. Beim Kohlenstoffkreislauf wiederum ist zu klären, was mit dem anthropogenen Kohlenstoffeintrag in die Atmosphäre geschieht und wie dieser Eintrag in Zukunft aussehen wird. Da eine solche Prognose heute in eindeutiger Weise nicht möglich ist, kommt man um sog. Szenarien, genauer „Energieszenarien“ (Beitrag 4: BACH) nicht herum, und es ist sowohl die „Philosophie“ als auch die Aussagekraft solcher Szenarien von Interesse. Weitergehend stellt sich die Frage nach realistischer Klimamodellierung des Spurengaseffekts, nach der Abgrenzung dieses Effekts von den „natürlichen“ Klimaänderungen sowie nach der Rolle der Aerosole, die dem Spurengas-Effekt entgegenwirken können.

Das vorliegende Heft bildet mit dem Heft „Klimarelevante Spurenstoffe II“ (Promet 1'86) inhaltlich eine Einheit; die Trennung in zwei Hefte mußte allein aus technischen Gründen erfolgen. Deshalb sollen die teilweise schon hier zitierten Beiträge des Folgeheftes kurz aufgelistet sein:

- Beitrag 5: Die Modellierung des Spurengas-Effekts (BERGER und TRICOT).
- Beitrag 6: Der statistische Nachweis des Spurengas-Effekts (SCHÖNWIESE).
- Beitrag 7: Langfristige Änderungen des Aerosols (JAENICKE).
- Beitrag 8: Der Einfluß des Aerosols auf das Klima (GRASSL).

Ich danke meinen Kollegen und dem Hauptschriftleiter für die kooperative Zusammenarbeit, die sich für Sie, lieber Leser, hoffentlich in aktueller und verständlicher wissenschaftlicher Information niedergeschlagen hat.

C.-D. SCHÖNWIESE

Kohlendioxid (CO₂)

1 Physikalische Basis

Vor knapp 50 Jahren veröffentlichte CALLENDAR (1938) eine Untersuchung mit dem Titel „The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature“, in der zwei Behauptungen aufgestellt werden:

- a) Die atmosphärische CO₂-Konzentration steigt auf Grund der Nutzung fossiler Energieträger langfristig an.
- b) Dieser Anstieg verursacht eine Klimaänderung globalen Ausmaßes, insbesondere eine Temperaturerhöhung in der bodennahen Atmosphäre.

Zuvor hatten schon FOURIER (1827) und danach ARRHENIUS (1896) auf den CO₂-bedingten Erwärmungseffekt hingewiesen (siehe historische Zusammenstellung bei BACH 1982), und von ARRHENIUS stammt bereits die vermutlich erste quantitative Abschätzung: 8–9 K Temperaturerhöhung bei 2,5–3facher CO₂-Konzentration der Atmosphäre.

Erst vor rund 30 Jahren jedoch, nach weiteren Hinweisen und Abschätzungen (z.B. PLASS 1956) und nach dem Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957, verdichtete sich die Einsicht, daß genaue und kontinuierliche Messungen durchgeführt werden müssen, möglichst in sog. „Reinluft“ (ohne allzu starke regionale Beeinflussung), um die oben genannte erste Behauptung zu überprüfen und vor allem zu quantifizieren. Dementsprechend liegen seit 1958 vom Mauna Loa (Hawaii, knapp 3400 m Höhe) und vom Südpol (dort leider mit größeren Lücken) CO₂-Meßreihen vor (KEELING 1982, WALLÉN 1983, LISS und CRANE 1983), auf die im Abschnitt 2 eingegangen wird.

Die zweite Behauptung ist die wichtigere und begründet erst, warum wir uns mit der langfristigen CO₂-Änderung so intensiv befassen müssen. Qualitativ ist der behauptete Temperatureffekt ja ein physikalisches Faktum: Jeder Meteorologe kennt die grundlegende Bedeutung der Strahlungsvorgänge in der Atmosphäre und weiß, daß relativ langfristig (d.h. klimatologisch gesehen) eine Änderung der Strahlungs- und Wärmebilanz an der Grenzfläche Erde-Atmosphäre den Klimazustand ändern muß. Eine simple Bilanzrechnung der relativ kurzwelligen solaren Einstrahlung und der relativ langwelligen terrestrischen Ausstrahlung führt zu einer global gemittelten Strahlungsgleichgewichtstemperatur von 255 K, falls die Atmosphäre vernachlässigt wird. Die tatsächlich beobachtete Temperatur von rund 288 K ist auf die Strahlungsabsorption (und entsprechende atmosphärische Gegenstrahlung) bestimmter Spurengase im relativ langwelligen Bereich (sog. IR-Absorber) zurückzuführen (ohne vollständige Kompensation im relativ kurzwelligen Bereich). Zu diesen IR-Absorbern gehört eben auch das CO₂; steigt seine atmosphärische Konzentration an, muß auch die bodennahe Lufttemperatur ansteigen.

Der bedeutendste dieser IR-Absorber ist freilich der Wasserdampf (H₂O), dessen Absorptionsbanden aber einige Lücken im IR-Bereich offen lassen, in denen die terrestrische Ausstrahlung folglich besonders effektiv sein kann (vgl. Titelbild und FORTAK 1982). Die größte dieser Lücken, das sog. „große Wasserdampfenster“ 8–15 µm (ausgerechnet im Be-

reich des Maximums der Planckschen Strahlungskurve) wird durch eine Reihe anderer Spurengase teilweise geschlossen, wozu das CO₂ mit seiner starken Absorptionsbande bei 14,7 µm beiträgt (schwächere CO₂-Absorption bei 4,5 µm, daneben auch bei 7,6 und ca. 10 µm; weitere IR-Absorber s. Beitrag 2). Dieser Absorptions- und Strahlungsbilanzeffekt muß besonders wirksam sein, wenn das betreffende Gas eine relativ lange atmosphärische Verweilzeit aufweist. Auch das ist beim CO₂ mit Verweilzeiten von einigen Jahren (ca. 5–10) der Fall. Die in Bodennähe festzustellende resultierende Temperaturerhöhung wird nicht ganz korrekt (da die Atmosphäre den turbulenten Wärmeaustausch nicht unterbindet) aber häufig als „Glashauseffekt“ bezeichnet.

Wie gesagt, dieses physikalische Faktum ist qualitativ klar. Wie aber sieht quantitativ der CO₂-Beitrag dazu aus und wie groß wird dieser Beitrag in z. B. 100 Jahren sein bzw. wie groß war er in den letzten Eiszeit? Seit der Zeit von PLASS (1956) und MÖLLER (1963) sind zur Beantwortung dieser Fragen viele Modellrechnungen durchgeführt worden, über die der Beitrag 5 detailliert berichtet. Nimmt man die weiteren „IR-absorbierenden“ Spurengase hinzu, so muß neben den gesamten relevanten physikalischen Vorgängen der atmosphärischen Zirkulation (einschließlich ozeanischer, kryosphärischer und biosphärischer Einflüsse) auch die Chemie der Atmosphäre (und des Ozeans) berücksichtigt werden. Trotz gewichtiger Fortschritte in der Modellierung bleibt eine gewisse quantitative Unsicherheit offenbar bestehen.

2 Messungen

Auf der Grundlage dieser physikalischen Gegebenheiten ergibt sich nun zwingend die Frage: Ändert sich die atmosphärische Konzentration der strahlungsrelevanten Spurengase im Laufe der Zeit? Im Fall des CO₂ (weitere Spurengase s. Beitrag 2) wird häufig und mit Recht auf die Meßreihe vom Mauna Loa hingewiesen (s. Abb. 1), die seit März 1958 auf Monatsbasis fast kontinuierlich vorliegt (Lücken: Juni und Oktober 1958, Februar bis April 1964; KEELING 1982, 1985). Es handelt sich dabei um eine der „BAPMoN-(Background Air, Pollution Monitoring Network)“ Stationen der WMO (1972–1980; s. auch WALLÉN 1983) in einer von regionalen Effekten möglichst ungestörten „sauberen“ Atmosphäre. Zwei wesentliche Charakteristika der Mauna Loa-Daten sind sofort zu erkennen (Abb. 1): ein ausgeprägter Jahresgang und ein beständiger Anstieg des Jahresmittels.

Der Jahresgang ist zweifellos auf die jahreszeitlich wechselnde Vegetation der außertropischen Vegetation der Nordhemisphäre („Landhalbkugel“) zurückzuführen: Bei Einsetzen der Assimilation (Vegetationsperiode) ab Frühjahr wird der Atmosphäre CO₂ entzogen, während ab Herbst der Atmosphäre durch Verwesung u.ä. CO₂ wieder zugeführt wird. Ein Vergleich der mittleren Jahresgänge in Point Barrow (71°N), auf dem Mauna Loa (20°N) und am Südpol (s. Abb. 2) zeigt deutlich, wie die Jahresamplitude von hohen nordhemisphärischen Breiten aus äquatorwärts abnimmt und auf der Südhalbkugel (bereits bei Samoa, 14°S) nahezu verschwindet.

Entsprechend verschieben sich auch die Maxima und Minima. Interessant ist, daß am Südpol wieder ein schwacher Jahresgang auftritt, wobei die Vegetation der außertropischen Südhemisphäre beteiligt sein dürfte. Der Rückgang der Jahresmittelwerte (besser: deren Zeitverschiebung) von Nord nach Süd läßt darauf schließen, daß sich die wesentlichen anthropogenen CO₂-Quellen auf der Nordhemisphäre befinden und daß die „Transportzeit“ (von der Nord- zur Südhemisphäre) etwa drei Jahre beträgt.

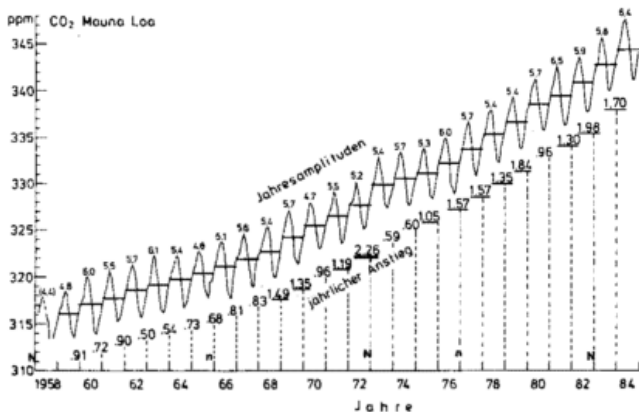


Abb. 1: Monatliche (Kurve) und jährliche (waagrechte Linien) Mittelwerte der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf dem Mauna Loa, Hawaii (19° 32'N, 155° 35'W, 3397 m) 1958—1984; Daten nach KEELING (1982, 1985, Scripps Institution of Oceanography). Werte des jährlichen Anstiegs, die den Mittelwert übersteigen, sind unterstrichen (1972/73 mit > 95% Signifikanz, doppelt unterstrichen). N bedeutet besonders starke, n weitere ausgeprägte El Nino — Ereignisse.

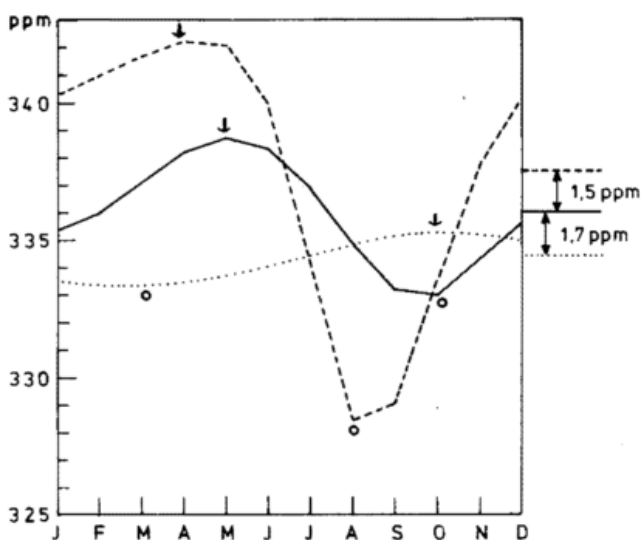


Abb. 2: Mittlere Jahressgänge 1975—1982 der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf dem Mauna Loa (vgl. Abb. 1), ausgezogen, in Point Barrow (Alaska, 71° 19'N, 156° 36'W, 11 m), gestrichelt, und am Südpol (89° 59'S, 24° 48'W, 2810 m), gepunktet. Am rechten Rand Differenzen der mittleren Jahresmittelwerte; Daten nach CDIC 1984 und KEELING 1985.

Es ist unverkennbar, daß sich die Amplitude des CO₂-Jahresganges intensiviert. Auf dem Mauna Loa (s. Abb. 3) zeigt sich dies signifikant (> 95%, entsprechend einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 0.05) erst nach einem merkwürdigen Rückgang im Jahr 1970 und beträgt für die letzten ca. 15 Jahre 20%. (Ein logarithmischer Ansatz ab 1958 erhöht die Signifikanz des Trends nicht.) Dieses Phänomen läßt an eine Zunahme der (außertropischen) lebenden Biomasse der Nordhemisphäre denken, muß aber durch genaue Modellierung der Kohlenstoff-Flüsse genau untersucht werden (s. Beitrag 3).

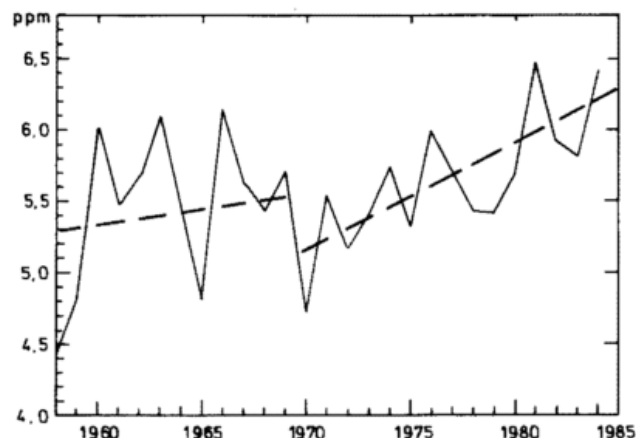


Abb. 3: Jahresamplituden (aus Monatsmittelwerten) der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf dem Mauna Loa (vgl. Abb. 1). Die gestrichelten Linien geben lineare Regressionen an (ab 1970 Anstieg um 0,07 ppm pro Jahr).

Zurück zur Abbildung 1: Das klimatologisch interessierende Phänomen ist der beständige Anstieg der Jahresmittelwerte, der mit gewisser Wert- bzw. Zeitverschiebung überall auf der Welt beobachtet wird und zweifellos auf der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) beruht (zu einem geringen Teil auch auf der Zementproduktion); vgl. BACH et al. 1983 und Beitrag 4. Kopfzerbrechen bereitet der von Jahr zu Jahr stark variierende Betrag des CO₂-Anstiegs (bisher festgestelltes Maximum fast 2 ppm für 1982/1983), der mit entsprechenden Variationen der „airborne fraction“ (d. h. Anteil der anthropogenen CO₂-Emission, der in der Atmosphäre verbleibt, nach LISS und CRANE im Mittel rund 0,6) einhergeht. Allerdings ist eine deutliche Parallelität hoher Werte mit dem Auftreten des El Nino-Phänomens offensichtlich, das wiederum mit der „Southern Oscillation“ negativ korreliert ist (s. z. B. NEWELL 1983). Die naheliegende Erklärung, daß mit steigender Wassertemperatur der CO₂-Partialdruck ansteigt und somit mehr CO₂ an die Atmosphäre abgegeben wird, ist zu einfach (vgl. Beitrag 3).

Wenn nun der Klimaeffekt abgeschätzt werden soll, der auf dem langfristigen CO₂-Anstieg auf Grund der Nutzung fossiler Energieträger beruht, ist es wichtig, den vorindustriellen Wert zu kennen. Noch vor zwei bis drei Jahren wurde auf Grund früherer sporadischer Messungen in der Atmosphäre (CALLENDAR 1958, WALLÉN 1983) und auf Grund von Gasextraktionsmessungen von Eisbohrkernen eine Wertespanne von ca. 260—295 ppm angegeben. Vor ein bis zwei Jahren mußte man wegen der genauen und aufwendigen Eis-

bohrtechnik eher dem unteren Wert zuneigen. In jüngster Zeit kann man sich entweder an die antarktischen Eisbohrmessungen von NEFTEL et al. (1985) halten, die vermutlich die bisher verlässlichste Information bieten und auf 278 oder 279 ppm ± 3 ppm hinauslaufen (s. Abb. 4). Dabei dürfen aber die ebenfalls neuen Ergebnisse von RAYNAUD et al. (1985) nicht übersehen werden, die für die Zeit vor 1600 oder vor 1500 bei etwa 270 ppm (± 10 ppm) liegen und die in der Zeit zwischen etwa 1700 und 1850 sogar tiefere Werte (ca. 260 ppm) erbringen. Dies würde bedeuten, daß der industriell bedingte Anstieg erst zwischen 1800 und 1850 begonnen hat.

Die dick ausgezogene Kurve in der Abbildung 4 ist eine doppelt-logarithmische Regression (SCHÖNWIESE 1986), die auf den Werten von NEFTEL et al. beruht, allerdings um +1 ppm korrigiert, um eine bessere Anpassung an die Mauna Loa-Werte zu gewährleisten. Die ebenfalls doppelt — logarithmische Regression der Mauna Loa — Werte würde hypothetisch zu einem Wert von 600 ppm (wie in Modellrechnungen häufig angenommen) um das Jahr 2070 führen. Diese grobe Abschätzung ist jedoch, angesichts der wahrscheinlichen Energie-Szenarien (vgl. Beitrag 4), als frühestmögliches Datum zu interpretieren.

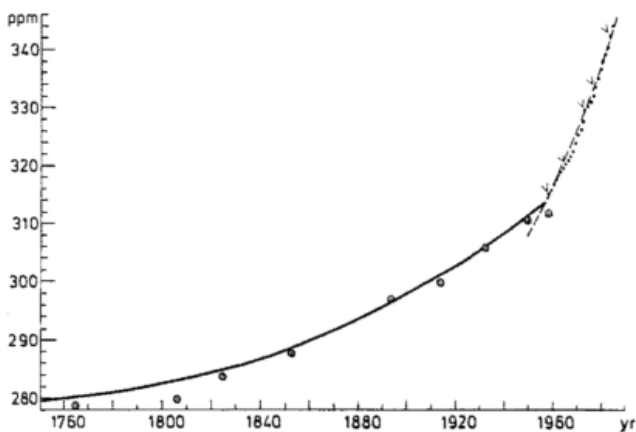


Abb. 4: Indirekte Bestimmung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration aus Gasextraktionsmessungen von Eisbohrkernen (Siple Station $75^\circ 55' \text{S}$, $83^\circ 55' \text{W}$), wie sie im antarktischen Sommer 1983/84 von NEFTEL et al. (1985) durchgeführt wurden, Kreise, und Jahresmittelwerte vom Mauna Loa (vgl. Abb. 1), Punkte. Die dick ausgezogene und die gestrichelte Linie geben doppelt-logarithmische Regressionen wieder, wobei im ersten Fall eine Korrektur von +1 ppm zur Anpassung an die Mauna Loa — Werte vorgenommen wurde. Die Pfeile verweisen auf El Nino — Ereignisse entsprechend Abb. 1 (nach SCHÖNWIESE 1986, etwas verändert).

Noch weiter zurückreichende Messungen, die uns ebenfalls aus Eisbohrungen zur Verfügung stehen, sind wesentlich unsicherer, jedoch keineswegs uninteressant. Es soll hier auf die vorsichtige Interpretation von NEFTEL et al. (1982) zurückgegriffen werden, die überraschend ausgeprägte Fluktuationen

in der Zeitskala 10^4 bis 10^5 Jahre aufzeigt (vgl. Abb. 5). Danach muß zum Höhepunkt (oder besser Tiefpunkt) der letzten Eiszeit (Würm-Kaltzeit) ein CO_2 -Niveau von 200 ppm ± 20 (oder ± 30) ppm vermutet werden. Dieses Ergebnis wiegt umso mehr, als — soweit das die zeitliche Auflösung erlaubt — phasengleich mit der CO_2 -Konzentration auch die Temperaturvariationen verlaufen sind und sich für die Zeit des sog. Klima-Optimums (Altithermum vor ca. 3000—7000 Jahren, FLOHN 1985, SCHÖNWIESE 1979) ein Wert von über 300 ppm ergibt. (Werte von 500 ppm und mehr, wie sie manchmal behauptet werden, sind unwahrscheinlich.) Daraufhin ist die Frage zu stellen, inwieweit dieses niedrige CO_2 -Niveau der Eiszeit zum damals vorherrschenden tiefen Temperaturniveau beigetragen haben könnte und wie groß die CO_2 -Temperatur-Signale im Klima überhaupt sind (s. Beiträge 5 und 6). Es ist ja durchaus möglich, daß die Temperatur die atmosphärische CO_2 -Konzentration steuert (über ozeanische Vorgänge) und nicht umgekehrt. Dies wiederum ist ein Problem der realistischen Kohlenstoff-Fluß- und Klimamodellierung (Beiträge 3 und 5) und der relevanten Zeitskalen. Außerdem müssen neben den Spurengasen (von denen CO_2 nur ein Vertreter ist) und Aerosolen (Beiträge 7 und 8) auch die „natürlichen“ Einflüsse auf das Klima mit berücksichtigt und die Klimameßreihen nach dem CO_2 -Signal (empirisch-statistisch) abgefragt werden (Beitrag 6).

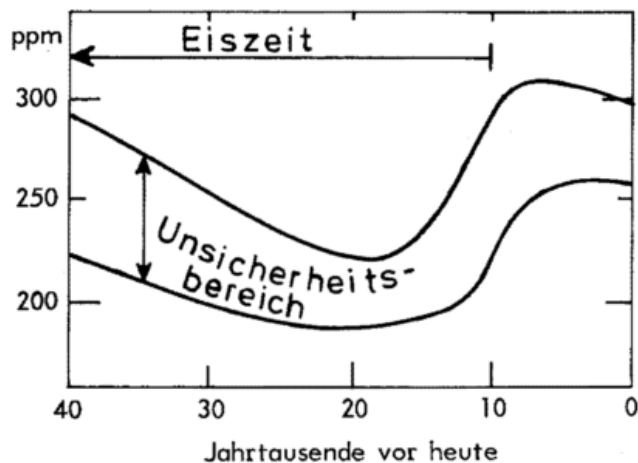


Abb. 5: Schwankungen der atmosphärischen CO_2 -Konzentration der letzten $40 \cdot 10^3$ Jahre, basierend auf Eisbohrmessungen und einer vorsichtigen Abschätzung von NEFTEL et al. 1982 (s. auch OESCHGER et al. 1980).

Neben den Eisbohranalysen, von denen noch viele Hinweise auf die Klimageschichte und die klimarelevanten Prozesse zu erwarten sind, existiert derzeit ein weltweites Netz von nicht ganz 40 Stationen, an denen die atmosphärische CO_2 -Konzentration gemessen wird (s. z. B. Karte bei BACH 1982). Dazu gehören das bereits genannte BAPMoN-Netz (WALLÉN 1983, WMO 1972—1980, vgl. auch Beitrag 2), das GMCC (Geophysical Monitoring for Climatic Change) der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA; Dokumentation s. CDIC 1984) und das Meßnetz der Scripps Institution of Oceanography (USA). In der Bundesrepublik Deutschland sind die Stationen Langenbrügge, Schauinsland, Brotjacksriegel, Deuselbach (jeweils Umweltbundes-

amt) und Wank (Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung) zu nennen, die alle in das BAPMoN-Netz integriert sind.

Literatur

- BACH, W.: Gefahr für unser Klima. Karlsruhe: C. F. Müller (1982).
- BACH, W. et al. (Eds.): Carbon dioxide. Dordrecht: Reidel (1983).
- CALLENDAR, G. S.: The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* 64 (1938), S. 223—237.
- CALLENDAR, G. S.: On the amount of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus* 10 (1958), S. 243—248.
- CDIC (Carbon Dioxide Information Center): Atmospheric CO₂ concentrations — the NOAA/GMCC flask and continuous network. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory No. NDP-005 (1984).
- CLARK, W. C. (Ed.): Carbon dioxide review 1982. Oxford: Clarendon (1982).
- FLOHN, H.: Das Problem der Klimaänderungen in Vergangenheit und Zukunft. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft (1985).
- FORTAK, H.: Meteorologie. 2. Aufl. Berlin: Reimer (1982).
- KEELING, C. D.: Measurements of the concentration of carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii. In: CLARK (s. o.), S. 377—385; priv. Mitt. (1985).
- LISS, P. S.; CRANE, A. J.: Man-made carbon dioxide and climatic change. Norwich: Geo Books (1983).
- MÖLLER, F.: On the influence of changes in the CO₂ concentration in air on the radiation balance of the Earth's surface and on the climate. *J. Geophys. Res.* 68 (1963), S. 3877
- NEFTEL, A. et al.: Ice core sample measurements give atmospheric CO₂ content during the past 40,000 yr. *Nature* 295 (1982), S. 220—222.
- NEFTEL, A. et al.: Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries. *Nature* 315 (1985), S. 45—47.
- NEWELL, R. E.; HSIUNG, J.: Sea surface temperature, atmospheric CO₂ and the global energy budget: some comparisons between the past and present. In: MÖRNER, N. A.; KARLEN, W. (Eds.): Climatic change on a yearly to millennial basis. Dordrecht: Reidel (1984), S. 533—561.
- OESCHGER, H. et al.: Das Klima. Heidelberg: Springer (1980).
- PLASS, G. N.: The carbon dioxide theory of climate. *Tellus* 8 (1956), S. 140—154.
- RAYNAUD, D.; BARNOLA, J. M.: An Antarctic ice core reveals atmospheric CO₂ variations over the past few centuries. *Nature* 315 (1985), 309—311.
- SCHÖNWIESE, C.-D.: The CO₂ climate response problem. A statistical approach. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimat. Ser. B.*, im Druck (1986).
- WALLEN, C.—C.: Monitoring the atmospheric CO₂ concentration. In: BACH, W. et al. (s. o.), S. 3—29.
- WMO/UNEP/EPA/NOAA: Global atmospheric background monitoring for selected environmental parameters. Asheville: National Climatic Center, NC-28801 (1972—1980).

2 H.-W. GEORGII

Weitere klimarelevante Spurengase

1 Einleitung

Bei allen Betrachtungen über den Einfluß von Spurengasen auf das Klima wird zuerst und mit Recht auf den globalen Anstieg des Kohlendioxids (CO₂) in der Atmosphäre hingewiesen. Neben CO₂ existieren jedoch eine Anzahl weiterer Spurengase in der Atmosphäre, die wie CO₂ im infraroten Wellenlängenbereich absorbieren und die ebenso wie CO₂ einer anthropogenen Beeinflussung unterliegen. Sie tragen gleichfalls zum sogenannten „Glashauseffekt“ bei. Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß auch Aerosole einen Einfluß auf die Strahlungsbilanz ausüben, indem sie Strahlung absorbieren und reflektieren. Nach unserer bisherigen Erkenntnis ist in diesem Zusammenhang der stratosphärischen Aerosolschicht größere Bedeutung beizumessen als dem troposphärischen Aerosol (vgl. Beitrag 6).

Es mag überraschend sein, daß Spurengase, deren Konzentration im Vergleich zur atmosphärischen CO₂-Konzentration um den Faktor 100 bis 1000 niedriger liegt, auf das Klima einwirken können. Dies ist der Fall, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

a) Spurengase, deren Absorptionsbanden im infraroten Bereich des Spektrums zwischen 8 und 12 µm (sog. Wasserdampf-Fenster) liegen, können die thermische Struktur der Atmosphäre beeinflussen.

- b) Spurengase, deren anthropogener Anteil langfristig ansteigt, können zunehmend klimawirksam werden.
- c) Klimawirksame Spurengase sollten global gleichmäßig in der Atmosphäre verteilt sein. Dies setzt voraus, daß sie eine atmosphärische Verweilzeit haben, die größer ist als die mittlere Mischungszeit der Troposphäre; d. h. die Verweilzeit muß in der Größenordnung von mindestens einem Jahr liegen.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die in diesem Zusammenhang interessanten Spurengase.

Die unter c) gestellte Bedingung schließt eine Anzahl von Spurengasen, trotz Absorptionsbanden im IR, von der näheren Betrachtung aus, da sie infolge kurzer „Lebenszeit“ in der Atmosphäre nur regional einen direkten Einfluß auf das Klima nehmen können. Zu diesen Komponenten gehören Ammoniak (NH₃), von den Stickoxiden (NO_x) das Stickstoffdioxid (NO₂) und die Salpetersäure (HNO₃) sowie Schwefelwasserstoff (H₂S) und Schwefeldioxid (SO₂). Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß diese reaktionsfreudigen Gase in der Atmosphäre durch gas-to-particle-Transformation Aerosolpartikel bilden können, die als klimawirksame Sekundäraerosole in Betracht zu ziehen sind (GEORGII 1979).

Tab. 1: Atmosphärische Spurengase mit Absorptionsbanden im „Wasserdampfenster“

Komponenten	Mischungsverhältnis in Reineluft	Gesamtmenge in der Atmosphäre (to)	Verweilzeit	Absorptionsbande (μm)
Distickstoffoxid (N_2O)	0.32 ppm	2.5×10^9	20—100 Jahre	7.8
Methan (CH_4)	1.6 ppm	4.8×10^9	4—7 Jahre	7.7
Kohlenmonoxid	0.12 ppm	5.9×10^8	2—6 Monate	4.8
Trichlorfluormethan (Freon 11) (CFCl_3)	0.16 ppb	3.8×10^6	50 Jahre	9.2 11.8
Dichlordifluormethan (Freon 12) (CF_2Cl_2)	0.26 ppb	5.7×10^6	80 Jahre	9.1 8.7 10.9
Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4)	0.14 ppb	3.7×10^6	?	13.0
Methylchlorid (CH_3Cl)	0.6 ppb	5.5×10^6	?	13.7 9.9

2 Kurzlebige Spurengase

Der überragende Anteil der NH_3 -Produktion ist auf natürliche mikrobiologische Quellen zurückzuführen; der Konzentrationsbereich liegt zwischen 1 und 20 ppb. Der anthropogene Anteil der Ammoniakproduktion ist vernachlässigbar klein. Die wesentlichen Senken des NH_3 sind physikochemischer Natur, nämlich die Absorption und Reaktion in Wolken- und Niederschlagsselementen sowie homogene Gasreaktionen mit OH-Radikalen. Abschätzungen der Funktion der Ozeane als NH_3 -Quelle ergaben, daß nur aus tropischen Ozeanen eine geringe NH_3 -Produktion zu erwarten ist, die in der ozeannahen Atmosphäre eine Gleichgewichtskonzentration von weniger als 1 ppb NH_3 ergeben könnte. Die troposphärische Verweilzeit des NH_3 beträgt wenige Tage. NH_3 besitzt Absorptionsbanden bei $10,5 \mu\text{m}$. Nach Berechnungen von WANG et al. (1976) sollte eine Verdoppelung der gegenwärtigen Konzentration zu einer Temperaturerhöhung von 0.1 K führen. Infolge des regionalen Charakters des NH_3 und der kurzen troposphärischen Verweilzeit ist jedoch mit einem entsprechenden Anstieg der NH_3 -Konzentration nicht zu rechnen, so daß dieses Spurengas klimatologisch vernachlässigt werden kann.

Entsprechendes gilt für HNO_3 . Die troposphärische Verweilzeit der stark löslichen HNO_3 -Moleküle ist nämlich kürzer als die des Wasserdampfes.

Die Bedeutung der IR-Absorption des Schwefeldioxids (SO_2) mit Banden bei $8,7 \mu\text{m}$ und $7,35 \mu\text{m}$ ist als Klimafaktor ebenfalls vernachlässigbar, angesichts der kurzen troposphärischen Verweilzeit von 1—3 Tagen. Höhere SO_2 -Konzentrationen treten nur im lokalen Bereich durch anthropogene Quellen auf. Zumindest im regionalen Scale liegt die Klimawirksamkeit des NH_3 und des SO_2 in der Bildung von Aerosolpartikeln, die eine Verweilzeit von 5—10 Tagen — in der oberen Troposphäre unter Umständen länger — besitzen. Diese Aerosolteilchen im Größenbereich unter $1 \mu\text{m}$ Radius wirken durch Absorption und Streuung der einfallenden Sonnenstrahlung, wobei der sich daraus ergebende Temperatureffekt noch nicht hinreichend gut bestimmbar ist.

3 Langlebige Spurengase

Im folgenden wollen wir uns den Spurengasen zuwenden, die den oben genannten drei Bedingungen genügen und somit im

Rahmen der Klimarelevanz vor allem zu diskutieren sind. Im wesentlichen handelt es sich dabei um Distickstoffoxid (N_2O), Methan (CH_4), die Chlorfluormethane, Kohlenmonoxid (CO) und troposphärisches Ozon (O_3).

Die Abschätzung einer möglichen Zunahme des anthropogenen Anteils dieser Spurengasen erfordert die Kenntnis ihrer Quellen und Senken. Modellrechnungen gehen meist von der angenommenen Verdoppelung der Konzentration aus, die zeitlich über das Verhältnis der Quellfunktion zur Senkenfunktion unter Berücksichtigung der Verweilzeit abgeschätzt werden muß. Hinsichtlich der Klimarelevanz sollten wir unterscheiden:

a) Gase, die infolge ihrer IR-Absorptionsbanden direkt auf die Troposphärentemperatur wirken; b) Gase, die indirekt über die Produktion von zusätzlichem troposphärischem Ozon klimarelevant sind.

3.1 Distickstoffoxid

Im Vordergrund der Diskussion über die Wirkung von Spurengasen auf das Klima steht das Distickstoffoxid (N_2O); denn es trägt durch Absorptionsbanden bei $4,5 \mu\text{m}$, $7,8 \mu\text{m}$ und $17 \mu\text{m}$ direkt zum „Glashauseffekt“ bei. Steigende N_2O -Konzentration bedeutet eine Zunahme der Glashauswirkung und Temperaturanstieg in der Troposphäre.

Als natürliche Hauptquelle des N_2O ist die mikrobiologische Denitrifikation und Nitrifikation im Boden anzusehen, wobei denitrifizierende Bakterien Nitrat zu Stickstoff bzw. Distickstoffoxid umwandeln. Die wesentliche anthropogene Quelle ist die Verwendung stickstoffhaltiger Dünger (ISAKSEN 1980) in der Landwirtschaft. Die Rate, mit der N_2O vom Erdboden in die Atmosphäre emittiert wird, ist nicht nur von den Denitrifikations- und Nitrifikationsprozessen abhängig, sondern auch von der Beschaffenheit des Bodens und den meteorologischen Bedingungen (SEILER u. CONRAD 1981), so daß die von HAHN (1979) angegebenen Werte unsicher erscheinen. $10^{13}\text{g N}_2\text{O-N}$ als globale Emissionsrate von ungedüngtem Boden können nur als grober Anhalt dienen. CRUTZEN (1983) gibt die in der Tabelle 2 genannten Quellen für N_2O an.

Tab. 2: Quellen des Distickstoffoxids nach CRUTZEN (1983)

Quelle	in N ₂ O-N/Jahr
Natürliche Verbrennungsvorgänge	1—2 x 10 ¹² g
Emission aus dem Ozean	1—3 x 10 ¹² g
Bodenatmung	3 x 10 ¹² g
Kunstdüngung	einige 10 ¹² g
Verbrennung fossiler Brennstoffe	1—2 x 10 ¹² g

Nach HAHN (1979) beträgt der anthropogene Anteil durch den Verbrauch von Kunstdünger etwa 10% der Gesamtproduktion des N₂O, wobei die Tendenz steigend ist. Neuere Untersuchungen sehen die Angaben von HAHN als überhöht an. Die jährliche Zunahme der N₂O-Produktion aus der Zunahme des Verbrauchs von Stickstoff-Dünger wird auf 6%/Jahr geschätzt. WEISS (1981) vertritt dagegen die Auffassung, daß der hauptsächlichste Anteil des N₂O-Anstieges durch den Verbrauch fossiler Brennstoffe verursacht wird und durch Kunstdüngerverbrauch nur ein begrenzter Anteil des N₂O Anstieges erklärt werden kann. Angesichts des Fehlens troposphärischer Senken des N₂O und der dadurch bedingten langen troposphärischen Verweilzeit (20—50 Jahre nach HAHN bzw. 100—200 Jahre nach CRUTZEN) bei einer derzeitigen mittleren Konzentration von rund 300 ppb ist ein langperiodischer Konzentrationsanstieg des N₂O als gesichert anzusehen. Dieser Anstieg wird auf etwa 0.2—0.5% pro Jahr geschätzt. Er ist auch für die vier Reinluft-Meßstellen Barrow (Alaska), Mauna Loa (Hawaii), Samoa und Antarktis seit 1977 nachge-

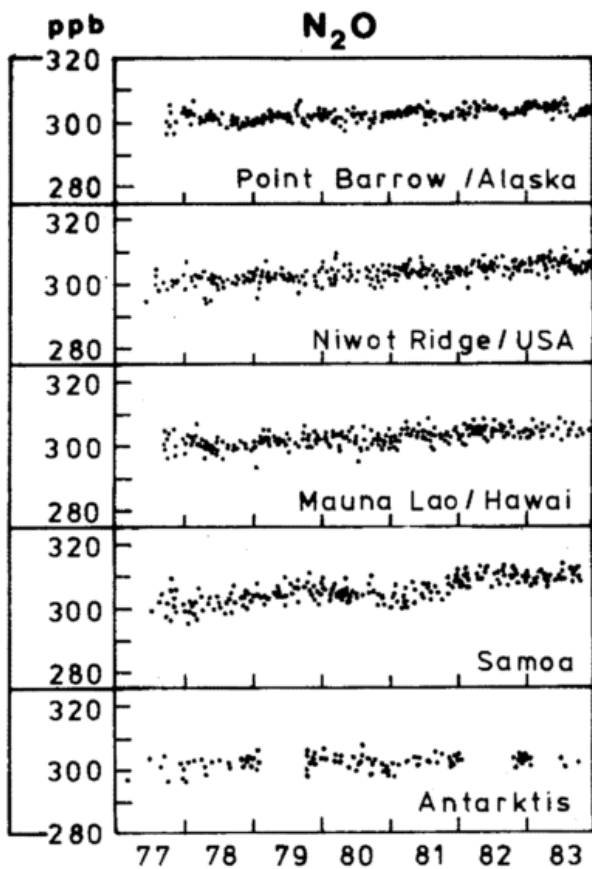


Abb. 1: Distickstoffoxid-Meßwerte der amerikanischen „Baseline“-Stationen (U.S. 1983).

wiesen, und zwar mit einem Anstieg zwischen 1.59 ppb/Jahr in Samoa und 0.61 ppb/Jahr in Barrow, so daß Ende 1982 in Samoa eine N₂O Konzentration von 309 ppb erreicht war. Abbildung 1 zeigt die N₂O-Meßdaten der fünf amerikanischen „Baseline-Stationen“. Die wesentliche N₂O-Senke liegt in der Stratosphäre und besteht in der Photolyse des N₂O mit Hilfe von atomarem Sauerstoff in Höhen über 25 km. Die dabei auftretenden Reaktionen

- a) N₂O + hν → N₂ + O
- b) N₂O + O(¹D) → N₂ + O₂
- c) N₂O + O(¹D) → 2 NO

sind von Bedeutung für die Stratosphärenchemie, da Reaktion c) als wichtige Quelle für stratosphärische Stickoxide gelten kann. Die angeregten Sauerstoffatome entstehen bei der Ozonphotolyse. Angesichts eines konstanten vertikalen Mischungsverhältnisses des N₂O in der Troposphäre und eines von JOHNSTON (1977) geschätzten Flusses des N₂O aus der Troposphäre in die Stratosphäre von 10¹³g N/Jahr ergibt sich die oben erwähnte lange troposphärische Verweilzeit. In der Stratosphäre wird eine Abnahme der N₂O-Konzentration mit Werten von etwa 30 ppb/km zwischen 15 und 20 km Höhe und etwa 10 ppb/km zwischen 25 und 35 km Höhe gefunden (FABIAN et al. 1979).

3.2 Methan

Die Atmosphäre ist hinsichtlich des Methans (CH₄) gleichmäßig durchmischt; allerdings liegt die Methankonzentration auf der Nordhemisphäre mit 1.6 ppm etwas höher als mit etwa 1.4 ppm auf der Südhemisphäre. Für die Klimaforschung ist Methan wegen seiner Absorptionsbanden bei 7.66 μm und wegen der global steigenden Konzentration von Interesse. Man kann davon ausgehen, daß die Methankonzentration während der letzten 10 Jahre etwa um 15—20% angestiegen ist (EHHALT 1979, FABIAN et al. 1979). Der Gradient des CH₄ von der Nord- zur Südhemisphäre deutet bei einem interhemisphärischen Austausch von 1—2 Jahren auf eine troposphärische Verweilzeit von 5—10 Jahren hin.

Die globale Methanproduktion wird zur Zeit mit 320—550 x 10¹²g/Jahr angenommen (CRUTZEN 1983, KHALIL u. RASMUSSEN 1983). Sie liegt damit unter den früheren Abschätzungen von EHHALT (1979), der 570 — 830 x 10¹² g/Jahr als globale Methanproduktion angesetzt hat. Einverständnis herrscht darüber, daß neben der biogenen Produktion auch fossile Quellen als Methanemittenten eine Rolle spielen, wobei letztere etwa 10% zur Gesamtproduktion beitragen. Während EHHALT die Methanproduktion von Reisfeldern und Sümpfen als hauptsächlich biogene Quelle vermutete — mit 280 x 10¹² g/Jahr bzw. 190 — 300 x 10¹² g/Jahr — werden diese Raten heute als zu hoch angesehen. Die jüngsten Abschätzungen von KHALIL und RASMUSSEN (1982) sind in Tabelle 3 wiedergegeben.

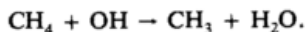
Eine neue, offenbar wichtige natürliche Quelle wird seit kurzer Zeit diskutiert: die Methanproduktion der Termiten bei der Holzerstörung. Diese wurde von ZIMMERMANN et al. (1982) mit 150 x 10¹² g/Jahr abgeschätzt. Sie würde damit 27—47% der Gesamtproduktion des Methan ausmachen. Die Ergebnisse von Feldmessungen der Methanproduktion verschiedener Termitenspezies durch SEILER et al. (1984) zeigten zwar, daß an der Abgabe von Methan an die Atmosphäre

Tab. 3: Globale Methan-Quellen
nach KHALIL und RASMUSSEN (1982)

Quelle	in g/Jahr
Ozeane	13×10^{12}
Sumpfbereiche	150×10^{12}
Süßwasserseen	10×10^{12}
Tundren	12×10^{12}
Reisproduktion	95×10^{12}
Fermentation der Tiere	120×10^{12}
Verbrennung von Biomasse	25×10^{12}
Anthropogene Quellen	40×10^{12}
Weitere Quellen	88×10^{12}
Summe	$553 \times 10^{12}/\text{Jahr}$

durch Termiten kein Zweifel bestehen kann, es stellte sich aber heraus, daß ZIMMERMANN et al. die Methanproduktion — errechnet aus Holzkonsumation, Termitenpopulation und aus gemessener CH_4 -Abgabe durch verschiedene Spezies — zu hoch eingeschätzt haben. Es ist anzunehmen, daß die Diskussion noch nicht abgeschlossen ist, wobei außerdem zu berücksichtigen ist, daß der Erdboden in von Termiten freien Gebieten der Savannen und Wüsten sogar eine Senke für CH_4 darstellt. Aber auch dieser Hinweis bedarf noch weiterer Bestätigung.

Die wesentliche Senke des Methans ist die Reaktion mit OH-Radikalen in der Troposphäre:



Dadurch hängt die Abbaurrate des CH_4 von der OH-Konzentration ab. Unter Annahme einer OH-Konzentration von 10^6 cm^{-3} würde die troposphärische OH-Senke etwa $900 \times 10^{12} \text{ g/Jahr CH}_4$ abbauen. Sie wäre somit imstande, die gesamte CH_4 -Emission aufzunehmen. Die zurückhaltenderen Angaben von CRUTZEN (1983) beschränken sich auf $400 \times 10^{12} \text{ g/Jahr CH}_4$, die durch Reaktion mit OH abgebaut werden. Innerhalb der Troposphäre wird ein konstantes Mischungsverhältnis in Abhängigkeit von der Höhe gefunden (FABIAN et al. 1979). Dagegen nimmt in der Stratosphäre das Mischungsverhältnis mit zunehmender Höhe ab, erreicht in etwa 20 km Höhe 1 ppm und nimmt in der mittleren Stratosphäre weiter ab. Die Stratosphäre stellt somit eine zusätzliche Senke für CH_4 dar, wobei Oxidation des CH_4 mit OH-Radikalen aber auch mit O (^1D) stattfindet. Als Zwischenprodukt der Methanoxidation entsteht Formaldehyd (CH_2O) und schließlich als Endprodukte CO und H_2 .

Der Fluß des CH_4 in die Stratosphäre und die stratosphärische Senke ist für den Kreislauf des CH_4 von geringerer Wichtigkeit, doch von großer Bedeutung für die Stratosphärenchemie, und zwar wegen des Beitrags, der zur Wasserstoff- und Wasserbilanz der Stratosphäre geliefert wird. Es steht heute außer Frage, daß die Methankonzentration — derzeit 1.6 ppm — mit 1—2% pro Jahr ansteigt (RASMUSSEN u. KHALIL 1981, EHHALT 1983, FRASER et al. 1984). Jüngste Daten von der Südhemisphäre deuten eine um 16—24 ppb höhere Konzentration in der oberen Troposphäre im Vergleich zu den Bodenmessungen an. Ob dies ein Hinweis auf den Erdboden als Senke ist, muß zunächst offen bleiben. Der berechnete Anstieg des Methans in der Südhemisphäre liegt bei 1.1% pro

Jahr. Wir haben somit auch der Klimarelevanz des Methans unsere verstärkte Aufmerksamkeit zuzuwenden, insbesondere, da einige der Quellen wie Reisfelder, Tierhaltung, Intensivierung der Reisproduktion durch Düngung mit steigender Weltbevölkerung ebenfalls zunehmen. Es scheint durchaus möglich, daß die atmosphärische Methankonzentration bereits seit langer Zeit zugenommen hat, denn Gaseinschlüsse in Eisproben — mehrere hundert bis tausend Jahre alt — zeigen, daß die heutige CH_4 -Konzentration 2—3 mal höher ist als zu einem Zeitpunkt, bevor die Weltbevölkerung erheblich angestiegen ist (KHALIL u. RASMUSSEN 1982). KHALIL und RASMUSSEN (1985) haben jüngst versucht, den Anstieg der Methan-Emission mit der Zunahme der Weltbevölkerung in Einklang zu bringen. Sie vermuten, daß sich in den letzten 300 Jahren nicht nur die Emissionsrate des Methans erhöht hat, sondern auch dessen troposphärische Verweilzeit; bedingt durch eine mögliche Abnahme der Konzentration des OH-Radikale. Messungen des Methangehaltes in Lueteinschlüssen im Polareis erlauben den Schluß, daß die Methankonzentration vor einigen hundert Jahren nur etwa 45% des gegenwärtigen Wertes betrug. Die Vorstellungen von KHALIL und RASMUSSEN bedeuten in die Zukunft extrapoliert, daß im Jahr 2000 die Methankonzentration rund 1.9 ppm betragen könnte, wie in Abbildung 2 dargestellt. Es ist schließlich eine offene Frage, ob der in Form von Methylhydrat in Permafrostböden und in Meeresedimenten eingeschlossene Kohlenstoff bei einer Erwärmung der Atmosphäre als Methan freigesetzt werden könnte. Die Mengen, die dabei in die Atmosphäre gelangen würden, sind enorm; sie übertreffen die derzeitige in der Atmosphäre befindliche Methanmasse um ein Vielfaches (CHAMBERLAIN et al. 1982).

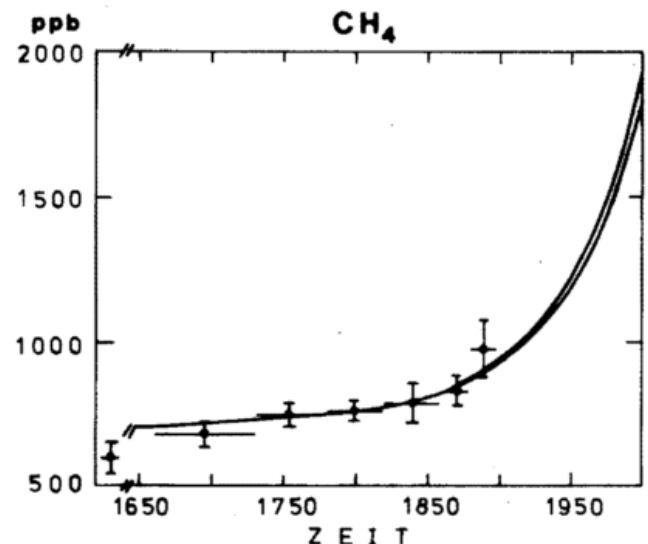


Abb. 2: Anstieg der atmosphärischen Methan-Konzentration nach KHALIL und RASMUSSEN (1984).

Da Methan auch eine troposphärische Senke für OH-Radikale darstellt, und gleichzeitig eine Quelle für Ozon und Kohlenmonoxid ist, werden wir uns mit der Methanchemie noch einmal in Zusammenhang mit diesen Komponenten zu beschäftigen haben.

3.3 Chlorfluormethane

Seit der Studie von MOLINA und ROWLAND (1974) wurde den Chlorfluorkohlenwasserstoffen in Hinblick auf ihre Einwirkung auf die stratosphärische Ozonschicht große Aufmerksamkeit geschenkt. Dies gilt insbesondere für die beiden hauptsächlich verbreiteten Komponenten CFC_1_3 (F11) und CF_2Cl_2 (F12). Im Gegensatz zu den bisher genannten Spurengasen sind F11 und F12 ausschließlich aufgrund menschlicher Aktivitäten in die Atmosphäre gelangt. Der Hauptverwendungszweck ist Treibmittel in Sprühdosen und Kältemittel in Kühl- und Klimaanlage. Die globalen Produktionsraten sind recht gut bekannt; sie zeigen bis 1974 einen exponentiellen Anstieg, der in den letzten Jahren auf Grund von Einschränkungen der Produktion abgenommen hat. Der Abbau der F11 und F12 erfolgt ähnlich wie beim N_2O in der Stratosphäre durch Photolyse, wobei die entstehenden Chloratome mit dem stratosphärischem Ozon reagieren. Die Weltproduktion von F11 und F12 ist bis 1976 auf 800×10^3 to/Jahr angestiegen, aber seit 1976 abgesunken. Sie erreichte 1979 rund 700×10^3 to/Jahr.

Die troposphärische Verweilzeit der Chlorfluorkohlenwasserstoffe ist wegen ihrer Reaktionsträgheit sehr lang, nämlich rund 50 Jahre für F11 und rund 80 Jahre für F12. Sie werden in der Troposphäre praktisch nicht abgebaut, reichern sich dort an und gelangen mit Verzögerung in die Stratosphäre. Die künftigen Produktionsvoraussagen gehen von einer konstant bleibenden Emissionsrate von 700×10^3 to/Jahr aus. Diese konstante Produktionsrate führt jedoch zu einem weite-

ren Anstieg in der Atmosphäre. Er wird bestimmt durch Produktion in der Troposphäre und Destruktion in der Stratosphäre. Die heutigen Mischungsverhältnisse liegen bei 0.2 ppb für CFCl_3 und 0.3 ppb für CF_2Cl_2 . Der Anstieg bis zum Jahr 2100 wird auf 0.7 bzw. 1.5 ppb geschätzt; dies würde einen Anstieg um den Faktor 4–5 bedeuten (EHHALT u. SCHMIDT 1983).

Abbildung 3 gibt beispielhaft den Anstieg des F11 für die fünf amerikanischen „Baseline“-Stationen für die Jahre 1977 bis 1983 an. Die vertikale Konzentrationsverteilung zeigt ähnlich den vorgenannten Spurengasen ein weitgehend konstantes Mischungsverhältnis mit der Höhe innerhalb der Troposphäre und Konzentrationsabnahme in der Stratosphäre. Es wird nicht angenommen, daß sich die Vertikalverteilung bei künftig höherer Konzentration der Chlorfluorkohlenwasserstoffe prinzipiell ändert. Die Meridionalverteilung weist ein Konzentrationsgefälle von der Nordhemisphäre zur Südhemisphäre auf; entsprechend der Tatsache, daß 90% der Quellstärke auf der Nordhemisphäre liegt. CFC_1_3 und CF_2Cl_2 haben Absorptionsbanden im infraroten Spektralbereich zwischen $8.5 \mu\text{m}$ und $12 \mu\text{m}$. Eine Zunahme der troposphärischen Chlorfluormethan-Konzentration führt somit auch zu einem zusätzlichen „Treibhauseffekt“, d.h. zu troposphärischer Erwärmung.

3.4 Kohlenmonoxid und troposphärisches Ozon

Kohlenmonoxid (CO) spielt nicht nur als Produkt unvollkommener Verbrennung fossiler Brennstoffe eine wichtige Rolle im atmosphärischen Spurenstoffhaushalt, sondern besitzt auch umfangreiche natürliche Quellen. Die indirekte Bedeutung des CO für den Strahlungshaushalt ist erst in den letzten Jahren erkannt worden, aufgrund von Überlegungen, daß CO zur Bildung troposphärischen Ozons beiträgt. Die direkte Einwirkung des CO auf den Strahlungshaushalt kann dagegen wohl vernachlässigt werden.

Eine wesentliche Senke für CO ist die Reaktion mit OH-Radikalen (CRUTZEN u. GIDEL 1983). Diese Reaktion beeinflusst die Verteilung und Verfügbarkeit der OH-Radikale in der Troposphäre sehr stark. Die meridionale Konzentrationsverteilung des CO zeigt eine in der Nordhemisphäre erhöhte Konzentration von etwa 100 ppb, ein scharfes Absinken der Konzentration beim Durchtritt durch die innertropische Konvergenzzone und eine auf der Südhemisphäre weitgehend konstante background-Konzentration von rund 60 ppb. Diese Verteilung weist auf anthropogene Quellen hin, aber auch darauf, daß natürliche Quellen nicht vernachlässigt werden dürfen (ROBINSON et al. 1984). Eine der natürlichen Quellen ist die Oxidation von Methan, die aber nach Abschätzungen von CRUTZEN (1983) nur maximal 25% zu den natürlichen Quellen beiträgt. Dies ist ein wesentlich geringerer Anteil an der Gesamtproduktion des CO als früher von SEILER (1974) angegeben. CRUTZEN schätzt die natürlichen Quellen, zu denen er die Verbrennung von Biomasse in den Tropen mit etwa 800×10^{12} g/Jahr sowie die Oxidation von natürlichen produzierten Kohlenwasserstoffen zählt, die von Wäldern emittiert und zu CO konvertiert werden können, mit etwa $400\text{--}1300 \times 10^{12}$ g/Jahr ab.

Neuere Daten wurden kürzlich von KHALIL und RASMUSSEN (1984) veröffentlicht und sind in der Tabelle 4 wiedergegeben.

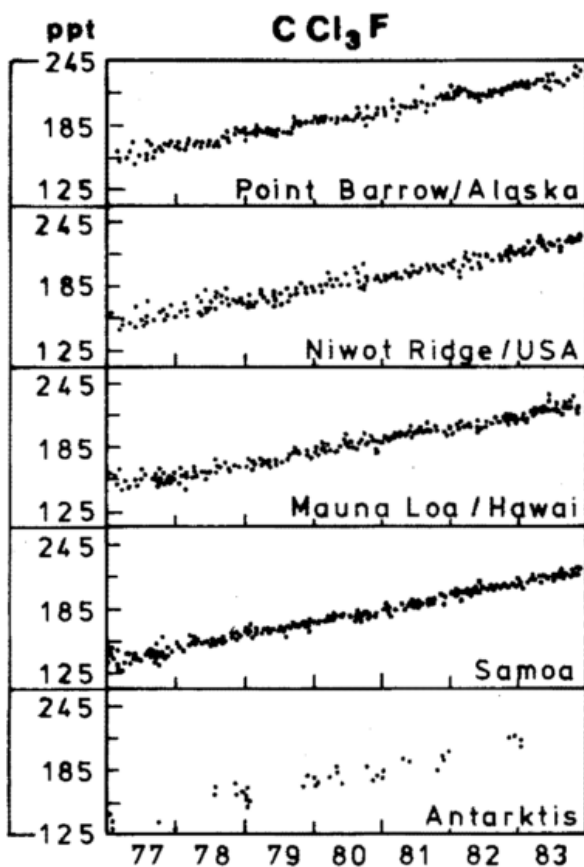


Abb. 3: Chlorfluormethan-Meßwerte der amerikanischen „Baseline“-Stationen (U.S. 1983).

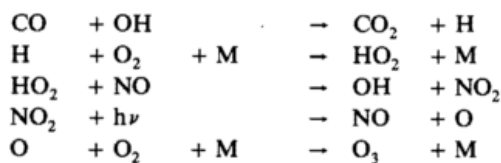
Tab. 4: Globale Kohlenmonoxid-Quellen

Anthropogene Quellen	in 10 ¹² g/Jahr
Verbrauch fossiler Brennstoffe	450 x 10 ¹²
Verbrennung von Biomasse	630 x 10 ¹²
Oxidation von Kohlenwasserstoffen	400 x 10 ¹²
Summe	1480 x 10 ¹²
Natürliche Quellen	
Oxidation von Methan und natürlich produzierten Kohlenwasserstoffen	1200 x 10 ¹²

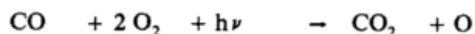
Wenn auch die Art der Quellen des CO und die wesentliche Senke durch die Reaktion mit OH-Radikalen (> 80%) erklärt werden können, so bleibt die Emissionsrate der einzelnen CO-Quellen und ihr Beitrag zum Gesamtbudget noch weitgehend offen. Die anthropogene Emissionsrate durch Verbrennung fossiler Brennstoffe wird von LOGAN et al. (1981) mit 400—1000 x 10¹² g/Jahr angegeben.

Die troposphärische Verweilzeit des CO ist mit einigen Monaten (2—6 Monate) kürzer als die der vorher diskutierten Spurengase. Wir können somit davon ausgehen, und die experimentellen Befunde bestätigen dies, daß die dreidimensionale Verteilung des CO weniger homogen ist als die der bisher diskutierten Gase. Untersuchungen von SEILER und FISHMAN (1981) zeigen eine deutlich erhöhte Konzentration in mittleren und nördlichen Breiten der Nordhemisphäre auch in der mittleren Troposphäre und eine starke Konzentrationsabnahme oberhalb der Tropopause. Dies wird auch in den Vertikalprofilen deutlich, die einen charakteristischen Konzentrationsrückgang oberhalb der Tropopause anzeigen.

Die Bedeutung des CO ist in Zusammenhang mit dem gleichzeitigen Vorhandensein von Stickoxiden in der Bildung von troposphärischem Ozon zu sehen (LIU et al. 1980). Die Diskussion geht dahin, daß Ozon nicht nur aus der Stratosphäre in die Troposphäre transportiert wird, sondern auch durch photochemische Reaktionen unter Beteiligung von OH- und HO₂-Radikalen in der Troposphäre gebildet wird. Hierbei spielt die CO-Oxidation durch OH eine wesentliche Rolle:



netto:



Die Effizienz dieses Zyklus ist von der Verfügbarkeit von NO_x und OH abhängig. Neuere Untersuchungen zeigen, daß in der Troposphäre der Nordhemisphäre etwa zwischen 4 und 10 km Höhe CO und O₃ positiv korrelieren. Dies ist ein Hinweis darauf, daß das dort gemessene Ozon troposphärischer Herkunft ist (FISHMAN u. SEILER 1983).

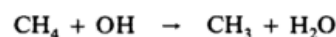
In der oberen Troposphäre dagegen sind CO und O₃ negativ korreliert, was auf die stratosphärische Herkunft des dort angetroffenen Ozons schließen läßt. In Bodennähe wird ebenfalls eine negative Korrelation gefunden. Dies wird von den

Autoren mit der Zerstörung des Ozons am Boden erklärt. Allerdings kann der Beweis der troposphärischen Ozonbildung aus der Korrelation von CO und O₃ allein nicht schlüssig erbracht werden, wenn nicht gleichzeitig NO_x gemessen wird. Man kann aber davon ausgehen, daß in Gegenwart von NO dieser Prozeß der Ozonproduktion abläuft. Ein photochemisches Modell zeigt, daß etwa 15—25 ppb Ozon in der Troposphäre der Nordhemisphäre nördlich 30°N gebildet wird. Die troposphärische NO_x-Konzentration ist während des letzten Jahrzehnts auch in Reinluftgebieten angestiegen, was durch zahlreiche Messungen belegt ist.

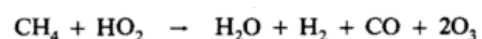
Kürzlich wurde von KHALIL und RASMUSSEN (1984) erstmals ein Anstieg der CO-Konzentration für die Jahre 1979—1982 in nicht verunreinigter Atmosphäre an der Küste von Oregon (Cape Meares) nachgewiesen. Dieser Anstieg der CO-Konzentration, der statistisch sehr genau überprüft wurde, aber wegen der 2—6 monatigen Lebensdauer des CO sicher nicht als „global“ angesehen werden kann, ist jedoch für die Troposphärenchemie von erheblicher Bedeutung:

- Der Abbau des CO führt zu einem verstärkten Verbrauch von OH-Radikalen, die dann für Reaktionen mit anderen Spurengasen nicht mehr zur Verfügung stehen.
- Daraus folgt, daß auch die CH₄-Konzentration durch ein reduziertes Angebot an OH-Radikalen stärker ansteigen kann.
- Schließlich führt das zunehmende Angebot von CO (und NO_x) zu einem Anstieg des troposphärischen Ozons, der für das Klima von Bedeutung ist.

Dieser Anstieg der troposphärischen Ozonkonzentration läßt sich aus den Ozonsondierungen des Meteorologischen Observatoriums Hohenpeißenberg/Obb. (ATTMANNSPACHER et al. 1984) ableiten. Die Zunahme zeigt sich für die Jahre 1967—1982 für den Höhenbereich 3—8 km und betrug über diesen Zeitraum zwischen 80 und 160% des 1967 gemessenen Wertes. Dieser Trend der Ozonzunahme in der Troposphäre ist auch aus den Bodenmessungen zu erkennen. Die Autoren weisen darauf hin, daß die gefundene starke Ozonzunahme nicht durch das Wettergeschehen am Meßort erklärt werden kann und daß auch die Ozonsondierungen von Brüssel eine Ozonzunahme in der Troposphäre zwischen 1970 und 1979 erkennen lassen. Langjährige Meßreihen des bodennahen Ozons, die von WARMBT (1979) an verschiedenen Meßstellen in der DDR durchgeführt wurden, belegen ebenfalls einen steigenden Trend der Ozonjahresmittel für die Zeit von 1956—1977. Die dabei beobachtete Ozonzunahme ist offenbar kein lokales Phänomen. WARMBT betont, daß es wenig wahrscheinlich sei, daß der steigende Trend der bodennahen Ozonkonzentration durch einen verstärkten Zustrom stratosphärischen Ozons verursacht wird, sondern vielmehr durch einen zunehmenden Anteil photochemisch gebildeten Ozons. Die Ozonzunahme wirkt über die Absorption kurzweiliger Strahlung in der Troposphäre auf unser Klima ein. Die oben erwähnten Reaktionsschemata für CO + OH gelten entsprechend für die Methanoxidation mit dem Hydroxylradikal



das schließlich zu einem Nettoeffekt



führt. Diese Prozesse sind sehr stark miteinander verknüpft; sie führen zu einem verstärkten Verbrauch von OH-Radikalen, so daß ein CO-Anstieg zu einer Verminderung der Methanoxidation führen kann, da die CO-Oxidation der bevorzugte Prozeß ist. Auf diese Weise könnte sich der Methananstieg weiter verstärken.

4 Abschätzung der zukünftigen Entwicklung

Die bisherigen Darlegungen haben gezeigt, daß zahlreiche Spurengase, die im Wellenlängenbereich 7–14 µm Strahlung absorbieren, seit etwa 15 Jahren eine steigende Konzentration aufweisen, und dabei mitwirken, das Wasserdampffenster zu schließen. Die nachstehenden Angaben sollen eine Abschätzung der künftigen Entwicklung der Konzentration der klimarelevanten Spurengase erlauben. Realistische Szenarien bedürfen jedoch einer eingehenderen und genaueren Erforschung der Spurengasverteilung und ihrer Trends. Es muß auch bedacht werden, daß die vielfältigen Rückkoppelungen und die chemischen Reaktionen bewirken, daß sich die anthropogene Änderung eines Spurenstoffes auf viele weitere auswirkt.

Tab. 5: Szenario für die Änderung globaler Spurengas-Konzentrationen

Jahr	CH ₄ (ppm)	N ₂ O (ppm)	FKM F11	(ppb) F12	O ₃ -Änderung
vor 1940	1.3 (o. weniger)	0.3	0	0	0
1975	1.5	0.3	0.1	0.17	+ 10%
2025	2.1	0.45	0.5	0.8	+ 50%
2050	3.3	0.6	0.7	1.7	+ 100%

Auf den sich aus dem künftigen Anstieg der klimawirksamen Spurengase errechnenden Temperatureffekt wird im Beitrag 5 eingegangen. Es muß jedoch bei der Unsicherheit aller Abschätzungen der künftigen Entwicklung der Spurengasverteilung betont werden, daß die möglichst umfassende Kenntnis ihrer Quellen und Senken sowie ihrer Reaktionsmechanismen und daraus ihrer Verweilzeit unabdingbar für eine Modellierung des Klimateffektes ist.

Literatur

ATTMANNSPACHER, W.; HARTMANNGRUBER, R.; LANG, P.: Verbesserung der Grundkenntnisse über die Klimatologie der vertikalen Ozonschicht durch verstärkte Ballonsondierung. BPT-Bericht 6/84, Gesellschaft f. Strahlen u. Umweltforschung, München (1984).

CHAMBERLAIN, J. W.; FOLEY, H. M.; McDONALD, G. J.; RUDERMAN, M. A.: Climate effects of minor atmospheric constituents. In: CLARK, W. C., Carbon Dioxide Review (1982). Oxford: Clarendon Press (1982) S. 253–278.

CRUTZEN, P.: Atmospheric interactions-homogeneous gas reactions of C, N and S containing compounds. In: BOLIN, B. COOK, R. B. (Ed.). The major biochemical cycles and their interactions, SCOPE (1983) S. 67–112.

CRUTZEN, P.; GIDEL, L. T.: A two-dimensional photochemical model of the atmosphere: The tropospheric budgets of the anthropogenic chlorocarbons, CO, CH₄, CH₃, C1 and the effect of various NO_x sources on tropospheric O₃. J. Geophys. Res. 88 (1983) S. 6641–6661.

EHHALT, D.: Der atmosphärische Kreislauf von Methan. Naturwissenschaften 66 (1979) S. 307–311

EHHALT, D.; SCHMIDT, U.: Die Verteilung der Chlorfluormethane in der Stratosphäre und ihr Einfluß auf die Ozonschicht. Umweltforschung, KFA Jülich (1983).

FABIAN, P.; BORCHERS, R.; WEILER, K. H.; SCHMIDT, U.; VOLZ, A., EHHALT, D.; SEILER, W.; MÜLLER, F.: Simultaneously measured vertical profiles of H₂, CH₄, CO, N₂O, CFC1₃, and CF₂Cl₂ in the midlatitude stratosphere and troposphere. J. Geophys. Res. 84 (1979) S. 3149–3154

FISHMAN, J.; SEILER, W.: Correlative nature of ozone and carbon monoxide in the troposphere: implications for the tropospheric ozone budget. J. Geophys. Res. 88 (1983) S. 3662–3670

FRASER, M.; KHALIL, R.; RASMUSSEN, A.; STEELE, L. P.: Tropospheric methane in the mid-latitudes of the southern hemisphere. J. Atmos. Chem. 1, (1984) S. 125–137

GEORGII, H.-W.: Large-scale distribution of gaseous and particulate sulfur compounds and its impact on climate, in: BACH, W., PANKRATH, J., KELLOGG, W. (Ed.): Man's Impact on Climate, Amsterdam: Elsevier Publ. Comp. (1979) S. 181–193

HAHN, J.: Man-made perturbations of the nitrogen cycle and its possible impact on climate. In: BACH, W.; PANKRATH, J.; KELLOGG, W. (Ed.): Man's Impact on Climate, Amsterdam: Elsevier Publ. Comp. (1979) S. 193–213

ISAKSEN, I. S. A.: The impact of nitrogen fertilization, in: BACH, W., PANKRATH, J. and WILLIAMS, J. (Ed.). Interactions of Energy and Climate. Dordrecht: Reidel Publ. Comp. (1980) S. 257–269.

JOHNSTON, H. S.: Analysis of the independent variables in the perturbation of stratospheric ozone by nitrogen fertilizers. J. Geophys. Res. 82 (1977), S. 1767–1772

KHALIL, M. A. K.; RASMUSSEN, R. A.: Secular trends of atmospheric methane. Chemosphere 11 (1982), S. 877–883

KHALIL, M. A. K.; RASMUSSEN, R. A.: Sources, sinks and seasonal cycles of atmospheric methane. J. Geophys. Res. 88 (1983) S. 5131–5144

KHALIL, M. A. K.; RASMUSSEN, R. A.: Carbon monoxide in the earth atmosphere, increasing trend. Science 224 (1984) S. 54–56

KHALIL, M. A. K.; RASMUSSEN, R. A.: Causes of increasing methane: Depletion of hydroxyl radicals and the rise of emissions. Atmos. Environment 19 (1985) S. 397–407

LOGAN, J. A.; PRATHER, M. J.; WOLFSY, S. C.; McELROY, M. B.: Tropospheric chemistry, a global perspective. J. Geophys. Res. 86 (1981) S. 7210–7254

- LIU, S. C.; KLEY, D.; McFARLAND, M.; MAHLMAN, J. D.; LEVY, H.: On the origin of tropospheric ozone. *J. Geophys. Res.* 85 (1980) S. 7546—7552.
- MOLINA, M. J.; ROWLAND, F. S.: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone. *Nature* 249 (1974) S. 810—812
- RASMUSSEN, R. A.; KHALIL, M. A. K.: Atmospheric methane, trends and seasonal cycles. *J. Geophys. Res.* 86 (1981) S. 9826—9832
- ROBINSON, E.; CLARK, D., SEILER, W.: The latitudinal distribution of carbon monoxide across the Pacific from California to Antarctica. *J. Atmos. Chem.* 1 (1984) S. 137—151
- SEILER, W.: The cycle of atmospheric CO. *Tellus* 26 (1974) S. 116—135
- SEILER, W.; CONRAD, R.: Field measurements of natural and fertilizer — induced N₂O release rates from soil. *J. Air. Poll. Contr. Ass.* 31 (1981) S. 767—772
- SEILER, W.; FISHMAN, J.: The distribution of carbon monoxide and ozone in the free troposphere. *J. Geophys. Res.* 86 (1981) S. 7255—7265
- SEILER, W.; CONRAD, R.; SCHARFFE, D.: Field studies of methane emission from termite nests into the atmosphere and measurements of methane uptake by tropical soils. *J. Atm. Chem.* 1 (1984) S. 171—187
- WANG, W. C.; YUNG, Y. L.; LACIS, A. A.; MO, T.; HANSEN, J. E.: Greenhouse effects due to man-made perturbations of trace gases. *Science* 194 (1976) S. 685—689
- WARMBT, W.: Ergebnisse langjähriger Messungen des bodennahen Ozons in der DDR. *Z. f. Meteorol.* 29 (1979) S. 24—31
- WEISS, R. F.: The temporal and spatial distribution of tropospheric nitrous oxide. *J. Geophys. Res.* 86 (1981) S. 7185—7195
- U. S. DEP. OF COMMERCE: Geophysical monitoring for climate change No. 12 (1983).
- ZIMMERMAN, P. R.; GREENBERG, J. P.; WANDIGA, S. O.; CRUTZEN, P.: Termites: A potentially large source of atmospheric methane, carbon dioxide and molecular hydrogen. *Science* 218 (1982) S. 563—565

3

G. H. KOHLMAIER, H. BRÖHL, U. FISCHBACH, A. JANECEK, G. E. K. BENDEROTH

Die Modellierung des globalen Kohlenstoffkreislaufs

1 Einleitung

Das Kohlendioxid in der Atmosphäre ist Bestandteil eines globalen biogeochemischen Kreislaufs, in dem Kohlenstoff zwischen den verschiedensten Bereichen ausgetauscht wird und hierbei in unterschiedlichen chemischen Verbindungen vorliegt. Um die bisherige Entwicklung des atmosphärischen CO₂-Gehalts verstehen und Prognosen für die künftige Entwicklung machen zu können, ist es notwendig, die wichtigsten Teilbereiche dieses Kreislaufs zu analysieren und ihre Veränderung modellmäßig zu erfassen.

2 Reservoirs und Austauschraten

Die wichtigsten Teilbereiche des globalen Kohlenstoffkreislaufs sind in Abbildung 1 dargestellt. In der Atmosphäre liegt der Kohlenstoff im wesentlichen als CO₂ vor; seine atmosphärische Konzentration ist für den Zeitraum der letzten 25 Jahre gut bekannt, für die weitere Vergangenheit sind die Werte unsicherer (vgl. Beitrag 1: Eisbohrmessungen (STAUFFER et al. 1985) ergeben einen vorindustriellen Wert von 275—285 ppm).

In der Biosphäre bildet der Kohlenstoff als Grundbaustein aller organischen Verbindungen ca. 45% der gesamten Trockenbiomasse; die Schätzungen für den heutigen C-Gehalt der lebenden Landbiomasse schwanken zwischen 500 und 600 Gt C (1 Gt entspricht 10¹⁵g); vor der großflächigen Beeinflussung durch den Menschen könnte dieser Wert bei etwa 800 Gt C gelegen haben. Nach dem Absterben der Organismen gelangen die Kohlenstoffverbindungen zunächst in die Streuschicht, deren heutige Größe auf 50—90 Gt C geschätzt wird.

Ein Teil dieses Materials wird dort in langlebige Verbindungen wie z. B. Huminstoffe umgewandelt, die im Boden gespeichert werden. Die Schätzungen für diesen Bestand schwanken zwischen 700 und 2000 Gt C.

Im Ozean kommt Kohlenstoff sowohl als Bestandteil der Organismen (hauptsächlich Phyto- und Zooplankton) und tote organische Substanz als auch in anorganischen Formen vor. Die Ozean-Biota sind mengenmäßig mit 1—4 Gt C relativ klein, doch wegen ihres Umsatzes von Bedeutung. Totes organisches Material in Form von gelöstem (DOC) und partikulärem (POC) organischem Kohlenstoff findet man in einer mittleren Konzentration von 0,7 g C/m³, was einer Gesamtmenge von etwa 1000 Gt C entspricht. Die größte Menge an Kohlenstoff im Ozean liegt in anorganischer Form (insbesondere Karbonate und Bikarbonate) in einer Konzentration von 29 g C/m³ oder etwa 38000 Gt C vor.

Das weitaus größte C-Reservoir ist die Lithosphäre mit einem geschätzten Vorrat von 48 · 10⁶ Gt C an anorganischem und 17,5 · 10⁶ Gt C an organischem Kohlenstoff. Der davon maximal als Brennstoff nutzbare Anteil ist schwer abzuschätzen und hängt neben den physikalisch-chemischen und geologischen Bedingungen wesentlich von technologischen und wirtschaftlichen Faktoren ab (vgl. Beitrag 4).

Neben der Größe eines Reservoirs sind die Austauschraten mit benachbarten Reservoirs maßgebend für seine Rolle im Gesamtkreislauf. In Abbildung 1 sind die Flüsse zwischen den einzelnen Reservoirs (in Gt C/a) angegeben. Es ist ersichtlich, daß die Austauschflüsse zwischen Atmosphäre, Biosphäre und Ozean in der Größenordnung von einigen Gigatonnen C

pro Jahr liegen, während die auf natürlichen Prozessen beruhenden Flüsse aus und in die Lithosphäre um zwei bis drei Größenordnungen kleiner sind. Da diese Prozesse (Vulkanismus, Sedimentation etc.) durch anthropogene Eingriffe in ihrer Größenordnung nicht oder kaum verändert werden, kann die Lithosphäre für Modellbetrachtungen über einen Zeitraum von mehreren Jahrhunderten zunächst vernachlässigt werden. Der durch den Menschen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe verursachte Transport von Kohlenstoff aus der Lithosphäre in die Atmosphäre wird daher als externer Input in das Atmosphäre-Biosphäre-Ozean-System behandelt.

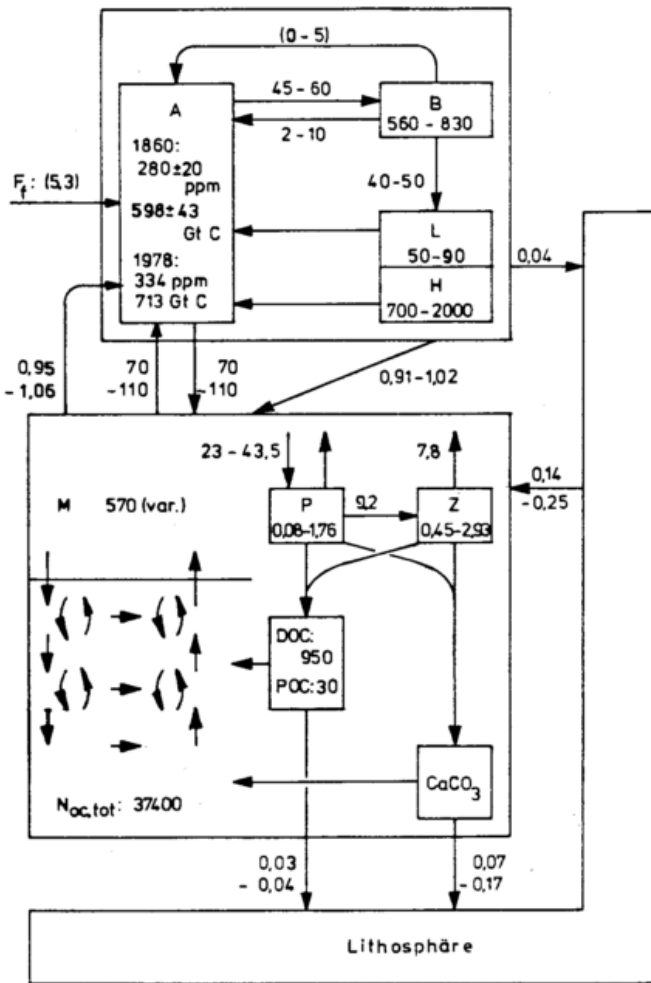


Abb. 1: Reservoirs und Austauschflüsse im globalen Kohlenstoff-Kreislauf (nach KRATZ 1983, verändert).

A: Atmosphäre, B: lebende Biomasse, L: Streuschicht, H: Humusschicht, M: ozeanische Mischungsschicht, P: Phytoplankton, Z: Zooplankton, DOC: gelöster organischer Kohlenstoff, POC: partikulärer organischer Kohlenstoff, F_f : fossiler Input, F_b : Nettotransport aus dem Biota in die Atmosphäre, $N_{OC,tot}$: Gesamtmasse des anorganischen gelösten Kohlenstoffs.

3 Die Wechselwirkung Atmosphäre-Ozean

Aufgrund seiner großen Speicherkapazität ist der Ozean die wichtigste Senke für zusätzliches atmosphärisches CO₂. Bei Erhöhung des atmosphärischen Partialdrucks löst sich ver-

stärkt CO₂ im Ozeanwasser; dieses gelöste CO₂ steht im Gleichgewicht mit den dissoziierten Komponenten HCO₃⁻ und CO₃²⁻; die 99% des gesamten anorganischen Kohlenstoffs ausmachen. Dies hat zur Folge, daß der zusätzliche CO₂-Eintrag sich nicht im Verhältnis der vorhandenen Gesamtkohlenstoffbestände auf die beiden Reservoirs aufteilt; vielmehr ist der relative Gleichgewichtsanstieg im Ozean heute um den Faktor 10 kleiner als der in der Atmosphäre. Dieses Aufteilungsverhältnis verändert sich dynamisch mit steigendem Kohlenstoffgehalt zuungunsten des Ozeans. Diese Nichtlinearität wird in der Modellierung durch Einführung eines variablen Pufferfaktors (auch Evasions- oder Revelle-Faktor, s. KRATZ 1985) berücksichtigt. Darüberhinaus steht nur ein kleiner Teil des Ozeanwassers, die ozeanische Deckschicht, in direktem Austausch mit der Atmosphäre; das Tiefenwasser ist von dieser durch eine stabile Dichteschicht abgetrennt und gelangt nur in wenigen Regionen (Aufquell- und Absinkregionen) in direkte Verbindung mit der Atmosphäre. Einfache Modelle des Atmosphäre-Ozean-Systems berücksichtigen den genannten Pufferfaktor, indem Atmosphäre, ozeanische Deckschicht und Tiefsee als homogene Boxen modelliert werden, deren Austausch im Fall Atmosphäre-Mischungsschicht nicht-linear, ansonsten linear von den jeweiligen Bestandsgrößen abhängt (für einen Vergleich dieser Modelle s. BACASTOW u. BJÖRKSTRÖM 1981, KRATZ 1985). Diese Modelle können die Entwicklung des atmosphärischen CO₂-Gehalts unter dem Einfluß des fossilen Inputs nur unter unrealistischen Annahmen für die Größe der jeweiligen Reservoirs bzw. Austauschraten reproduzieren. Die Verbesserung dieser Modelle erfolgt in zwei Richtungen: einmal durch eine genauere Beschreibung der Transportprozesse innerhalb des Ozeans, zum anderen durch Berücksichtigung der regionalen Unterschiede im Atmosphäre-Ozean-Austausch. Durch die Einführung eines Wirbeldiffusions-Transports (Box-Diffusionsmodell) konnten OESCHGER et al. (1975, 1980) eine verbesserte Kohlenstoff-Isotopenverteilung und auch eine erhöhte Kohlenstoffaufnahme des Ozeans als im Boxmodell erreichen und die gemessene Aufteilung des fossilen Inputs zwischen Atmosphäre und Ozean annähernd realistisch reproduzieren.

Der zweitwichtigste Transportprozeß für Kohlenstoff im Ozean ist die Advektion, d. h. die Mitführung des gelösten Kohlenstoffs mit den großflächigen Wasserströmungen. SIRÉ et al. (1981) haben eindimensionale Advektions-Diffusions-Modelle analytisch untersucht und gezeigt, daß bei tiefenabhängiger Diffusionskonstante eine hinreichende Aufnahmekapazität erreicht werden kann, wobei außerdem noch die vorhandenen Daten über die Verteilung der Tracer ¹³C und ¹⁴C befriedigend reproduziert werden können. Die Meeresbiota tragen ebenfalls zum Transport von Kohlenstoff aus der Mischungsschicht in die Tiefsee bei, indem photosynthetisch gebundenes C in Form von totem organischem Material absinkt, ebenso wie erhebliche Mengen von als Gerüstsubstanz synthetisiertem CaCO₃. Dieser Prozeß wurde modellmäßig u. a. von HOFFERT et al. (1981) und von MUNRO und OLSON (1981) beschrieben. Für die regionale Gliederung der Ozeane ist insbesondere eine Unterscheidung zwischen Gebieten mit einer stabilen Mischungsschicht und einem gehemmten Transport in die Tiefsee, und solchen mit direktem Atmosphäre-Tiefsee-Austausch von Bedeutung. In einfachen Modellen werden diese Gebiete in der Regel mit Ozeanzonen der niederen bzw.

höheren Breiten (Abb. 2) identifiziert (BJÖRSTRÖM 1979, PEARMAN 1980, KRATZ 1983), VIECELLI et al. verwenden 3 Regionen (äquatoriale, mittlere und höhere Breiten). Ein wesentlicher Fortschritt in dieser Richtung ist von der Entwicklung eines dreidimensionalen ozeanischen Zirkulationsmodells zu erwarten, an dem z.Z. am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg gearbeitet wird (MAIER-REIMER 1983, GRASSL et al. 1984). Dieses Modell erzeugt ein realistisches dreidimensionales Strömungsfeld, in das CO_2 als Tracer eingebettet ist. Erste Ergebnisse dieses Modells zeigen gegenüber den differenzierten ein- bis „eineinhalb“-dimensionalen Advektions-Diffusionsmodellen allerdings eine verringerte Aufnahmekapazität, die mit den empirischen Befunden schlecht in Einklang zu bringen sind. Während der El Niño-Ereignisse wird neben anderen klimatischen Phänomenen ein Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration beobachtet (BACASTOW et al. 1980). Die temperaturbedingte zusätzliche CO_2 -Ausgasung aus der ozeanischen Oberflächenschicht kann nicht allein zur Erklärung dieses Anstiegs herangezogen werden. KEELING (pers. Mitt.) nimmt auf Grund verstärkter Lufttrockenheit einen gesteigerten Nettofluß aus den Landbiota in die Atmosphäre an, FLOHN et al. (1985) machen einen Abfall der photosynthetischen Produktion der ozeanischen Biota (Algen) auf Grund des verringerten CO_2 -Angebots dafür verantwortlich.

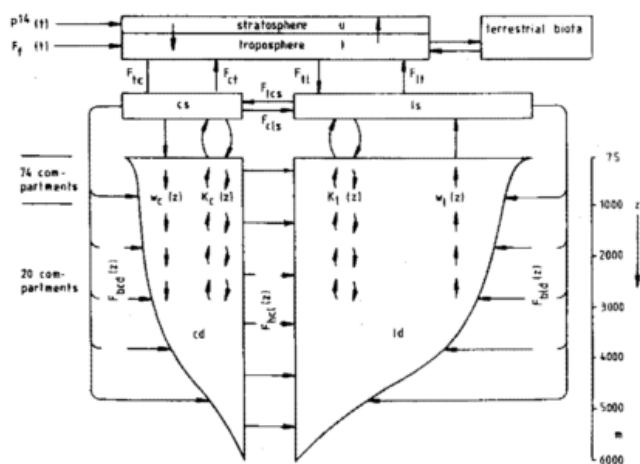


Abb. 2: Modellstruktur des Ozeans nach KRATZ 1983
c: höhere Breiten, l: niedere Breiten, s: Oberflächenschicht, d: Tiefsee, b: biogenes Material, w: vertikale Geschwindigkeitskomponenten der Advektion, K: Konstanten der turbulenten Diffusion, F_{hkl} : horizontaler Advektionsfluß.

4 Modellierung der Landbiota

4.1 Das Quellen-Senken-Problem

Die Rolle der Landbiota im globalen Kohlenstoffkreislauf wirft heute die meisten Fragen auf (WOODWELL 1984). Einerseits lassen die in Abschnitt 2 angegebenen Daten erkennen, daß die Landbiota unter dem wachsenden menschlichen Eingriff, insbesondere durch die Ausdehnung der landwirtschaftlich genutzten Flächen, erheblich in ihrem Bestand reduziert worden sind; dabei könnten insgesamt 200–300 Gt C

aus der lebenden Biomasse und zusätzlich ein unbekannter Anteil des toten organischen Materials aus dem Boden freigesetzt worden sein, allerdings verteilt über einen langen Zeitraum. Schätzungen der heute freigesetzten C-Mengen, insbesondere aufgrund von Rodungen in den tropischen und subtropischen Waldgebieten, wurden noch vor wenigen Jahren zwischen 2 und 18 Gt C/a (WOODWELL et al. 1978) eingegeben; Modellrechnungen, die die menschlichen Eingriffe und ihre Folgen für die Vegetation bilanzmäßig zu erfassen versuchen, ergaben zunächst einen jährlichen Nettofluß in die Atmosphäre von 1,8 bis 4,7 Gt C (HOUGHTON et al. 1983), der allerdings in den neuesten Abschätzungen von HOUGHTON (1985) auf Werte zwischen 1,0 und 2,8 Gt C/a reduziert wurde. Andererseits ergibt die Bilanzierung der meisten Atmosphäre-Ozean-Modelle, daß neben dem Ozean eine weitere Senke für zusätzliches atmosphärisches CO_2 aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe vorhanden sein sollte; günstigstenfalls sind diese Modelle mit einer neutralen Biosphäre (weder Quelle noch Senke) vereinbar.

4.2 Reservoir und Flußstrukturen

Kohlendioxid wird von den Pflanzen bei der Photosynthese gebunden, die dabei gebildeten Zucker werden im sekundären Stoffwechsel in eine Vielzahl organischer Verbindungen unterschiedlicher Stabilität und Verweilzeit (z.B. holzige und krautige Anteile) umgesetzt. Nach dem Absterben gelangen diese Verbindungen in die Streuschicht, wo sie teilweise zu CO_2 oxidiert werden; ein anderer Teil wird in sehr stabiler Form als totes organisches Material im Boden (Humus) gespeichert. Abbildung 3 zeigt eine Skizze der Flußstrukturen in der Biosphäre. Die Nettoprimärproduktion (NPP) ist allgemein eine Funktion der stehenden Biomasse, des Lichtflusses, des CO_2 -Angebots und anderer Pflanzennährstoffe sowie einer Reihe weiterer Faktoren, von denen die Temperatur T und

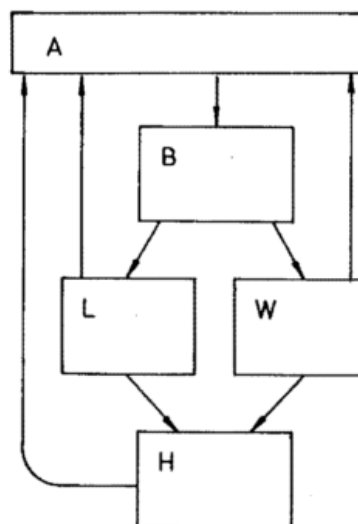


Abb. 3: Flußstruktur in den terrestrischen Biota
A: Atmosphäre, B: lebende Biomasse, L: Laubstreu, W: Holzstreu, H: Humus. Für jede modellierte Vegetationseinheit wird eine solche Struktur benutzt; zur Modellierung bestimmter Effekte, wie z. B. des Nachwachsens auf gerodeten Flächen, muß die Biomasse B weiter unterteilt werden.

Niederschlag P die wichtigsten sind. Nimmt man an, daß die NPP direkt proportional zur Blattmasse ist, so kann die Abhängigkeit von der Gesamtbioasse in der Form

$$NPP = NPP_0 (B/B_0)^\delta, 0 < \delta < 1 \quad (1)$$

dargestellt werden (KOHLMAIER 1981). Für die Abhängigkeit der NPP von Temperatur und Niederschlag im Klimaxzustand wurden Funktionen von LIETH (1975) ermittelt.

Eine wichtige, noch nicht hinreichend geklärte Frage ist die Abhängigkeit der Pflanzenproduktion von der atmosphärischen CO₂-Konzentration. Aus Experimenten ist bekannt, daß Pflanzen auf erhöhtes CO₂-Angebot mit verstärkter Produktion reagieren können, jedoch ist umstritten, wieweit die weitgehend unter Laborbedingungen und mit Nutzpflanzen erhaltenen Ergebnisse auf natürliche Ökosysteme im gleichen Maßstab übertragen werden können (LEMON 1983). Gestützt wird die Hypothese eines CO₂-Düngungseffekts durch die Analyse des jährlichen Zyklus des atmosphärischen CO₂-Signals. Die an den verschiedenen Meßstationen beobachteten atmosphärischen CO₂-Kurven weisen eine stark ausgeprägte Jahresamplitude auf, deren Maximum im Mai und deren Minimum im September erreicht wird (nördliche Hemisphäre, Mauna Loa, vgl. Beitrag 1). Entsprechend einer Analyse von KEELING (1985) wächst diese Amplitude mit einer jährlichen Steigerungsrate von 0,82% (Mauna Loa 1958—1984) gegenüber dem Anfangswert des Jahres 1958.

reszeitlichen unterschiedlichen interhemisphärischen Transport. Unter Verwendung eines dreidimensionalen atmosphärischen Transportmodells, daß im Goddard Institute for Space Studies entwickelt wurde (FUNG et al. 1983), konnte HEIMANN (1984) bestätigen, daß die Landvegetation der weitaus wichtigste Faktor zur Beschreibung des saisonalen Signals auf der Nordhemisphäre ist. In einer weitergehenden Analyse des beobachteten Zuwachses der Jahresamplitude haben KOHLMAIER et al. (1985) den Einfluß der verschiedenen Beiträge abgeschätzt (Tab. 1), wobei dieser Zuwachs zu etwa 25% auf eine Stimulation der Landbiota zurückgeführt werden kann. Modellmäßig kann der Düngungseffekt durch die Einführung eines Düngungsfaktors $\bar{\beta}$ erfaßt werden, der definiert ist als (KOHLMAIER und BRÖHL, 1985)

$$\bar{\beta} = (\Delta NPP / NPP_0) / (\Delta CO_2 / CO_2^0) \quad (2)$$

wobei der Index 0 einem Referenzzustand entspricht. Der Düngungseffekt ist für verschiedene Vegetationseinheiten unterschiedlich, entsprechend können die $\bar{\beta}$ -Werte zwischen 0.1 und etwa 0.6 schwanken (KOHLMAIER et al. 1985 b), wobei für Einzelpflanzen im Schwachlichtbereich sogar β -Faktoren über 1 beobachtet werden können. Berücksichtigt man außerdem, daß durch CO₂-Stimulation auch die Blattoberfläche vergrößert wird (modelliert durch (B/B₀)^δ), so kommt man für die NPP zu folgendem Ansatz:

$$NPP = NPP_0(T, P) \cdot (B/B_0)^\delta \cdot (1 + \bar{\beta}(\Delta CO_2 / CO_2^0)) \quad (3)$$

Tab. 1: Beiträge zum Amplitudenanstieg des saisonalen Zyklus auf dem Mauna Loa

	Bevorzugter Wert für Komponentenanstieg	Bereich der jeweiligen Komponente	% Effekt der jeweiligen Komponente auf gesamte Amplitudenänderung	
			Bereich	Mittel
CO ₂ Stimulation	.179	.15— .28	30.6—23.7	27.1
Anstieg der landwirtschaft. Produktion	.121	.11— .17	22.4—14.4	18.4
Saisonale atmosphärische Zirkulation	.120	.07— .26	14.3—22.0	18.2
Aufforstung und Abholzung	.186	.13— .35	26.5—29.7	28.1
Saisonaler Effekt des Verbrauchs fossiler Brennstoffe	.036	.02— .08	4.1— 6.8	5.5
Anstieg der ozeanischen Produktivität	.018	.01— .04	2.0— 3.4	2.7
SUMME	.660	.49—1.18	100.0	100.0

Wie läßt sich das erklären? Im globalen CO₂-Kreislauf spielen verschiedene saisonale Prozesse eine Rolle: In mittleren und höheren Breiten nimmt die Landvegetation während der Wachstumsperiode im Sommer durch Photosynthese verstärkt atmosphärisches CO₂ auf, während in der kalten Jahreszeit die Ökosystemrespiration eine Nettoabgabe von CO₂ an die Atmosphäre zur Folge hat. Auch die Ozeane tragen mit einer allerdings wesentlich kleineren Amplitude zur Saisonalität bei, was besonders auf der Südhemisphäre deutlich wird, wo die Landvegetation relativ zur Meeresbedeckung in den Hintergrund rückt. Auch die vorwiegend auf der nördlichen Hemisphäre (ca. 85%) ermittelten fossilen Brennstoffe beeinflussen die Jahresamplitude, zum einen bedingt durch die Saisonalität des Verbrauchs selbst, zum anderen durch den jah-

wobei β sich von $\bar{\beta}$ in Gleichung (2) unterscheidet. Ursprünglich machten BACASTOW und KEELING einen formal ähnlichen Ansatz:

$$NPP = NPP_0 (1 + \beta \ln (CO_2 / CO_2^0)) (B/B_0) \quad (4)$$

der bei der Entwicklung des Logarithmus für kleine Änderungen in Gleichung (3) übergeht, allerdings für den Fall $\delta = 1$. Wir konnten zeigen, daß gerade ein solcher Ansatz allerdings zu einer unendlich großen Senke für zusätzliches fossiles CO₂ führt, was sicher nicht mit dem empirischen Befund zu vereinbaren ist. Die Frage der Kohlenstoffspeicherung im terrestrischen Ökosystem hängt dynamisch nicht nur von der Stimulation der NPP, ausgedrückt durch β , sondern auch davon ab, wieviel der zusätzlichen Assimilate im Kohlenstoffspeicher

mit einer längeren Verweildauer (Holz, Humus) geht. Im Rahmen eines einfachen Modellansatzes, der die zusätzliche Streuproduktion linear mit der Biomasse anwachsen läßt, konnten wir z. B. für die stehende lebende Biomasse B den Ansatz vorschlagen:

$$dB/dt = NPP_0 (1 + \beta (\Delta CO_2(t)/CO_2^0)) - NPP_0(B/B_0) \quad (5)$$

der im Rahmen der Quasistationarität ($dB/dt = 0$) sofort zu dem Resultat führt:

$$B = B_0 (1 + \beta (\Delta CO_2(t)/CO_2^0)) \quad (6)$$

und dessen zeitliche Ableitung, die den jährlichen Zuwachs an Biomasse auf Grund der CO_2 -Düngung beschreibt:

$$B = \beta (\Delta_a CO_2(t)/CO_2^0) B_0 \quad (7)$$

Unter sonst unveränderten Bedingungen nimmt die Biomasse proportional zu jährlichen relativen CO_2 -Steigerung (im Durchschnitt 1/3% während der letzten 25 Jahre) und proportional zur ursprünglich stehenden Biomasse multipliziert mit dem Düngungsfaktor β , den wir mit 0,25 bis 0,5 im Mittel annehmen wollen, zu. Für die gesamte Biomasse der terrestrischen Vegetation ($B_0 = 600 \text{ Gt C}$) kann also

$$B = 0,25 \text{ bis } 0,5 (1/300) 600 \text{ Gt C/a} = 0,5 - 1 \text{ Gt C/a} \quad (8)$$

abgeschätzt werden. Berücksichtigt man, daß ein etwa ebenso großer Effekt in der Anreicherung des Bodenkohlenstoffs besteht, so kommen wir damit zu einer Größenordnung, die ungefähr, mit umgekehrten Vorzeichen allerdings, dem der tropischen Rodungen entspricht.

4.3 Regionalisierung und menschliche Eingriffe

Wenn das qualitative Verhalten der Biota im Kohlenstoffkreislauf mit der geschilderten Modellstruktur auch mit global gemittelten Werten (KOHLMAIER 1981) beschrieben werden kann, so ist für die Beschreibung der Folgen menschlicher Eingriffe und die Reproduktion der in Zeitreihen vorliegenden Daten eine regionale und funktionale Gliederung der Biota unerlässlich, da sich die verschiedenen Vegetationseinheiten der Erde sowohl in ihrer Bindungs- und Speicherkapazität für Kohlenstoff als auch im Maß ihrer Beeinflussung durch den Menschen unterscheiden. Die jährliche Kohlenstoff-Bindung und -Speicherung der terrestrischen Biome wurde von verschiedenen Autoren (u. a. WHITTAKER u. LIKENS 1975, RODIN et al. 1975, AJTAY et al. 1979, OLSON 1982, MATTHEWS 1983) abgeschätzt; dabei bestehen heute die größten Unsicherheiten hinsichtlich der Speicherung in den tropischen Waldgebieten (BROWN u. LUGO 1984). LIETH und Mitarbeiter (LIETH 1975, LIETH u. BOX 1977, BOX 1978) haben die NPP in Abhängigkeit von Temperatur und Niederschlag in verschiedenen Modellen für die gesamte Erdoberfläche in einem $2,5 \cdot 2,5^0$ Netz berechnet, das Osna-brücker Biosphärenmodell (ESSER 1985) berechnet daraus und aus weiteren Parametern die stehende Biomasse in der gleichen Auflösung.

Das Ausmaß und die Geschichte der menschlichen Eingriffe in die Landvegetation sind weitaus schwerer zu erfassen (KOHLMAIER et al. 1983). Daten für die heutige Flächenausdehnung verschiedener Landnutzungsformen und deren regionale Verteilung wurden von MATTHEWS (1985) zusammengetragen. Der für den C-Kreislauf heute bedeutendste Eingriff, die Rodungen in den tropischen Waldgebieten, wur-

den in einer Studie der Food and Agriculture Organisation (LANLY 1982) analysiert; der dabei erhaltene Wert von $11,1 \cdot 10^6$ ha gerodeter Waldflächen pro Jahr basiert weitgehend auf offiziellen Statistiken und liegt am unteren Ende der Skala der übrigen Schätzungen. Die insgesamt durch diese Rodungen in die Atmosphäre freigesetzte Kohlenstoffmenge wird auf rund 1 Gt/a geschätzt (KOHLMAIER et al. 1985 c). In Abbildung 4 wird dargestellt, daß jährlich etwa 3 Mill. ha Urwald in traditionelle Land- und Weidewirtschaft überführt werden, während etwa 4 Mill. ha zunächst in selektiv ausgebeutete Wälder übergehen, die dann anschließend in dem Wanderfeldbau und in der traditionellen Landwirtschaft genutzt werden. Der Wanderfeldbau in den Tropen ist mit einer jährlichen Nutzung von 5,1 Mill. ha an der Reduktion des tropischen Waldes ganz wesentlich beteiligt. Bei einer Bewirtschaftung von durchschnittlich zwei Jahren (ca. 80 Mill. ha Kulturland) spielt die Waldbrache im Wanderfeldbauzyklus eine wesentliche Rolle, die jedoch durch Übernutzung in einigen Gebieten nur noch wenig Fruchtbarkeit zeigt. Schließlich gehen jährlich ca. 1 Mill. ha der landwirtschaftlich genutzten Urwaldfläche in unfruchtbares Land über, auf dem eine Aufforstung aufgrund von Erosion nicht mehr möglich ist.

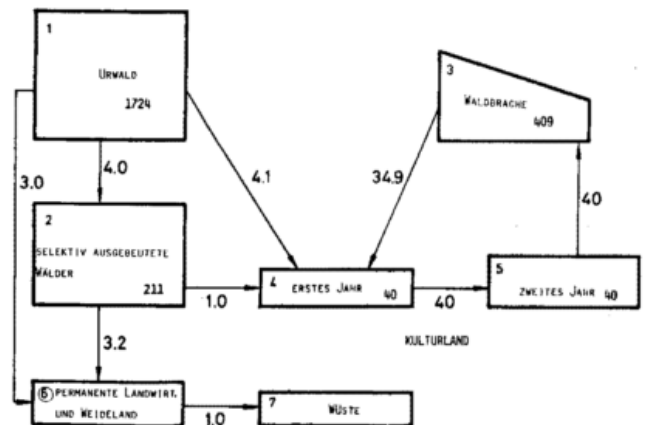


Abb. 4: Flächenumwandlungen in tropischen Wäldern
Flächenbestände in 10^6 ha, Flächenumwandlungen in 10^6 ha/a

Die heutige Rolle der Biota als Quelle oder Senke für atmosphärisches CO_2 wird jedoch nicht nur durch die aktuellen Eingriffe bestimmt, sondern ganz wesentlich auch durch das Antwortverhalten des Systems auf vergangene Störungen: So befinden sich die Waldgebiete der gemäßigten Zone heute global gesehen noch in einer Erholungs- und Akkumulationsphase, die durch die großen Rodungen um die Jahrhundertwende (sog. Pioniereffekt) mit anschließender Wiederaufgabe gerodeter Flächen eingeleitet wurde. In diesen Gebieten ist heute noch eine Nettospeicherung von Kohlenstoff zu erwarten (KOHLMAIER et al. 1981).

Die vorliegenden historischen Daten für die Rodung von Waldgebieten, die Gewinnung von Nutzholz, die Ausdehnung landwirtschaftlicher Flächen und die Wiederaufforstung, wurden von HOUGHTON et al. (1983, 1985) zusammengestellt. Ihr Modell, das aus 69 verschiedenen Ökosystemen aufgebaut ist und ein einfaches Antwortverhalten von lebender Biomasse und Bodenkohlenstoff auf Störungen beschreibt,

ergibt einen Netto-Input von 135—228 Gt C in die Atmosphäre für die Zeit von 1860 bis 1980, wobei der Nettofluß für 1980 auf 1,0—2,8 Gt C/a abgeschätzt wird.

5 Ausblick

Obwohl eine Vielzahl von Modellen für die Teilbereiche des Kohlenstoffkreislaufs existieren, wurden bisher nur wenige Versuche gemacht, den Gesamtkreislauf mit Hilfe differenzierter Teilmodelle über einen längeren Zeitraum zu simulieren (BOLIN et al. 1981). Bisherige Studien über die historische und künftige Entwicklung des Gesamtkreislaufs (vgl. KOHLMAIER et al. 1981, KRATZ 1983, GOUDRIAAN u. KETNER 1984) verwendeten einen in hohe und niedere Breiten unterteilten Diffusions-Advektions-Ozean und eine in 5—6 Biome gegliederte Biosphäre. Die Atmosphäre wurde in diesen Modellen durch ein oder zwei Boxen dargestellt. Obwohl damit bereits einige wichtige Beobachtungsdaten reproduziert und Aussagen von prognostischem Wert gewonnen werden konnten, sind wir von der umfassenden Beschreibung und der Möglichkeit exakter regionaler Prognosen noch weit entfernt. Drei weiterführende Entwicklungsrichtungen zeichnen sich ab:

- die weitere Aufklärung und exakte modellmäßige Erfassung der wichtigsten Prozesse in den einzelnen Teilbereichen, wie z. B. die Nettoprimärproduktion und die Ökosystemrespiration in Abhängigkeit von anderen Systemgrößen und externen Parametern;
- die Erweiterung der Datenbasis für die regionalisierte und saisonale Darstellung der wichtigsten Teilbereiche und Prozesse und für die zeitliche Entwicklung der Störgrößen; Entwicklung von aufwendigen dreidimensionalen Modellen, die reale physikalische Prozesse mit ausreichender regionaler und saisonaler Auflösung beschreiben können, wie z. B. das schon erwähnte GISS-Modell (FUNG et al. 1983) für die allgemeine atmosphärische Zirkulation oder das ozeanische Zirkulationsmodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (MAIER-REIMER 1983);
- die Kopplung der differenzierten Modelle der einzelnen Teilbereiche, die es erst erlaubt, das vorhandene Datenmaterial zur Verifikation der Modellstruktur bzw. zur Bestimmung der unbekanntenen Parameter voll zu nutzen.

Literatur

AJTAY, G. L.; KETNER, P.; DUVINEAUD, P.: Terrestrial primary production and phytomass. In: B. BOLIN (Ed.): The global carbon cycle. New York; Wiley & Sons 1979.

BACASTOW, R. B.; ADAMS, J. A.; KEELING, C. D.; MOSS, D. J.; WHORF, T. P.; WONG, C. S.: Atmospheric carbon dioxide, the Southern oscillation, and the weak 1975 El Niño. *Science* 210, 1980, S. 66—68.

BACASTOW, R. B.; BJÖRKSTRÖM, A.: Comparison of ocean models for the carbon cycle. In: B. BOLIN (Ed.): Carbon cycle modelling. New York: Wiley & Sons, 1981 (= SOPE Bd. 16).

BJÖRKSTRÖM, A.: A model of interaction between atmosphere, oceans and land biota. In: B. BOLIN (Ed.): The global carbon cycle. New York: Wiley & Sons 1979.

BOLIN, B.; KEELING, C. D.; BACASTOW, R. B.; BJÖRKSTRÖM, A.; SIEGENTHALER, U.: Carbon cycle modelling. In: B. BOLIN (Ed.): Carbon cycle modelling. New York: Wiley & Sons 1981 (= SCOPE Bd. 16)

BOX, E.: Geographical dimensions of terrestrial net and gross primary productivity. *Environ. Biophys.* 15 (1978), S. 305—322.

BROWN, S.; LUGO, A. E.: Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. *Science* 233 (1984), S. 1290—1293.

ESSER, G.: Der Kohlenstoff-Haushalt der Biosphäre — Struktur und erste Ergebnisse des Osnabrücker Biosphären-Modells. *Veröff. d. naturwiss. Ges. Emden v. 1814. N. F.* 1985.

FLOHN, H.; HENSE, A.; WEBER, K.-H.: Interannual CO₂ variation and other air-sea exchange features as a key for the Super-Niño 1982/83. *Kongressbericht Kandersteg 1985.*

GOUDRIAAN, J.; KETNER, P.: A simulation study for the global carbon cycle, including man's impact on the biosphere. *Climatic Change* 6 (1984), S. 167—192.

GRASSL, H.; MAIER-REIMER, E.; DEGENS, E. T.; KEMPE, S.; SPITZY, A.: CO₂, Kohlenstoffkreislauf und Klima. I. u. II. *Naturwissenschaften* 71 (1984) S. 129—136, 234—238.

FUNG, I.; PRENTICE, K.; MATTHEWS, E.; LERNER, J.; RUSSEL, G.: A 3-D tracer model study of atmospheric CO₂: Response to seasonal exchanges with the terrestrial biosphere. *J. Geophys. Res.* 88 (1983) S. 1281—1294.

HEIMANN, M.; KEELING, C. D.; FUNG, I.: Simulating the atmospheric carbon dioxide distribution with a three dimensional tracer model. *Proc. of the 6th ORNL Life Sciences Symposium* (in press).

HOFERT, M. I.; CALLEGARI, A. J.; HSIEH, C. T.: A box diffusion carbon cycle model with upwelling, polar bottom water formation and a marine biosphere. In: B. BOLIN (Ed.): Carbon cycle modelling. New York: Wiley & Sons 1981.

HOUGHTON, R. A.; HOBBI, J. E.; MELILLO, J. M.; MOORE, B.; PETERSON, B. J.; SHAVER, G. R.; WOODWELL, G. M.: Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980. A net release of CO₂ to the atmosphere. *Ecol. Monogr.* 53 (1983) S. 235—262.

HOUGHTON, R. A.: Spatial and temporal variations in the net biotic flux of carbon. *Kongressbericht Kandersteg 1985.*

KEELING, C. D.: *Pers. Mitt.* 1985.

KOHLMAIER, G. H.: Possible self-consistent paths of the terrestrial biota-humus-atmosphere system in response to man's impact. In: *Radiat. Environ. Biophys.* 19 (1983) S. 67—78.

- KOHLMAIER, G. H.; KRATZ, G.; BRÖHL, H.; SIRE, E. O.: The source-sink function of the terrestrial biota within the global carbon cycle. In: W. I. MITSCH (Ed.): Energy and ecological modelling. Dordrecht Elsevier 1981.
- KOHLMAIER, G. H.; BRÖHL, H.; FISCHBACH, U.; KRATZ, G.; SIRE, E. O.: The role of the biosphere in the carbon cycles and biota models. In: W. BACH et al., (Eds.) Carbon dioxide: Current views and developments in energy/climate research. Dordrecht Reidel Publ. Comp. 1983.
- KOHLMAIER, G. H.; BRÖHL, H.: Modelling CO₂ stimulation of plants within the concept of ecosystem respiration response. Proc. IAMAP-conference atmospheric carbon dioxide. Kandersteg (Schweiz) 1985.
- KOHLMAIER, G. H.; REVELLE, R.; KEELING, C. D.: Exchange of CO₂ between the atmosphere and the biosphere: stimulation of the terrestrial vegetation by fossil fuel CO₂ in combination with other man made changes. U. S. DOE (in Vorbereitung) 1985 (a).
- KOHLMAIER, G. H.; PLÖCHL, M.; KEELING, C. D.; REVELLE, R.: Modelling effects and experimental evidence of a CO₂ stimulation effect on different types of vegetation. Proc. IAMAP-Conf. Atmospheric carbon dioxide. Kandersteg (Schweiz) 1985 (b).
- KOHLMAIER, G. H.; BRÖHL, H.; STOCK, P.; PLÖCHL, M.; FISCHBACH, U.; JANECEK, A.; FRICKE, R.: Biogenic CO₂ release and soil carbon erosion connected with changes in land use in tropical forests of Africa, America and Asia. *Mittel. Geolog. Paläontol. Inst. Univ. Hamburg* (in Druck) 1985 (c).
- KRATZ, G.: Ein dynamisches Modell des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs und seine Veränderungen durch anthropogene Eingriffe. *Diss. Frankfurt* 1983.
- KRATZ, G.: Modelling the global carbon cycle. In: O. HUTZINGER (Ed.): The handbook of environmental chemistry. Vol. 1/Pt. D, Berlin, Heidelberg; Springer 1985.
- LANLY, J. B.: Tropical forest resources. *FAO Forestry Paper 30*, FAO and UNEP, Roma 1982.
- LEMON, E. R., (Ed.): CO₂ and plants. *AAAS selected symposium 84*, Boulder Col., Westview Press 1983.
- LIETH, H.: Primary production of the major vegetation units of the world. In: Primary productivity of the biosphere. In: H. Lieth and R. H. Whittaker, Berlin, Heidelberg Springer 1985, S. 203—215.
- LIETH, H.; BOX, E.: The gross primary productivity pattern of the land vegetation: A first attempt. *Trop. Ecol.* 18 (1977) S. 109—115.
- MAIER-REIMER, E.: Towards a global ocean carbon model. *Progr. in Biometeorol.* 3 (1984) S. 295—310.
- MATTHEWS, E.: Global vegetation and land use: New high-resolution data basis for climate studies. *J. Climate Appl. Meteorol.* 22 (1983) S. 474—487.
- MATTHEWS, E.: Atlas of archived vegetation, land use and seasonal albedo data sets. *NASA Tech. Memo. 83 199*, Goddard Space Flight Center, New York 1985.
- MUNRO, J. K.; OLSON, I. S.: A box-diffusion model of the global carbon cycle including marine organic compartments and a polar ocean. In: W. I. MITSCH (Ed.): Energy and ecological modelling. Amsterdam, Elsevier 1983.
- OESCHGER, H.; SIEGENTHALER, V.; SCHOTTERER, U.; GUGELMANN, A.: Box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. *Tellus* 27 (1975) S. 168—192.
- OESCHGER, H.; SIEGENTHALER, U.; HEIMANN, M.: The carbon cycle and its perturbation by man. In: W. BACH (Ed.): Interaction of energy and climate. Dordrecht: Reidel 1980.
- OLSON, J. S.: Earth's vegetation and atmospheric carbon dioxide. In: W. C. CLARK (Ed.): Carbon dioxide review, Oxford Univ. Press 1982, S. 388—398.
- PEARMAN, G. I.: Preliminary studies with a new global carbon cycle model. In: *Austral. Acad. Sci. (Ed.): Carbon dioxide and climate: Australian reserach*, Canberra 1980.
- RODIN, L. E.; BASILEVITCH, N. I.; ROZOV, N. N.: Productivity of the world's main ecosystems. In: *Proc. Symp. Seattle, National Academy of Sciences*, Washington 1975.
- SIRE, E. O.; KOHLMAIER, G. H.; KRATZ, G.; FISCHBACH, U.; BRÖHL, H.: Comparative dynamics of atmosphere-ocean models within the description of the perturbed global carbon cycle. *Z. Naturforsch.* 36a (1981) S. 233—250.
- STAUFFER, B.; NEFTEL, A.; OESCHGER, H.: The increase of atmospheric CO₂, reconstructed based on ice core analysis. *Kongreßbericht, Kandersteg* 1985.
- VIECELLI, I. A.; ELSAESSER, H. W.; BURT, I. E.: A carbon cycle model with latitude dependence. *Climatic Change* 3 (1981) S. 281—301.
- WHITTAKER, R. H.; LIKEN, G. E.: The biosphere and man. In: H. Lieth and R. H. Whittaker (Eds): Primary productivity of the biosphere. New York: Springer 1975.
- WOODWELL, G. M.; WHITTAKER, R. H.; DINERS, W. A.; LIKENS, G. E.; DELWICHE, C. C.; BOTKIN, D. V.: The biota and the world carbon budget. *Science* 199 (1978) S. 141—146.
- WOODWELL, G. M. (Ed.): The role of the terrestrial vegetation in the global carbon cycle. New York: Wiley & Sons 1984. (= SCOPE 23).

Energieszenarien

1 Einleitung

Die beobachtete langfristige Zunahme des CO₂-Gehalts der Atmosphäre ist zweifellos anthropogen und beruht vor allem auf der Verfeuerung fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas) und der intensiven Nutzung der terrestrischen Biosphäre. Um einen Einblick in den möglichen zukünftigen Verlauf der CO₂-Emission zu erlangen, ist es notwendig, sich mit der möglichen Energieentwicklung zu beschäftigen („Energiepfade“).

Zur Vorhersage einer zukünftigen Energieentwicklung bedient man sich in jüngster Zeit immer mehr der Szenarienanalyse anstelle der einfachen Trendextrapolation. Von den Autoren solcher Szenarien wird auf die Feststellung großer Wert gelegt, daß diese nicht als Prognosen, sondern vielmehr als auf Gedankenexperimenten bzw. hypothetischen Projektionen beruhende Energiepfade zu verstehen sind. Ziel dieses Vorgehens ist es, ausgehend von realistischen Randbedingungen und Möglichkeiten und unter Einbeziehung plausibler Annahmen, vertretbare Zukunftsperspektiven aufzuzeigen. Die meisten Szenarien stützen sich dabei auf ein oder mehrere Modelle.

Die Analyse der Energieentwicklung dient nicht nur zur Planung der zukünftigen Energieversorgung, sondern auch zur Abschätzung der möglichen CO₂-Entwicklung. Dieses aus fossilen Brennstoffvorgängen stammende CO₂ ist nur ein, wenn auch wichtiger klimabeeinflussender Faktor, der nur mit fächerübergreifenden ökosystemaren Untersuchungsmethoden in den Griff zu bekommen ist. Darüber hinaus ist es dringend erforderlich, sich auch noch mit den vielen anderen Treibhausgasen, die ebenfalls bei fossilen Brennstoffvorgängen, bei der Herstellung chemischer Produkte und bei der Waldzerstörung anfallen, zu befassen. Diese Umweltbelastungen können als Beispiel für eine fächerübergreifende Systemanalyse dienen und damit zu einer sinnvollen Energiestrategie bei der Herabsetzung der Klimarisiken durch CO₂ und andere Gase beitragen (BACH 1982/84).

Hauptziel dieses Übersichtsartikels ist es, einen Einblick in die Methoden, Gedankengänge und Annahmen zu geben, die hinter der Entwicklung der unterschiedlichen Energie- und Wirtschaftsmodelle stehen. Im Folgenden werden nur diejenigen Energieszenarien betrachtet, die auch zur Erfassung zukünftiger CO₂-Emissionen herangezogen worden sind. Durch kritischen Vergleich der Vorgehensweisen soll ein Einblick in deren Stärken und Schwächen vermittelt werden.

2 Grundsätzliches zur Modellbildung

2.1 Was ist ein Modell?

Jede Abschätzung resultiert aus einer Modellvorstellung, sei es ein mathematisches Modell, das quantitative Daten liefert, oder ein mentales Modell, das zur intuitiven Beurteilung beiträgt. In den folgenden Abschnitten beschäftigen wir uns vorwiegend mit quantitativen Modellen. Diese bestehen grundsätzlich aus drei Einheiten: Den Eingabedaten, den Gleichungen (oder der „schwarzen Box“) und den Ergebnissen (KEE-PIN 1985). Die Eingabedaten (oder exogenen Variablen) wer-

den in die „schwarze Box“ eingegeben; dort werden sie umgewandelt (über endogene Prozesse), um dann einen Output, gewöhnlich in Form unterschiedlicher Szenarien, zu liefern. Der Vorteil mathematischer Modelle ist, daß sie eine Formalisierung der Abhängigkeiten erfordern, und daß die Annahmen und Eingaben explizit gemacht werden müssen, was die jeweiligen Vorstellungen deutlicher macht.

Die Wirklichkeit ist jedoch viel komplizierter, und das liegt an drei Eigenschaften, die allen Modellen gemein sind:

- **Auslassungen:** Ein Modell kann immer nur ein unvollständiges Abbild der Wirklichkeit sein. Daraus folgt, daß notwendigerweise eine Anzahl der verschiedenartigen Aspekte des zu modellierenden Systems ausgelassen werden, was teilweise von dem intuitiven Urteil bzw. von Plausibilitätsbetrachtungen des Modellbauers abhängt. Auch bei umfassenden Modellansätzen ist durch die Art der Auswahl und die Gewichtung des Inputs mit einer einschränkenden Aussage zu rechnen.
- **Approximation:** In einem Modell müssen häufig auch gut verstandene Beziehungen approximiert werden, z. B. wegen mangelnder Computerkapazität und unzulänglicher räumlicher und zeitlicher Auflösung der Modellparameter. Das beinhaltet eine unmittelbare Fehlerquelle, deren Größenordnung nicht immer abschätzbar ist.
- **Annahmen:** Wenn bestimmte Wechselbeziehungen nur ungenügend verstanden, höchst unsicher, oder auch nur schwer zu quantifizieren sind, werden sie entweder ausgelassen, oder es werden Annahmen gemacht, von denen man glaubt, daß sie die Abhängigkeiten richtig wiedergeben. Solche Annahmen sind häufig ziemlich willkürlich und entbehren oft jeglicher empirischer und theoretischer Grundlage. Politische, soziale und institutionelle Einflüsse entziehen sich im allgemeinen einer Quantifizierung.

Das Hauptcharakteristikum eines Modells ist es, daß es bis zu einem gewissen Grad immer unvollständig und „unrichtig“ und damit vorläufig bleibt. Darüber hinaus sind die Vorgaben und Ansätze in den verschiedensten Modellen sehr unterschiedlich, was einen direkten Vergleich sehr erschwert, wenn nicht gar unmöglich macht. Nichtsdestotrotz kommen wir in einer Welt, die immer komplexer und undurchsichtiger wird, ohne die Hilfe von Modelldarstellungen nicht mehr aus. Wenn auch die Modelle zukünftige Ereignisse nicht vorhersagen können, so können sie dennoch für die unterschiedlichen politischen Optionen die möglichen Entwicklungen simulieren. Dadurch können sie den Entscheidungsträgern bei der Abschätzung und Bewertung der Folgen, die sonst nicht erkannt und folglich übersehen worden wären, wertvolle Hinweise geben.

2.2 Modellumfang

Der Hauptvorteil eines großen und disaggregierten Modells liegt darin, daß es viele Details aufnehmen kann, was im Prinzip eine umfassendere Darstellung der Wirklichkeit erlaubt.

Der Hauptnachteil ist, daß es unüberschaubar wird und seine Ergebnisse schwer zu interpretieren sind. Es ist schwierig, die inhärenten Unsicherheiten abzuschätzen, und wegen der vielen Variablen und Parameter können auch kaum alle erforderlichen systematischen Sensitivitätstests durchgeführt werden. Kleinere Modelle haben die komplementären Vor- und Nachteile. Neueste Untersuchungen haben gezeigt, daß die Annahme, mehr Details erzeugen auch genauere und wirkungsvollere Modelle, nicht notwendigerweise stimmen muß. Die alte Faustregel, daß der Zweck der Modellrechnung das nötige Detail bestimmt, gilt noch immer, wobei die Erfahrung des Modellbauers eine nicht unwesentliche Rolle spielt.

2.3 Modellvalidierung

Die Modelleistung, d. h. wie gut ein Modell die Wirklichkeit reproduziert, ist eine der wichtigsten Fragen bei der Modellentwicklung. Dabei gilt es, die dem Modell zugrundeliegende Theorie durch das Experiment zu verifizieren. Gewöhnlich wird dabei getestet, wie gut das Modell historische Daten reproduzieren kann. Das ist besonders schwierig, oder sogar unmöglich, wenn es sich dabei um die Auswirkung unvorhersehbarer politischer Ereignisse handelt. Es gibt kein Energiemodell, das mit hinreichender Genauigkeit aus den Energiedaten der 60er Jahre die erratische Energieentwicklung der krisengeschüttelten 70er Jahre hätte voraussagen können. Modellvalidierung ist besonders schwierig bei langfristigen Vorgängen, denn diese können nur durch das Eintreten des Ereignisses post factum verifiziert werden, und die Zeitspanne der vorhandenen Daten ist gewöhnlich zu kurz für die Anwendung von herkömmlichen statistischen Validierungstechniken (NORDHAUS u. YOHE 1983).

2.4 Unsicherheitsanalyse

Intuitiv würde jeder zustimmen, daß bei Langzeitschätzungen die Unsicherheit mit dem Vorhersagezeitraum zunimmt. Umso überraschender ist die Feststellung, daß häufig größere Uneinigkeit über die nahe als über die ferne Zukunft herrscht. Offensichtlich ist es so, daß es leichter ist, über Vorgänge, die erst in ferner Zukunft verifizierbar werden, zu einem Konsens zu kommen. Die gegenseitige Beeinflussung durch Informationsaustausch vermittelt einen Anflug von Sicherheit und Verlässlichkeit, die bei der Vorgabe, was „konventionelle Weisheit“ zu sein hat, in den meisten Fällen unangemessen ist. Weiterhin wird hartnäckig der Glaube vertreten, daß mehr Forschung die Summe der Unsicherheiten reduzieren kann. Jeder Forscher weiß aber, daß in den meisten Fällen weitere Forschung — die selbstverständlich unbedingt erforderlich ist — neue Unsicherheiten mit sich bringt.

In der Modellrechnung können wir mit KEEPIN (1985) zwei allgemeine Kategorien von Unsicherheiten unterscheiden, nämlich die parametrische Unsicherheit (PU) und die strukturelle Unsicherheit (SU). Die PU bezieht sich auf die Zweifel, die wir über den genauen Wert eines existierenden Parameters oder einer Variablen haben. Die SU ist fundamentaler und subtiler; denn sie umfaßt auch die Unsicherheiten, die sich aus der gegenseitigen Beeinflussung der unterschiedlichen Variablen ergeben. Die PU bezieht sich vorwiegend auf den Input und die SU auf die Gleichungsstruktur. Die Unsicherheit im Output ist eine Kombination aus beiden, deren Ursprung nicht immer klar als PU oder SU zugehörig identifiziert wer-

den kann. Die Methoden der Unsicherheitsanalyse beschränken sich gewöhnlich auf die Untersuchung der PU. Dazu gehört die Durchführung von Sensitivitätsstudien, bei denen stochastische Prozesse und probabilistische Techniken, wie z. B. die Monte Carlo Methode etc., angewandt werden. Diese Methoden sind teilweise schon in Energie- und Wirtschaftsmodellen angewandt worden, wie in Abschnitt 4 an Beispielen gezeigt wird. Methoden zur Erfassung der SU existieren praktisch nicht, weil die meisten Modelle eine Grundstruktur haben, die nicht geändert werden kann. Ein Ausweg wäre, verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Strukturen zu entwickeln.

2.5 Modelldokumentation

Die Interpretation der Ergebnisse erfordert eine genaue Dokumentation des benutzten Modells, ohne die das Modell in der Tat eine „schwarze Box“ bliebe. Zu einer guten Dokumentation gehören die volle Spezifizierung der Gleichungen und Eingabedaten, Angaben über die kritischen Parameter, Annahmen und analytischen Verfahren sowie eine offene Darlegung der Unzulänglichkeiten und Anfälligkeiten des Modells.

2.6 Energiemodelle

Die bekanntesten Verfahren zur Abschätzung des globalen Energieverbrauchs beruhen auf ökonomischen Modellen und „linear programming“ (LP)-Modellen. Das Grundprinzip ökonomischer Modelle besteht darin, eine Funktion zu berechnen, die den Energieverbrauch wiedergibt, diese Funktion den historischen Daten anzupassen und schließlich den Bedarf in die Zukunft zu extrapolieren. Das Problem hierbei ist klar, wenn „Trend zum Schicksal“ wird.

Das Ziel von LP-Modellen ist, eine objektive Funktion, die Randbedingungen unterliegt, zu optimieren. Die objektive Funktion kann z. B. die Gesamtkosten eines Energieversorgungssystems über die nächsten Jahrzehnte darstellen. Dabei geht es darum, die Gesamtkosten bei Vorgabe der verschiedenen ressourcenbedingten und technologischen Randbedingungen zu minimieren. Es zeigt sich immer wieder, daß die analytische Struktur des LP eine grundlegende Instabilität enthält. So kommt es, daß z. B. kleine Änderungen in den Kostenannahmen zu Versorgungsstrukturen führen, die sich radikal unterscheiden. Die optimale Lösung pendelt von einem Extrem zum anderen. Da die zukünftigen Energiekosten höchst unsicher sind, können, wie in Abschnitt 4 gezeigt wird, vom LP keine verlässlichen Energieversorgungsprognosen erwartet werden.

3 Energieentwicklung in der Vergangenheit und in der Zukunft

Im Jahre 1980 wurden ca. 84% des Weltenergieverbrauchs durch fossile Brennstoffe gedeckt. Konventionelle Szenarien (Abschnitt 4) nehmen für die nächsten Jahrzehnte keine größeren Umschichtungen in den fossilen Brennstoffanteilen an und gehen von einer weiteren Zunahme des fossilen Brennstoffverbrauchs aus. Bei einer solchen Entwicklung wäre mit einem starken CO₂-Anstieg in der Atmosphäre zu rechnen und die daraus resultierenden Klimabeeinflussungen würden zunehmen. Unkonventionelle Szenarien (Abschnitt 5) kommen aufgrund ihrer Untersuchungen zu einem abnehmenden Energiebedarf und damit reduzierten Umweltproblemen. Ehe

wir in den folgenden Abschnitten in Plausibilitätsbetrachtungen für die einzelnen Energieszenarien eintreten, ist es deshalb ganz instruktiv, einmal den tatsächlichen Energieverbrauch der Vergangenheit und die Spannweite der Projektionen zu beleuchten. Die Energieentwicklungen für die Bundesrepublik Deutschland und für die Welt mögen hier als Beispiele dienen.

3.1 Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland

Abbildung 1 zeigt den tatsächlichen Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik von 1970 bis 1983. Aufgrund der deutlich erkennbaren Abnahmen nach der 1. Energiekrise von 1973/74 und der 2. Energiekrise von 1979 sah sich die Bundesregierung gezwungen, in den verschiedenen Fortschreibungen das Energieprogramm mehrfach drastisch nach unten zu korrigieren. Seit dem Höchststand von 408 Mill. t SKE in 1979 hat der Energieverbrauch jedes Jahr um rd. 4% abgenommen und scheint sich nach den neuesten Zahlen (1984) auf einen Wert um 360–365 Mill. t SKE einzupendeln. Ähnliche absinkende Energieverbrauchstrends und Bedarfsprojektionen lassen sich auch in anderen Industrieländern beobachten.

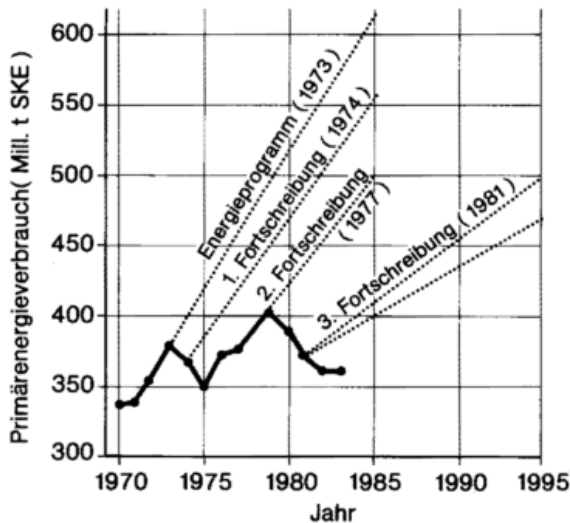


Abb. 1: Tatsächlicher Primärenergieverbrauch (Mill. t SKE \approx 1 GW) in der Bundesrepublik Deutschland und Energieprogramme der Bundesregierung (Nach Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen)

3.2 Entwicklung in der Welt

Der globale Primärenergieverbrauch in Abbildung 2 zeigt in der Aufbauphase der Nachkriegszeit einen großen Nachholbedarf, insbesondere in den Industrieländern, und damit einen starken Energieverbrauchsanstieg, der aber in den 70er Jahren abflacht, und das trotz des großen Nachholbedarfs der Entwicklungsländer. Es ist offenbar so, daß sich die meisten Länder bei den eskalierenden Energiepreisen eine weitere Zunahme ihres Energieverbrauchs wegen der fehlenden Devisen ganz einfach nicht leisten können. Anhand des dargebotenen Zahlenmaterials kann jeder seine eigenen Schlußfolgerungen ziehen, und selbst entscheiden, ob er Energieprojektionen, die bis zum Jahre 2000 gegenüber heute einen 2–3,5fach höheren Verbrauch postulieren, oder solche, die einen mehr oder weniger gleich großen Verbrauch annehmen, für plausibler hält.

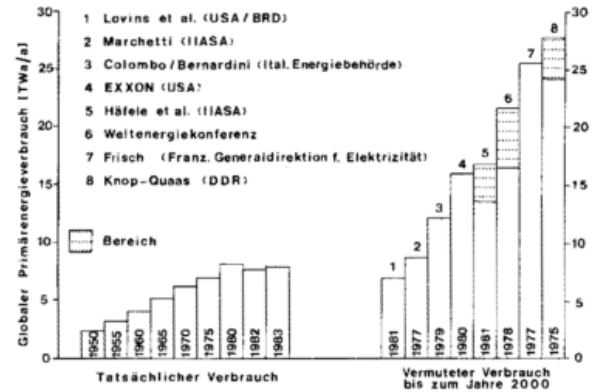


Abb. 2: Tatsächlicher globaler Primärenergieverbrauch (TWa/a) und vermuteter Verbrauch für das Jahr 2000 (die Zahlen in den Säulen beziehen sich auf das Jahr, in dem die Projektionen von den verschiedenen Forschungsgruppen gemacht worden sind) (Nach Energistics ESSO (1984) und angegebenen Szenarien)

4 Energieszenarien: Konventionelles Vorgehen

4.1 Allgemeines

Diese Szenarien beruhen gewöhnlich auf Annahmen bezüglich der Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, der Verfügbarkeit und Substituierbarkeit der Ressourcen und technologischer Innovationen. Allgemein wird die Änderung des Energiebedarfs als Produkt dreier Faktoren dargestellt (PERRY 1982):

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{B_2 (BSP/B)_2 (E/BSP)_2}{B_1 (BSP/B)_1 (E/BSP)_1} \quad (1)$$

Hier ist E der jährliche Energiebedarf (die Indizes 1 und 2 beziehen sich auf die verschiedenen Zeiten t_1 und t_2), B ist die Bevölkerungszahl, BSP/B ist die Pro-Kopf-Produktion von Gütern und Dienstleistungen, und E/BSP ist der erforderliche Primärenergieaufwand pro Einheit ökonomischer Output (die Energieproduktivität). Diese drei Faktoren werden gewöhnlich für die gesamte Welt abgeschätzt, wobei unterschiedlich stark nach Regionen und Energiesektoren disaggregiert wird. Bei diesem verbrauchs-orientierten Vorgehen geht es also darum, makroökonomische (BSP, Bruttosozialprodukt) und demographische (B, Bevölkerung) Variable vorherzusagen und daraus den zukünftigen Energieverbrauch abzuleiten. Der Rest der Analyse beschäftigt sich dann nur noch mit der Frage, welchen Anteil an den Ressourcen der berechnete Energieverbrauch benötigt und nicht damit, welche Energieform für die gewünschte Energiedienstleistung am geeignetsten und damit am kostengünstigsten ist.

4.2 HÄFELE et al. (1981)

Die über einen Zeitraum von 7 Jahren am IIASA* entwickelten Energieszenarien (ein hohes und ein niedrigeres) gelten allgemein als die detaillierteste und umfassendste Abschätzung der Weltenergiesituation. Das ursprüngliche Ziel war, mindestens 4 Hauptmodelle, nämlich MEDEE-2 (zuständig für die

* IIASA = Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse in Laxenburg bei Wien.

Abschätzung des Energieverbrauchs), MESSAGE (ein Optimierungs (LP)-Modell, das die Versorgungsmöglichkeiten für den von MEDEE errechneten Energieverbrauch erfaßt), IMPACT (ein ökonomisches Modell, das die Erfordernisse an Kapital, Arbeitskraft, Land, Wasser, Material etc. berechnet) und MACRO (vorgesehen zur Berechnung der Investitions- und Verbrauchsdaten) durch ein Rückkopplungssystem miteinander zu vernetzen. Das den Szenarien zugrundeliegende Modellgebäude und damit die Ergebnisse wurden in jüngster Zeit schwerwiegender Kritik ausgesetzt (KEEPIN u. WYNNE 1984; KEEPIN 1984; WYNNE 1984; SCHUSTER 1985). Bei genauerer Analyse hat sich nämlich gezeigt, daß MACRO weggelassen wurde, daß IMPACT nicht funktionierte, daß MESSAGE, das Herzstück der Energiestudie extrem anfällig auf geringfügige Änderungen des Inputs reagiert (s. auch Abschnitt 2.6), und daß in dem verbliebenen Rumpfmmodellgebäude praktisch keine dynamischen Berechnungen stattgefunden haben, so daß der Modell-Output mit dem subjektiv vorgegebenen Input identisch ist. Das soll im Folgenden anhand einiger Beispiele demonstriert werden.

KEEPIN (1984) hat bei der Untersuchung der dynamischen Rolle der Modelle und deren Wirkung auf die IIASA-Szenarien festgestellt, daß die von ihm aus Input-Annahmen hergeleiteten vereinfachten Szenarien, die er als Szenariette bezeichnet, mit den Szenarien aus den IIASA-Modellen identisch sind. Das Kriterium für die Auswahl von Energieträgern ist Kostenminimierung, d.h. es kommt die billigste Energieressource zum Einsatz und diese wird so lange genutzt, bis sie entweder erschöpft ist oder von einer billigeren verdrängt wird. Für das Szenariette werden weder Gleichungen gelöst, noch Iterationen durchgeführt, und es wird auch keine Dynamik simuliert. Das Ergebnis ist eine Serie von zeitabhängigen Kurven. Abbildung 3 zeigt einen Vergleich von Szenariette (durchgezogene Linien) und hohem IIASA-Szenario (Symbole) für die zukünftige Stromerzeugung in Region III (Westeuropa, Japan, Australien und Neuseeland, Israel, Südafrika). Das überraschende Ergebnis zeigt eine fast exakte Übereinstimmung, was umso erstaunlicher ist, da die Grobabschätzungen des Szenariette z.B. Preiselastizitäten, Konsistenz und enge Verknüpfungen der einzelnen Energiesektoren ignorieren. Bestenfalls wären also nur ganz grobe qualitative Übereinstimmungen zu erwarten gewesen. Dieses Beispiel ist aber kein Zufall; denn ähnliche Übereinstimmungen ergeben sich auch für alle anderen Regionen und für unterschiedliche Energieträger nicht nur beim hohen, sondern auch beim niedrigen Szenario. Dies legt die Vermutung nahe, daß die dynamischen und analytischen Inhalte der Szenarien außerhalb der mathematischen Modelle spezifiziert werden. Daher ist es auch nicht verwunderlich, daß die exogen vorgeschriebenen Szenario-Ergebnisse eben diese Input-Annahmen fast exakt reproduzieren.

Wenn eine Analyse im Hinblick auf die vielen Unsicherheiten und impliziten Annahmen von Wert sein soll, dann muß sie robust sein. Robustheit läßt sich testen, indem eine Sensitivitätsanalyse der quantitativen Ergebnisse als Funktion der Änderungen in den Modelleingaben durchgeführt wird. Betrachten wir dazu in Abbildung 4 die Kostenentwicklung für Stromerzeugung, die, bis auf die Leichtwasserreaktoren (LWR), über die nächsten 50 Jahre konstant bleiben soll. Diese Annahme ist zwar höchst unwahrscheinlich, aber sie wäre

noch hinzunehmen, wenn sich der Modelloutput diesen Kostenannahmen gegenüber als insensitiv erwiese. Wie Abbildung 4 zeigt, werden plötzlich im Jahre 2005 die Stromkosten für den LWR um eine kleine Stufe angehoben. Das ergibt sich aus der willkürlichen Anhebung der Urankosten von \$ 66 auf \$ 110 pro kg U_3O_8 , was den aus LWR hergestellten Strom um \$ 10 pro kW_a von \$ 136 auf \$ 146 verteuert. Eine solch geringe Zunahme (rd. 7%) könnte man noch als unwichtig hinnehmen, wenn sie nicht die folgenden weitreichenden Auswirkungen hätte. Nach Abbildung 4 taucht plötzlich 5 Jahre vorher, also um das Jahr 2000, der Schnelle Brüter (SBR) mit einem Preis von \$ 143/kW_a auf. Durch das willkürliche Anheben des LWR-Preises um \$ 10 wird der SBR-Strompreis plötzlich um \$ 3 billiger, was als einzige Rechtfertigung dient, ihn an

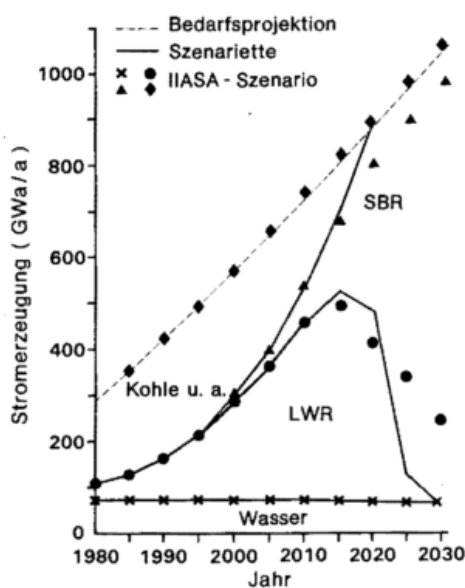


Abb. 3: Vergleich von Szenariette und Szenario (hohes IIASA-Szenario) für Stromerzeugung in Region III (Westeuropa, Japan, Australien und Neuseeland, Israel, Südafrika) (Nach KEEPIN 1984)

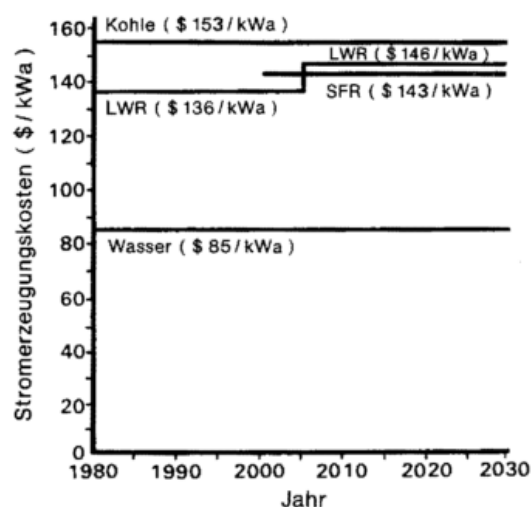


Abb. 4: Angenommene Kostenentwicklung für Stromerzeugung (konstante 1975 US \$) für das hohe IIASA-Szenario in Region III (Nach KEEPIN u. WYNNE 1984)

der Stromversorgung zu beteiligen. Dieser willkürlich herbeigeführte Kostenvorteil des SBR von 2% gegenüber dem LWR, der in 20 Jahren eintreten soll, entspricht bei den im Überfluß vorhandenen Uranvorkommen keineswegs realistischen Erwartungen, sondern spiegelt eher die Vorliebe der Modellentwickler für den SBR wider.

Abbildung 5a und b zeigt, wie sensitiv die IIASA-Szenarien auf diese relativ geringen Kostenänderungen für die Stromerzeugung in Region I (USA und Kanada) reagieren. Im ursprünglichen IIASA-Szenario (Abb. 5a) betrug der Kohleanteil im Jahre 2030 nur 8%, der Atomenergieanteil aber rd. 77%. Wenn wir, um die Sensitivität zu testen, den Preis für Atomenergie über die nächsten 50 Jahre um 16% erhöhen (was bei den eskalierenden Baukosten und den anfallenden Kosten für Zwischen- und Endlagerung, strikteren Sicherheitsvorkehrungen und Einmottung ausrangierter Atomkraftwerke etc. eher eine sehr konservative Annahme darstellt), und die Menge der zu fördernden Kohle entsprechend erhöhen, dann erhalten wir ein vollkommen anderes Szenario. In dem neuen Szenario (Abb. 5b) stammt nun die Stromerzeugung zu einem großen Teil aus der Kohleverfeuerung (ca. 85%), die LWR scheiden über die nächsten 50 Jahre vollständig aus, und die SBR werden gar nicht erst eingeführt. Diese

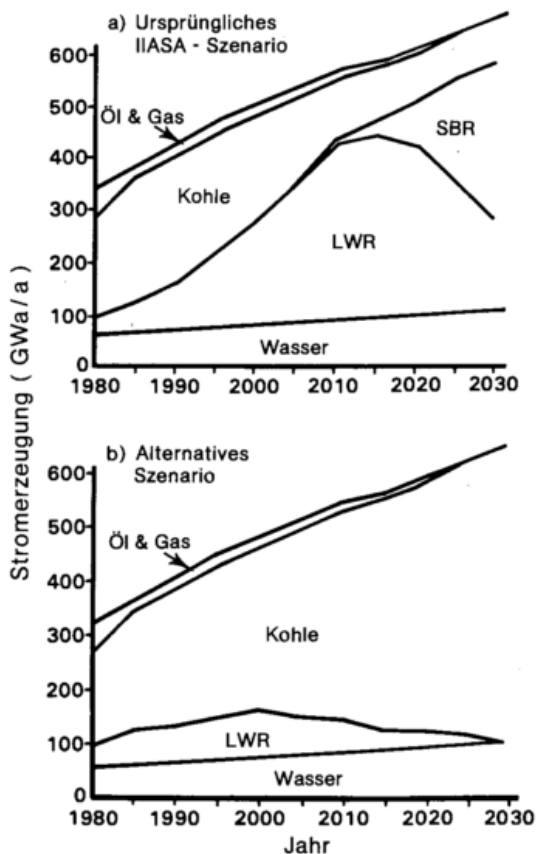


Abb. 5: Sensitivität gegenüber Kostenannahmen im niedrigen IIASA-Szenario für Region I (USA und Kanada). a) ursprüngliche Szenario-Ergebnisse für Stromerzeugung; b) alternative Szenario-Ergebnisse unter der Annahme, daß die Atomenergiekosten um 16% steigen und daß die Beschränkungen für Kohleförderung ab 2025 gelockert werden (Nach KEEPIN u. WYNNE 1984)

wenigen Beispiele zeigen, wie durch kleine Manipulationen jede von den Szenarien-Entwicklern gewünschte Energiezukunft geschaffen werden kann. So würde der für 2030 postulierte Atomenergiebeitrag von 5—8 TWa/a bedeuten, daß über die nächsten 50 Jahre alle 4—6 Tage irgendwo auf der Welt ein Atomkraftwerk von der Biblisgröße (ca. 1000 MW) gebaut werden müßte.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die IIASA-Szenarien höchst anfällig auf willkürlich vorgegebene Eingabedaten reagieren, die bekanntlich auf großen Unsicherheiten beruhen. Sie sind fast exakte Kopien exogener Annahmen ohne analytischen Wert. Sie spiegeln ein vorgefaßtes Meinungsbild wider und beruhen nicht auf einer objektiven wissenschaftlichen Analyse. Sie sind deshalb ungeeignet für die Ableitung plausibler Energiebedarfsstrategien.

4.3 NORDHAUS und YOHE (1983)

Die hier entwickelten zukünftigen Energiepfade wurden im Rahmen einer von der US Akademie der Wissenschaften durchgeführten Klimastudie erarbeitet. Das benutzte Modell wurde speziell für die Abschätzung der CO₂-Emissionen über die nächsten 125 Jahre entwickelt. Ein Hauptaugenmerk liegt auf der systematischen Behandlung von Unsicherheiten. Weitere Vorteile dieses Modells liegen in seiner ausgeprägten theoretischen Grundlage, der Benutzerfreundlichkeit und der expliziten Behandlung der Energie-Wirtschafts- und CO₂-Interaktionen. Die Hauptnachteile beruhen auf dem Mangel an regionalem Detail (nur eine Weltregion wird betrachtet) und der groben Unterscheidung der Energieträger (fossil und nichtfossil).

Das Modell benutzt eine generalisierte Cobb-Douglas-Produktionsfunktion von der Form

$$X = AL^dE^{1-d}, \quad (2)$$

wobei alle Parameter eine Funktion der Zeit sind. Hier ist X das globale Bruttosozialprodukt (BSP), A die Arbeitsproduktivität, L die Bevölkerungszahl, (1-d) der Anteil des BSP, der für Energie ausgegeben wird, und E die Gesamtenergie, die wie folgt definiert wird:

$$E(t) = [bE_f(t)^r + (1-b)E_n(t)^r]^{1/(r-1)}, \quad (3)$$

wobei E_f und E_n der fossile und nichtfossile Energieverbrauch sind. Der Parameter b spiegelt den relativen Verbrauch von E_f und E_n zum Zeitpunkt t = 0 wider. Die Elastizität oder die relative Flexibilität, mit der E_f und E_n gegeneinander austauschbar sind, lautet dann

$$s = \frac{1}{r-1} = \frac{d \ln[E_f(t)/E_n(t)]}{d \ln[P_f(t)/P_n(t)]} \quad (4)$$

mit P_f und P_n Preise für fossile und nichtfossile Brennstoffe. Beide Preise hängen vom technologischen Wandel ab und P_f wird zusätzlich noch von der Ressourcenbegrenzung beeinflusst.

Die Kohlenstoffemissionen C(t) (in Gt/a) werden aus

$$C(t) = [z_0 e^{z(t)}] [E^c(t)] \quad (5)$$

berechnet; hier ist z₀ der Emissionsfaktor, der vom Verhältnis von Kohlenstoffemissionen zum fossilen Brennstoffverbrauch im Jahre 1975 abhängt, z(t) die Wachstumsrate des Emis-

sionsfaktors und $E^c(t)$ der Verbrauch fossiler Brennstoffe zum Zeitpunkt t . Die Ergebnisse werden in Form von Quantilen (5. bis 95.) angegeben (Abb. 6).

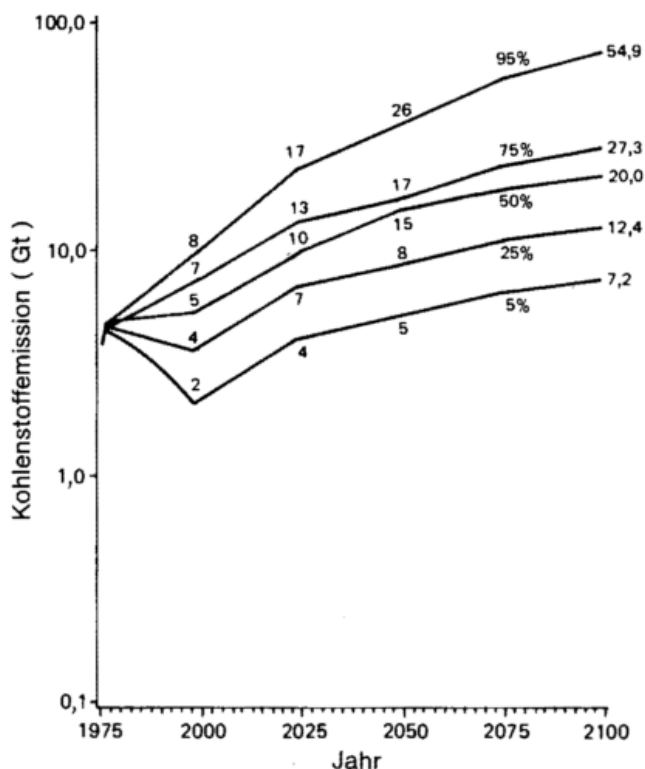


Abb. 6: CO₂-Emissionsverteilungen in GtC (dargestellt für verschiedene Quantile) aus einer Stichprobe von 100 zufällig ausgewählten Simulationen.
(Nach NORDHAUS u. YOHE 1983)

Zur systematischen Untersuchung des Einflusses der Unsicherheit von Parametern auf die Modellsensitivität im Gesamtsystem werden 10 Variable ausgewählt, die möglicherweise einen großen Einfluß ausüben. Jeder Variablen wird ein hoher, mittlerer und niedriger Wert zugeordnet, um die historischen Unsicherheiten bzw. die Streuung der Angaben in der veröffentlichten Literatur mitzubetrachten. Das ergibt 3¹⁰ oder 59049 mögliche unterschiedliche Szenarien. Die Darstellung geschieht in Form von Zufallsergebnissen, die aus 100 verschiedenen Fällen ausgewählt werden (s. z. B. Abb. 6). Das Verfahren wird probabilistische Szenarienanalyse genannt. Die Ergebnisse dieser Unsicherheitsanalyse sind in Tabelle 1 nach ihrer Wichtigkeit aufgelistet. Es ist überraschend, daß die Austauschbarkeit zwischen fossilen und nichtfossilen Brennstoffen den sensitivsten Parameter darstellt, was bis dahin noch nicht beobachtet worden ist. Man hätte vielleicht bei der Sensitivität der CO₂-Konzentration doch einen größeren Einfluß von Parametern wie die unterschiedlichen fossilen Brennstoffanteile oder die fossile Ressourcenbasis auf die Unsicherheit erwartet. Die hier untersuchten Unsicherheiten sind vom parametrischen Typ (s. 2.4), wobei die Grundstruktur des Modells unverändert bleibt. Es sind aber gerade die Modellstruktur und die Gleichungen, die die Sensitivitätsanordnung der parametrischen Unsicherheiten bestimmen. Daraus folgt, daß die Rangordnung nur dann richtig sein kann, wenn

auch die analytische Struktur des Modells die Wirklichkeit widerspiegelt und wenn die subjektive Parameterauswahl wirklichkeitsgetreu ist. Auf den letzten Punkt wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Tab. 1: Rangordnung der Unsicherheiten einzelner Variablen und deren Einfluß auf die Sensitivität der atmosphärischen CO₂-Konzentration im Jahre 2100 (100 = die Variable mit dem größten Effekt^{a)}) (nach NORDHAUS und YOHE 1983)

Variable	Marginale Varianz der Gesamtstichprobe ^{b)}	Marginale Varianz vom wahrscheinlichsten Ergebnis ^{c)}
1 Substituierbarkeit von fossilen durch nichtfossile Brennstoffe	100	100
2 Allgemeines Produktivitätswachstum	76	79
3 Substituierbarkeit von Energie durch Arbeitskraft	56	70
4 Förderkosten für fossile Brennstoffe	50	56
5 Trends in den realen Kosten für die Energieerzeugung	48	73
6 Anteil der in der Atmosphäre verbleibenden CO ₂ -Emission	44	62
7 Zusammensetzung des fossilen Brennstoffangebots	31	24
8 Bevölkerungswachstum	22	36
9 Trends in den relativen Kosten für fossile und nichtfossile Brennstoffe	(3) ^{d)}	21
10 Gesamtressourcen an fossilen Brennstoffen	(50) ^{d)}	5

a) Der Sensitivitätswert ist auf 100 bezogen für die Variable mit der höchsten marginalen Varianz.

b) Die marginale Varianz der gesamten Stichprobe ist gleich der Varianz in der Ausgangssituation (d.h. alle Variablen ändern sich über den gesamten Unsicherheitsbereich) minus der Varianz mit der nach ihrem wahrscheinlichsten Wert aufgelisteten Variablen (aber alle anderen 9 Variablen ändern sich entsprechend ihrem gesamten Unsicherheitsbereich). Beachte, daß keine erneute Stichprobe gemacht wird.

c) Die marginale Varianz vom wahrscheinlichsten Ergebnis wird als die Varianz berechnet, bei der die aufgelistete Variable ihren vollen Unsicherheitsbereich annimmt und alle anderen 9 Variablen gleich ihrem wahrscheinlichsten Wert gesetzt werden.

d) Die Klammern bedeuten, daß die marginale Varianz negativ ist.

4.4 EDMONDS, REILLY, TRABALKA und REICHLÉ (1984)

Hier handelt es sich um ein Energiemodell, das insbesondere zur Untersuchung langfristiger alternativer Energiestrategien und deren Auswirkungen auf zukünftige CO₂-Emissionen für das US Energieministerium entwickelt worden ist. Es zieht vier Bereiche in Betracht, nämlich Energieverbrauch, Energiebedarf, globalen Energieausgleich und CO₂-Emissionen. Die beiden ersten Modelle bestimmen den Verbrauch und den Bedarf für jede der 6 Primärenergiekategorien (Öl, Gas, feste Brennstoffe, ressourcenbegrenzte Erneuerbare, Sonnen- und Kernenergie) in jeder der 9 Regionen. Das Energiemodell stellt das globale Gleichgewicht für jeden globalen Energiemarkt her. Drei zukünftige fossile Brennstoffsznarien A, B und C werden betrachtet. Das Modell hat bisher in der Energieszenarienanalyse und insbesondere bei der Abschätzung zukünftiger CO₂-Emissionen weite Anwendung gefunden (s. z. B. Tab. 7).

Sensitivitätsanalyse kann zum einen mithelfen, die Forschungsschwerpunkte zur Reduzierung der Unsicherheitsmarge bei der Projektion von CO₂-Emissionen zu setzen, und zum anderen kann sie dazu dienen, diejenigen Parameter zu identifizieren, die den größten Einfluß auf den Modelloutput ha-

ben. Daher wurden 25 Variable ausgewählt, von denen jede systematisch um einen kleinen Betrag vom jeweiligen Basiswert in jedem der drei Szenarien abgeändert wurde. Daraus wurde dann eine Elastizität durch Berechnung des Verhältnisses von Prozentänderung in der abhängigen Variablen (entweder Primärenergieverbrauch oder CO₂-Emissionen) zur Prozentänderung in der unabhängigen Variablen abgeleitet. Die Elastizität ist dann ein dimensionsloses Maß der Modellsensitivität für den jeweiligen Parameter. Elastizitäten für unterschiedliche Variable sind auf diese Weise miteinander vergleichbar und können deshalb zur Aufstellung einer Rangordnung in Abhängigkeit von ihrem Einfluß auf den Energieverbrauch oder die CO₂-Emission herangezogen werden.

Tabelle 2 zeigt, zum Beispiel, daß nur 6 von den untersuchten 25 Variablen eine CO₂-Elastizität von 0,5 oder größer (in absoluten Zahlen) in einem der drei Szenarien in 2075 haben. Keine Variable hat eine Elastizität > 0,5 in allen Szenarien. Darüber hinaus ändert sich die Wichtigkeit einer Variablen mit dem Szenario und dem Zeitpunkt. Trotz allem sieht es aber so aus, als ob die Einkommenselastizität des Energiebedarfs und die Verbesserung der Energieeffizienz am stärksten die CO₂-Emissionsprojektionen beeinflussen. Es ist interessant festzustellen, daß im NORDHAUS und YOHE-Modell (Abschn. 4.3, Tab. 1) die Substituierbarkeit von Brennstoffen von größter Wichtigkeit ist, aber bei EDMONDS et al. nur eine ganz untergeordnete Rolle spielt, und daß die beiden einflußreichsten Variablen (Einkommenselastizität, Effizienzverbesserung) der EDMONDS et al.-Studie in der NORDHAUS und YOHE-Analyse nicht einmal berücksichtigt werden. Das wirft natürlich die sehr wichtige Frage nach der objektiven Parameterauswahl und den modellspezifischen Eigenschaften auf.

Tab. 2: Sensitivitätsrangfolge der Input-Output Elastizitäten für die CO₂-Emissionen im Jahre 2075 (nach EDMONDS et al. 1984)

Unabhängige Variable	Szenarien		
	A	B	C
1 Einkommenselastizität für Energiebedarf	1,1	0,8	0,4
2 Verbesserung der Energieeffizienz	-0,5	-0,3	-0,2
3 Bruttosozialprodukt	0,5	0,2	0,2
4 Verbrauch von Kohle	0,5	0,3	0,8
5 Verbrauch von unkonventionellem Erdöl ^{a)}	0,1	0,5	0,0
6 Marktpreis für unkonventionelles Erdöl	-1,0	-0,2	0,0

a) z.B. aus Teersanden und Ölschiefern

5 Energieszenarien: Unkonventionelles Vorgehen

5.1 Allgemeines

Im Gegensatz zum konventionellen verbrauchs-orientierten Vorgehen (s. 4.1), geht es beim unkonventionellen bedarfsorientierten Vorgehen darum, welche Energiequellen sich am

besten für eine bestimmte Aufgabe eignen und wie man für eine gewünschte Energiedienstleistung (wie z.B. ein warmes Zimmer oder die Autofahrt zur Arbeit) die dafür kostengünstigste Energiequelle bereitstellen kann. Das Hauptanliegen dieses unkonventionellen Vorgehens ist also die Verbesserung der Energieeffizienz und damit die Herabsetzung der Energiekosten. Wenn wir die Energieproduktivität in Gleichung (1) wie folgt umschreiben, dann werden die Effizienzverbesserungen durch technische und strukturelle Änderungen sichtbar:

$$E/BSP = (E/ES) \cdot (ES/BSP). \quad (6)$$

Hier ist E/ES die Primärenergie, die zur Herstellung einer Dienstleistungseinheit benötigt wird (d.h. eine bessere Nutzungstechnik, z.B. Wärme aus dem Heizkörper oder die Antriebskraft in der Motorwelle), und ES/BSP ist der Energiedienstleistungsbedarf pro Einheit Bruttosozialprodukt (d.h. Strukturwandel, z.B. von energieintensiven Sektoren (Stahlindustrie) zu weniger energieintensiven, dafür aber forschungs- und entwicklungsintensiven Branchen (z.B. Mikroelektronik)).

5.2 LOVINS, LOVINS, KRAUSE, BACH (1981/1983)

Dieses im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelte Effizienz-Szenario geht von einer Doppelstrategie aus: Durch die Steigerung der Energieproduktivität wird ein verminderter Energieeinsatz erreicht und der dadurch stark geschrumpfte Bedarf an Brennstoffen kann dann relativ schnell durch sich erneuernde und umweltschonende Energieträger ersetzt werden.

Diese Vorgehensweise wird exemplarisch auf die energiewirtschaftliche Situation der Bundesrepublik Deutschland des Jahres 1973 angewandt, also noch vor der ersten Energiekrise, um die danach eingetretenen Energieeinspareffekte nicht doppelt zu zählen. Es wird davon ausgegangen, daß diejenigen Energieformen zur Anwendung kommen, die für den verlangten Preis die größte Energiedienstleistung liefern. Es wird anhand von ca. 120 verschiedenen Maßnahmen zur Effizienzverbesserung in 15 Verbrauchssektoren untersucht, um wieviel die spezifische Energieintensität (E/ES in Gl. (6)) bis zum Jahre 2030 realistisch gesenkt werden kann, wenn das jetzt schon vorhandene Potential wirtschaftlicher und energieeffizienter Technologien die weniger konkurrenzfähigen Technologien im Lauf der nächsten 50 Jahre ersetzt. Änderungen des Energiedienstleistungsbedarfs durch Strukturwandel (ES/BSP in Gl. (6)) werden ebenfalls in Betracht gezogen. Es handelt sich beim Effizienz-Szenario also nicht um eine Abschätzung des unbekannteren zukünftigen Energiebedarfs (im Sinne des herkömmlichen „energy forecasting“), sondern vielmehr um die Erfassung des heute schon vorhandenen Energieeinsparpotentials (in der Fachsprache auch unter dem Terminus „energy backcasting“ bekannt).

Die durch die deutsche Detailstudie gewonnenen Einsichten werden unter Berücksichtigung internationaler Analysen auf die Hauptregionen der Welt übertragen. Tabelle 3 zeigt die so gewonnenen Koeffizienten für die technischen und strukturellen Effizienzverbesserungen als Multiple und Bruchteile des auf 1975 bezogenen Basiswerts von 1,00. Das interessante und weitreichende Ergebnis ist, daß im Gegensatz zu vielen konventionellen Energieszenarien der zukünftige Weltenergiebedarf nicht weiter wächst, sondern vielmehr abnimmt, und

zwar gegenüber 1975 bis zum Jahre 2000 um 14% und bis zum Jahre 2030 um 37%. Sollte sich die Weltenergiewirtschaft durch Reduzierung der Energieverschwendung in dieser Art entwickeln, dann hätte das wichtige positive Auswirkungen nicht nur auf die Ressourcenverknappung sowie die nationale Wirtschafts- und internationale Handelsbilanz, sondern auch auf die Umweltbelastung und die Gefährdung des Klimas. Es gilt deshalb im Folgenden kurz darzulegen, ob die hier aufgezeigten Tendenzen einer zukünftigen effizienteren Energienutzung und damit einer Reduzierung des Bedarfs plausibel sind.

Tab. 3 Möglicher globaler Primärenergiebedarf bei effizienter Energienutzung, starken Wirtschaftswachstum und unverändertem Verdichtungsgrad (nach LOVINS et al. 1987/88)

Region	1		2		3		4		1x2x3x4	
	Primär- energie- verbrauch TWh 1975	BSP von 1975	BSP 2030	ES/BSP ¹⁾ von 1975	ES/BSP ¹⁾ 2030	E/ES ²⁾ von 1975	E/ES ²⁾ 2030	Primär- energie- bedarf TWh ³⁾	2000	2030
1. Nordamerika (USA und Kanada)	2,65	1,68	2,37	0,8	0,65	0,5	0,26	1,78	1,06	
2. UdSSR und O-Europa	1,84	2,57	4,98	0,8	0,65	0,5	0,26	1,89	1,55	
3. W-Europa, Japan, Austr., Neuseeland, S-Afrika, Israel	2,26	1,67	2,46	0,8	0,65	0,5	0,26	1,51	0,94	
Industrieländer	6,75	1,97	3,27	0,8	0,65	0,5	0,26	5,78	3,55	
Entwicklungsländer	1,46	2,35	4,92	1,1	0,90	0,5	0,26	1,89	1,68	
Welt	8,22	2,13	3,69					7,07	5,23	
Index	100							86	63	

1) ES/BSP = Energiedienstleistungsbedarf pro Einheit Bruttonationale Produkt (Strukturwandel, z.B. von energieintensiven Sektoren zu weniger energieintensiven, dafür aber forschungs- und entwicklungsintensiven Branchen)

2) E/ES = Primärenergie, die zur Herstellung einer Einheit Energiedienstleistung benötigt wird (bessere Nutzungstechnik, z.B. Wärme aus dem Heizkörper oder Antreibskraft in der Motorwelt)

3) Entspricht wegen Aufrundung nicht den genauen Einzelprodukten

5.3 Entwicklungen in der Verbesserung der Energieeffizienz

Das Beispiel der Primärenergieentwicklung (s. Abb. 1 für die Bundesrepublik Deutschland und stellvertretend für alle Industrienationen sowie Abb. 2 für die Welt) gab schon einen ganz deutlichen Hinweis auf die Abkehr von der bisherigen verschwenderischen Energienutzung. Nur an einem Beispiel soll das weiter verdeutlicht werden. Tabelle 4 zeigt die Entwicklung der strukturellen Energieeffizienz (der Faktor ES/BSP in Gl. (6) Abschn. 5.1) für eine Auswahl von Ländern und die Projektion bis zum Jahre 2000 durch die Internationale Energiebehörde. Zunächst fällt auf, daß die wirtschaftlich gesündesten Länder wie Japan und die Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1984 mit 0,50 bzw. 0,52 auch am energieeffizientesten wirtschafteten. Es zeigt aber auch, daß in allen anderen Ländern noch ein riesiges Potential zur Verbesserung der Energieeffizienz brachliegt. Ebenso wichtig ist, daß über den Zeitraum 1973—84 die Energieverschwendung stark abgenommen hat (s. die hohen negativen Zahlen), und zwar im Durchschnitt um 19% für alle OECD-Länder. Bis zum Jahre 2000 wird bis auf Griechenland und die Türkei für alle anderen OECD-Länder eine durchschnittliche Effizienzverbesserung von 20% für möglich gehalten. Gerade die ärmsten Länder in Europa und in der Dritten Welt werden schon aus finanziellen Gründen ihren Energieverbrauch drosseln müssen; denn je wirtschaftlich schwächer ein Land ist, umso energiebewußter muß es wirtschaften. Die Erhöhung der Energieeffizienz in den Drittländern durch geeigneten Technologietransfer ist ein wichtiger Beitrag zur Gesundung der dortigen Wirtschaft und zur Herabsetzung der Umweltzerstörung.

Inzwischen gibt es mehr als drei Dutzend detaillierte Energiestudien (z. B. KRAUSE et al. 1980; OLIVIER et al. 1983; ROBINSON et al. 1985), deren Ergebnisse aufgrund der besseren Energienutzung einen stark reduzierten Energieverbrauch aufzeigen. Als weitere Methode zur Energieplanung wird die Delphi-Methode, eine Expertenbefragung zur Abschätzung der Energiesituation, angewandt. Die jüngste von der IIASA und der Stanford University durchgeführte Befragung von 328 Expertengruppen ergab: „Sowohl in den Ländern mit Plan- als auch mit freier Marktwirtschaft stellt die Energieein-

Tab. 4: Entwicklung der Verbesserung der Energieeffizienz in ausgewählten Ländern (nach FLAVIN 1985 - extrahiert aus International Energy Agency, Energy Policies and Programmes of IEA Countries, 1984 Review)

Land	Energie pro Bruttonationale Produkt ¹⁾				Änderung	
	1973	1979	1984	Projektion 2000	1973 bis 1984 (%)	1984 bis 2000 (%)
Australien	0,68	0,73	0,70	0,63	+ 3	-10
B. Deutschland	0,64	0,59	0,52	0,34	-19	-35
England	0,93	0,85	0,73	0,66	-22	-10
Griechenland	0,59	0,63	0,64	0,77	+ 8	+20
Italien	0,69	0,64	0,57	0,53	-17	- 7
Japan	0,70	0,61	0,50	0,38	-29	-24
Kanada	1,14	1,16	1,09	1,02	- 4	- 7
Schweden	0,69	0,67	0,64	0,48	- 7	-25
Türkei	0,84	0,76	0,76	0,80	-10	+ 5
USA	1,14	1,05	0,90	0,72	-21	-20
Alle OECD-Länder	0,90	0,84	0,73	0,59	-19	-20

1) Die Zahlen sind standardisiert und zeigen den gesamten Primärenergieverbrauch pro US \$ 1000 Bruttonationale Produkt in 1975er Preisen.

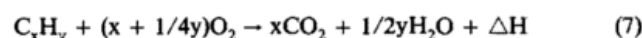
sparung die größte zusätzliche Quelle zur Energieversorgung bis zum Jahre 2000 dar. Dies war einst eine ketzerische Vorstellung, sie ist aber heute offensichtlich die vorherrschende Meinung“ (MANNE u. SCHRATTENHOLZER 1985). Im Lichte der hier nur skizzenhaft darstellbaren Effizienzverbesserungen scheinen die in 5.2 abgeleiteten Reduzierungen im Energiebedarf nicht nur plausibel, sondern eher noch zu konservativ zu sein.

6 Erfassung der CO₂-Emissionsentwicklung in der Vergangenheit

Bevor wir im folgenden Abschnitt einen Blick in die Zukunft wagen, schauen wir uns zuvor die bisherige Entwicklung der CO₂-Emissionen an.

6.1 Berechnung der CO₂-Emissionen

Die jährlichen UN Energieproduktionsdaten bilden die Grundlage für die Berechnung der CO₂-Emissionen seit 1860. Wie folgende Formel zeigt, ist CO₂ ein Abfallprodukt bei der Verfeuerung fossiler Brennstoffe (MARLAND u. ROTTY 1984):



wobei ΔH die Reaktionsenergie und C_xH_y den generalisierten Kohlenwasserstoff-Brennstoff bedeuten.

Die Berechnung der CO₂-Emissionen ist konzeptionell einfach. Für jede Brennstoffgruppe (gasförmige, flüssige und fe-

ste Brennstoffe) wird die jährliche Brennstoffproduktion (P) berechnet und mit einer Abschätzung des Brennstoffanteils, der oxidiert (FO), sowie einer Abschätzung des durchschnittlichen Kohlenstoffgehalts in jeder Brennstoffgruppe (C) multipliziert:

$$CO_{2i} = (P_i)(FO_i)(C_i); \quad (8)$$

hier bedeutet der Index i eine spezielle Brennstoffgruppe und CO₂ wird als Kohlenstoffmasse angegeben.

Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die zur Berechnung der CO₂-Emissionen herangezogenen Faktoren.

Tab. 5: Faktoren zur Berechnung der jährlichen CO₂-Emissionen aus den globalen Brennstoffproduktionsdaten* (CO_{2i} = (P_i)(FO_i)(C_i)) (nach MARLAND und ROTTY 1984)

Aus der Erdgasproduktion

- CO_{2g}: CO₂-Emissionen in 10⁶ tC
- P_g: jährliche Produktion in 10¹⁵ J (± ≈ 10 %)
- FO_g: oxidiertes Anteil im Produktionsjahr = 0,98 ± 1 %
- C_g: Kohlenstoffgehalt in 10⁶ t pro 10¹⁵ J = 0,0137 ± 2 %

Aus der Rohöl- und Flüssiggasproduktion

- CO_{2l}: CO₂-Emissionen in 10⁶ tC
- P_l: jährliche Produktion in 10⁶ t (± ≈ 8 %)
- FO_l: oxidiertes Anteil im Produktionsjahr = 0,918 ± 3 %
- C_l: Kohlenstoffgehalt in tC pro t Rohöl = 0,85 ± 1 %

Aus der Kohleproduktion

- CO_{2s}: CO₂-Emissionen in 10⁶ tC
- P_s: jährliche Produktion in 10⁶ t SKE (± ≈ 11,2 %)
- FO_s: oxidiertes Anteil im Produktionsjahr = 0,982 ± 2 %
- C_s: Kohlenstoffgehalt in tC pro t SKE = 0,746 ± 2 %

Aus Abfackeln

- CO_{2f}: CO₂-Emissionen in 10⁶ tC
- P_f: jährliches Abfackeln in 10⁹ m³ (± ≈ 20 %)
- FO_f: oxidiertes Anteil im Jahr des Abfackelns = 1,00 ± 1 %
- C_f: Kohlenstoffgehalt in t pro 1000 m³ = 0,525 ± 3 %

* Die Einheiten stimmen mit den von der UN (1983) zusammengestellten Brennstoffproduktionsdaten überein. Alle Massen sind in Tonnen.

Tab. 6: Unsicherheiten bei der Berechnung von CO₂-Emissionen (%) (nach MARLAND und ROTTY 1984)

Brennstoffe	E ₁ Brennstoff- produktion (P)	E ₂ Brennstoff- Anteil, der oxidiert (FO)	E ₃ Kohlen- stoff- gehalt (C)	Emissionen* √(E ₁ E ₂ E ₃) ²	Gewichtete Emissionen** f _i √(E ₁ E ₂ E ₃) ²
gasförmig	10	1	2	10,3	1,5
flüssig	8	3	1	8,6	4,0
fest	11,2	2	2	11,6	4,3
Abfackeln	20	1	3	20,3	0,4

Gesamtunsicherheit: a) Wenn die Unsicherheiten für die einzelnen Brennstoffe voneinander unabhängig sind $[\sum(f_i \sqrt{E_i E_j})^2]^{1/2} = 6,1$
 b) Wenn die Unsicherheiten für die einzelnen Brennstoffe nicht unabhängig sind $\sum f_i \sqrt{E_i E_j} = 10,2$

* E₁ ist die Unsicherheit in den Faktoren P, FO und C für eine gegebene Brennstoffart i.

** Gewichtet mit dem 1980er Wichtungsfaktor f_i = 1980er Emissionen der i-ten Brennstoffart geteilt durch die gesamten 1980er Emissionen.

6.2 Abschätzung der Unsicherheiten

Die Unsicherheit im Produkt der drei Terme in Gleichung (8) ergibt sich aus der Quadratwurzel der Summe der Quadrate der Abweichungen in jedem einzelnen Term. Wären die Daten für jeden Brennstofftyp vollkommen unabhängig voneinander, dann wäre dieses Vorgehen gerechtfertigt und die berechnete Unsicherheit wäre 6,1%. Nehmen wir dagegen an, daß die Unsicherheiten für die einzelnen Brennstoffe nicht unabhängig voneinander sind, dann erhalten wir eine kumulative Unsicherheit der Ergebnisse von 10,2%. Tabelle 6 faßt das Vorgehen zusammen.

6.3 CO₂-Emissionen nach Brennstoffen

Abbildung 7 zeigt die jährlichen C-Emissionen durch Verfeuerung fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas), Abfackeln und Zementherstellung von 1860—1983. Durch die Energiekrise von 1973/74 wurde über die vergangene Dekade das rasante Wachstum des Verbrauchs von Erdöl von 7,1%/a auf 0,04%/a und dasjenige von Erdgas von 8,1%/a auf 3,3%/a abgebremst. Nur der Beitrag der Kohle zeigte während dieser Zeit eine leichte Zunahme von 1,7%/a auf 2,6%/a. Es sieht so aus, als ob der Anteil der Kohle an der C-Emission, der 1968 von dem des Ölverbrauchs übertroffen wurde, bei anhaltendem Trend im Laufe der 80er Jahre wieder die Spitze übernehmen wird. Die Wachstumsrate des gesamten C-Ausstoßes ist vom langjährigen Mittelwert von 3,4%/a (1860—1980) auf 1,5%/a (1974—1983) geschrumpft. Dieser willkommene Trend wird von einigen zum Vorwand genommen, das CO₂-Klimaproblem wieder zum verdrängen, da seine Auswirkungen erst in fernerer Zukunft akut zu werden scheinen. Dabei werden aber Abholzung in den Tropen und Waldsterben in mittleren Breiten sowie die immer wichtiger werdenden Effekte der anderen Treibhausgase außer acht gelassen.

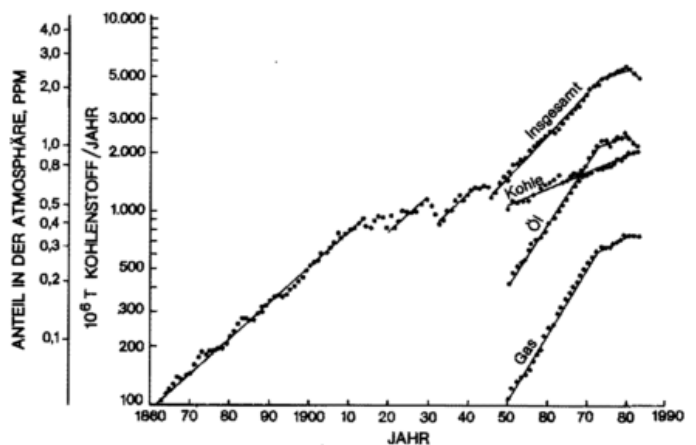


Abb. 7: Globale CO₂-Emissionen nach Brennstoffarten, 1860 bis 1983 (Nach MARLAND und ROTTY 1984 und auf den neuesten Stand gebracht)

6.4 CO₂-Emissionen nach Regionen

Abbildung 8 zeigt nach der Energiekrise von 1973/74 eine deutliche Abnahme der Wachstumsrate der CO₂-Emission für Nordamerika, Westeuropa, Japan und Australien sowie für

die Welt insgesamt. Die Länder mit Planwirtschaft lassen diesen scharfen Einschnitt nicht erkennen. Bei ihnen zeigt sich jedoch über die gesamte Periode zwar eine positive, aber doch ständig abnehmende Wachstumsrate. Der Kurvenverlauf für die Volksrepublik China zeigt auffällige Diskontinuitäten, die mit dem „großen Sprung nach vorn“ bzw. der „Kulturrevolution“ in Zusammenhang gebracht werden. Die Energiekrise scheint die relativ hohe Wachstumsrate der Entwicklungsländer insgesamt wenig beeinflusst zu haben, was sicher auch an den sehr niedrigen Verbrauchsmengen gelegen haben mag. In Anbetracht der sehr hohen Außenhandelsdefizite der Entwicklungsländer ist der Fortbestand einer sehr hohen Wachstumsrate in Zukunft eher unwahrscheinlich.

7 Abschätzung der CO₂-Emissionsentwicklung in der Zukunft

Die Energieentwicklung in Abbildung 1 und Abbildung 2 deutet ein Einpendeln der Verbrauchswerte auf das gegenwärtige Niveau an. Die CO₂-Emissionsentwicklung in Abbildung 7 und Abbildung 8 läßt seit der Energiekrise von 1973/74 eine um mehr als die Hälfte verringerte Wachstumsrate erkennen. Tabelle 7 zeigt eine Übersicht der mit Hilfe von Energieszenarien erhaltenen Abschätzungen für zukünftige CO₂-Emissionen. Die Margen spiegeln die betrachteten unterschiedlichen Szenarien bzw. Sensitivitätsläufe wider. Alle konventionellen

Szenarien zeigen über die jeweiligen betrachteten Zeiträume eine stark zunehmende jährliche CO₂-Emission. So nimmt z. B. im hohen Szenario von EDMONDS et al. über die nächsten 100 Jahre die jährliche CO₂-Emission um das rund 20fache zu. Dagegen erhalten die unkonventionellen Szenarien, die die vorhandenen bzw. möglichen Effizienzpotentiale in Betracht ziehen, wie z. B. das Effizienzzenario von LOVINS et al. und das niedrige Szenario von ROSE et al., für die Zukunft einen abnehmenden CO₂-Ausstoß. Interessant sind die sich stark unterscheidenden CO₂-Emissionsabschätzungen von EDMONDS et al., SEIDEL und KEYES, ROSE et al. und REISTER, die alle mit dem Modell von EDMONDS et al. durchgeführt worden sind. Das zeigt deutlich, daß nicht nur die unterschiedlichen Modelle, sondern auch die jeweiligen Vorstellungen der Forscher und eine Reihe von anderen äußeren Faktoren den Output mitbestimmen.

Tab. 7: Mögliche zukünftige Entwicklung der CO₂-Emissionen (GtC/a) extrahiert aus einer Auswahl unterschiedlicher Energieszenarien (Basiswert 4,7 GtC/a in 1975)

Szenarien	2000	2025	2030	2050	2075
EC (Colombo/Bernardini, 1979)	6,6		7,1		
ITASA (Hafele et al., 1981)	7,4-9,2		10,0-16,7		
UBA (Lovins et al., 1981/83)	3,2		0,6		
NAS (Nordhaus/Yohe, 1983)	2-8	4-17		5-26	
IEA (Edmonds et al., 1984)	6,2-8,4	6,7-19,0		6,8-47,4	6,8-91,1
IEA (Reister, 1984)	5,7-8,8	7,7-16,5		9,9-28,7	12,7-44,4
EPA (Seidel/Keyes, 1983)	8	9-10		10-18	19-35
MIT (Rose et al., 1983)	3,2-7,3	3,1-10,3		2,8-15,1	

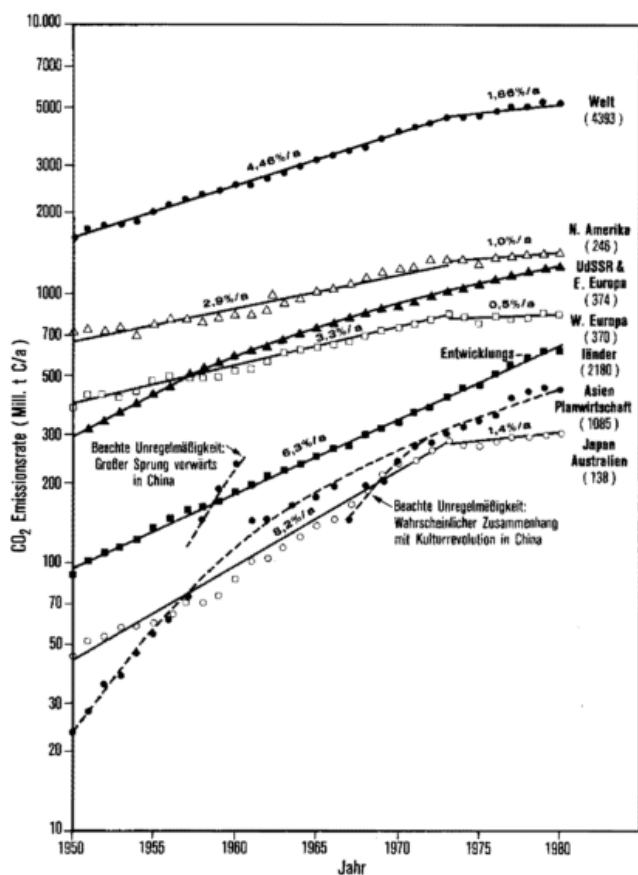


Abb. 8: CO₂-Emissionen nach Regionen, 1950—1980 (Nach ROTTY et al. 1984)

8 Abschließende Bemerkungen und Ausblick

Wichtig ist zunächst die Feststellung, daß keines der Modell-ergebnisse als Vorhersage betrachtet werden soll. Die meisten Modelle können durch relativ geringe Änderungen in den Hauptinputdaten eine große Vielfalt an Ergebnissen generieren. Das zeigt, wie notwendig sorgfältig dokumentierte Sensitivitätsanalysen sind. Aber auch die subjektiven Interpretationen der Ergebnisse lassen eine Vielfalt von Schlußfolgerungen zu. Spricht diese Vielfalt gegen die Anwendung der Szenarienanalyse? Keineswegs, denn sie ist es gerade, die in der vielschichtig vernetzten Welt den Blick für die vielfältigen Optionen, innerhalb derer es vernünftige Entscheidungen zu treffen gilt, schärfen kann.

Ein Wort der Vorsicht ist bei der Untersuchung und Interpretation von sozioökonomischen Systemen angebracht. Hier besteht weithin die Neigung, eine zu starke Betonung auf die Quantifizierung der modellmäßigen Darstellung zu legen. Andererseits ist bekannt, daß viele wichtige soziale, politische und kulturelle Faktoren und ihre Wechselbeziehungen durch Gleichungen nicht wiedergegeben werden können, so daß sie in rein quantitativen Modellen einfach ausgelassen werden. Dadurch werden oft die wichtigsten dynamischen Prozesse und Interaktionen nicht erfaßt, was zu einer ungerechtfertigten Vereinfachung des komplexen Systems führt. Trotz vieler unbestrittener Verdienste kann quantitative Exaktheit Intuition und Klugheit bei der Interpretation sozio-ökonomischer Systeme nicht ersetzen.

Welche zusätzlichen quantitativen Vorgehensweisen bieten sich an, die helfen können, die Schwierigkeiten bei Systemen, deren Auswirkungen von der Vergangenheit über die Gegen-

wart in die Zukunft reichen, zu meistern? Um von den Schwierigkeiten des „forecasting“ loszukommen, haben LOVINS et al. (s. 5.2) die Methode des „backcasting“ angewandt, wobei durch Detailuntersuchungen aufgezeigt wird, wie ein erstrebenswertes Ziel (z. B. die effizientere Energienutzung und damit die Schonung von Ressourcen, Finanzen und Umwelt) erreicht werden kann. Diese Methode ist als normativ kritisiert worden. Aber man darf nicht übersehen, daß alle Methoden, auch die, die starkes quantitatives Wachstum propagieren, normativ sind. Eine andere Methode, die in EPA und MIT-Studien (s. Tab. 7) angewandt worden ist, untersucht mit Verfahren aus der Verhaltensforschung, wie z. B. das globale Energiesystem auf Ölembargos oder drastische Preiserhöhungen reagiert, und zwar ganz unabhängig davon, ob und wann diese Ereignisse eintreten. Schließlich sei noch eine aussichtsreiche Methode aus der ökologischen Forschung erwähnt, die explizit das mögliche Auftreten von unvorhergesehenen Ereignissen in Betracht zieht, mit dem Ziel der Vorsorge und damit der Herabsetzung der Vulnerabilität.

Literatur

- ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN, Essen (jedes Jahr).
- BACH, W.: Gefahr für unser Klima. Wege aus der CO₂-Bedrohung durch sinnvollen Energieeinsatz. Karlsruhe: C. F. Müller 1982 (Engl. Version 1984).
- EDMONDS, J. A.; REILLY, J.; TRABALKA, J. R.; REICHLER, D. E.: Analysis of possible future atmospheric retention of fossil fuel CO₂. TRO 13, US DOE, Washington, D.C. 1984.
- ENERGISTIK 1983, ESSO-AG, Hamburg, 1984.
- FLAVIN, C.: World oil: Coping with the dangers of success. Worldwatch Paper 66, Washington, D.C., 1985.
- HÄFELE et al.: Energy in a finite world. Cambridge: Ballinger 1981.
- KEEPIN, B.: A technical appraisal of the IASA energy scenarios. Policy Sciences 17 (1984) Nr. 3, S. 199—275.
- KEEPIN, B.; WYNNE, B.: Technical analysis of IASA energy scenarios. Nature 312 (1984) S. 691—695.
- KEEPIN, B.: Review of global energy forecasts. Stockholm 1985 (unveröff. Manuskript).
- KRAUSE, F.; BOSSEL, H.; MÜLLER-REISSMANN, K.F.: Energiewende. Frankfurt Fischer 1980.
- LOVINS, A. B.; LOVINS, L. H.; KRAUSE, F.; BACH, W.: Wirtschaftlichster Energieeinsatz: Lösung des CO₂-Problems. Alternative Konzepte 42. Karlsruhe: C. F. Müller 1983 (Engl. Version 1981).
- MANNE, A. S.; SCHRATTENHOLZER, L.: International Energy Workshop. A Summary of the 1983 Poll Responses. International Institute for Applied Systems Analysis, PR-85-5, Laxenburg, April 1985.
- MARLAND, G.; ROTTY, R. M.: Carbon dioxide emissions from fossil fuels: A procedure for estimation and results for 1950—1982. Tellus 36 B (1984) S. 232—261.
- NORDHAUS, W. D.; YOHE, G. W.: Future paths of energy and carbon dioxide emissions. In: US NAS: Changing Climate. Washington, D.C.; Nat. Acad. Press 1983, S. 87—153.
- OLIVIER, D. et al.: Energy-efficient futures: Opening the solar option. London: Earth Resources Res. Ltd. 1983.
- PERRY, A. M.: Carbon dioxide production scenarios: In: W. C. CLARK (ed.): Carbon dioxide review 1982. Oxford: Oxford Univ. Press, 1982. S. 337—371.
- ROBINSON, J. B. et al.: Determining the long-term potential for energy conservation and renewable energy in Canada. Energy 10(6) (1985) S. 689—705.
- ROTTY, R. M.; MARLAND, G.; TREAT, N.: The changing pattern of fossil fuel CO₂ emissions. TRO 14, US DOE, Washington, D.C. 1984.
- SCHUSTER, G.: Mister Brüter. Natur (1985) Nr. 9, S. 28—35.
- WYNNE, B.: The institutional context of science, models, and policy: The IASA energy study. Policy Sciences 17 (1984) Nr. 3, S. 277—320.

Aus dem Deutschen Wetterdienst

MOS: Die statistisch-numerische Modellinterpretation im DWD

1 Der Grundgedanke

MOS (Model Output Statistics) ist — kurz gesagt — der Versuch, aus Modell-Gitterpunktvorhersagen Punktvorhersagen für einen bestimmten Ort zu berechnen. Zur Zeit stellt das BKF-Modell die Basis für die DWD-MOS-Vorhersagen dar. Man muß sich vergegenwärtigen, daß bei einem Gitterpunktabstand von 254 km eine BKF-Gitterpunktvorhersage repräsentativ für ein Gebiet von ca. 65 000 km² ist, so daß witterungsmäßig so unterschiedliche Gebiete wie

z. B. das Oberrheintal und der benachbarte Schwarzwald nicht mehr differenziert werden können. Hinzu kommen generelle modellabhängige systematische Vorhersagefehler, die ihre Ursache in der Modellphysik, der Gitterstruktur, der Modellorographie usw. haben.

Dem MOS-Verfahren liegt der Gedanke zugrunde, statistische Beziehungen zwischen den Zeitreihen von Modellvorhersagen und örtlichen Beobachtungen zu finden, um auf diese Weise die örtlichen Besonderheiten des

Wetterverlaufes vorherzusagen und systematische Modell-Vorhersagefehler ausgleichen zu können.

2 Das Verfahren

Im ersten Schritt wird für einen bestimmten Ort und für eine bestimmte vorherzusagende Größe (Prädiktand) aus einem möglichst großen, repräsentativen Datenkollektiv (Modellvorhersagen und Synop-Beobachtungen) eine Vorhersagegleichung der Form

$$\text{MOS-Prognose} = a_1 F_1 + a_2 F_2 + \dots + a_n F_n$$

entwickelt (multiple lineare Regression). Dabei soll die Zeitreihe der MOS-Prognosen

möglichst gut die Zeitreihe der Beobachtungen approximieren. F_1, \dots, F_n sind vorhergesagte Modellgrößen (Prädiktoren), deren Auswahl nach dem Kriterium erfolgt, den mittleren verbleibenden Restfehler zwischen Beobachtung und MOS-Prognose möglichst auf ein Minimum zu drücken.

Im zweiten Schritt wird diese aus einem Basiskollektiv von Daten ermittelte Gleichung auf ein unabhängiges Kollektiv angewandt; man kann Fehlermaße berechnen, die um so ungünstiger ausfallen, je weniger repräsentativ das Basiskollektiv und je schlechter die Auswahl der bereitgestellten Prädiktoren war. Im dritten Schritt wird die Gleichung für die tägliche Prognose benutzt. Hier treten im Einzelfall auch große Fehler auf, je nachdem, wie häufig die aktuelle Wetterlage im Basiskollektiv vertreten war und sich dementsprechend auf die Prädiktorwahl ausgewirkt hat. Man kann die tägliche Prognose auch als Anwendung der Gleichung auf ein unabhängiges Kollektiv, bestehend aus nur einem Tag, bezeichnen.

Die ermittelten Regressionsgleichungen stehen und fallen mit einem sinnvollen Angebot an Prädiktoren, aus denen das Verfahren die zur Fehlerreduzierung am besten geeigneten aussuchen soll. Im Prinzip sind der Statistik keine Grenzen gesetzt: Man kann auch die Zahl der Storchennester als Prädiktor anbieten und wird womöglich bei einem nicht hinreichend repräsentativen Datenkollektiv erleben, daß diese auch einen kleinen Beitrag zur Verringerung des Restfehlers leisten können. Im Normalfall wird man aber um so größere Erfolge erzielen, je besser durch ein Prädiktorangebot diejenigen physikalischen Prozesse abgedeckt werden, die ursächlich den Verlauf bzw. die Intensität der vorherzusagenden Größen beeinflussen. Das können auch abgeleitete oder diagnostische Größen sein wie vertikale Temperaturdifferenzen, KO (Labilitäts)-Index usw. oder modellunabhängige Größen wie Orographie, Tagesdauer, letzte Beobachtungen.

Das Basiskollektiv, aus dem die Regressionsgleichungen ermittelt werden, beträgt zur Zeit vier Jahreszeiten, d.h. 4×3 Monate. Das kann noch zu wenig sein. Wird eine zur Anwendung in den Wintermonaten vorgesehene Temperatur-Regressionsgleichung z.B. aus vier Wintern ermittelt, die wenig Nebelagen enthalten, so wird die Vorhersage der Extremtemperaturen bei einer solchen Wetterlage gänzlich danebengehen. Hauptproblem bei der Vergrößerung des Basiskollektivs sind Modelländerungen in der Vergangenheit; streng genommen muß nach jeder Modelländerung ein neues Basiskollektiv

aufgebaut werden. Probleme entstehen aber auch bei der Arbeit mit solchen großen Datenmengen. Durch Erweiterung des zur Erstellung der Regressionsgleichung herangezogenen Zeitraums wird einerseits die Repräsentativität der Gleichungen erhöht, zugleich aber auch die Möglichkeit eröffnet, je nach Wetterlage nur bestimmte, ausgewählte Tage des Basiskollektivs zur Erstellung der Regressionsgleichungen zu verwenden.

Gleiche meteorologische Größen treten oft bei sehr unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen auf. Will man z.B. eine befriedigende MOS-Niederschlagsvorhersage erreichen, so müssen im Prädiktorangebot sowohl die bei Large-Scale-Niederschlägen als auch die bei Schauerbildung maßgeblichen Einflußgrößen abgedeckt sein und in der multiplen Regression zum Tragen kommen. Da beide Niederschlagsbildungen sich weitgehend gegenseitig ausschließen, führt der Versuch, sie trotzdem in einer Gleichung zu behandeln, zur statistischen „Verschmierung“, die keinem der beiden Ereignisse ganz gerecht wird. Man kann eine wesentliche Verbesserung der Prognosenqualität erwarten, wenn man das Basiskollektiv in Tage mit konvektivem bzw. solche mit Large-Scale-Niederschlag aufteilt und zwei individuelle Regressionsgleichungen entwickelt, die dann alternativ in der aktuellen Prognose angewandt werden.

Das Beispiel kann auf fast alle meteorologischen Größen übertragen werden (Minimumtemperatur der Nacht in Abhängigkeit von Windstärke, Nebelbildung usw.). Gedacht wurde auch schon an eine objektive (automatische) Großwetterlagenklassifikation als Differenzierungsinstrument. Alle derartigen Verfahren müssen sich dann aber auf ein wesentlich größeres Basiskollektiv stützen, als das zur Zeit der Fall ist.

Obwohl die ortsbezogene MOS-Prognose örtlich systematische Besonderheiten (kanalisierte Winde in Flußtälern, Hebungsniederschläge an Gebirgsrändern usw.) mit Hilfe örtlicher, beobachteter Zeitreihen beschreiben sollte, sind kleinräumige Zufälligkeiten z.B. in der Niederschlagsverteilung einer Gewitterlage prinzipiell nicht vorhersagbar. Hier bieten sich zwei alternative Wege an: Man kann bei einer genügend großen Zahl von Schauerniederschlägen zeitliche Mittelwerte und Streuungen je Station berechnen und damit für eine solche Lage die typische mittlere Niederschlagshöhe und Wahrscheinlichkeiten für erwartete Abweichungen vorhersagen. Andererseits können auch räumlich die Stationen eines bestimmten Gebiets zusammengefaßt werden. Man erhält Ge-

bietsmittelwerte, die natürlich bei der Verifikation bessere Ergebnisse liefern, weil die kleinräumige Variabilität durch Integration nicht mehr in Erscheinung tritt.

Da das BKF-Modell mit systematischen Fehlern (z.B. zu langsame Verlagerung von Hebungs- und Niederschlagszonen) behaftet ist, sind diese Fehler auch in den für die MOS-Prognose bereitgestellten Prädiktoren enthalten. Nimmt man z.B. einen Modell-Phasenfehler von 180 Grad an, so würden beobachtete Niederschläge in einer Westlage mit Modell-Absinken zusammenfallen und Modell-Prädiktoren, die Absinken anzeigen, bevorzugt zur Niederschlagsprognose herangezogen (hohe negative Korrelation). An diesem Beispiel erkennt man, daß das MOS-Verfahren auch aus systematisch falschen numerischen Prognosen noch gute Vorhersagen interpretieren kann, die allerdings dann nicht nach physikalischem Inhalt hinterfragt werden dürfen. Schlimmer ist die Situation, wenn der systematische Modell-Phasenfehler nur ein paar Grad beträgt; dies führt z.B. zur Verringerung der Korrelation zwischen Niederschlagsbeobachtung und Modell-Vertikalbewegung und damit zu verwaschenen und von Zufälligkeiten beeinflussten statistischen Beziehungen. Jedoch sollten die Regressionsgleichungen möglichst physikalisch einsichtig sein, um einen Zugang zur Beurteilung aktueller Interpretationsergebnisse zu erhalten. Erkannte systematische Fehler der Prädiktoren (Modellprognosen) sollten daher nach Möglichkeit entsprechend korrigiert werden, bevor sie in die Regression einbezogen werden. Dies führt zu physikalisch sinnvolleren statistischen Beziehungen, die infolgedessen bei der Erstellung der Regressionsgleichungen auch eine deutlichere und schnellere Annäherung der MOS-Prognose an die Zeitreihe der Beobachtungen bewirken.

3 Die Anwendung im DWD

Im DWD wurde die tägliche, routinemäßige Verbreitung von MOS-Vorhersagen nach Ablauf einer neunmonatigen Versuchsphase am 04.06.1984 eingeführt. Die Vorhersagezeit wurde und ist bis auf weiteres auf 42 Stunden begrenzt. Ausgehend vom 00 UTC-BKF-Lauf sind Vorhersagen für drei Intervalle vorgesehen: 06 bis 18 H (Tag), 18 bis 30 H (Folgenacht) und 30 H bis 42 H (Folgetag). Um die Qualität der Vorhersagen zu verbessern, wurden von Beginn an auch Zeitreihen der 06 UTC-Beobachtungen in die Regression einbezogen. Die Verbreitung der Vorhersagen kann daher erst nach Eingang der 06-UTC-Meldungen, also nach 07 UTC

erfolgen. Um dem Wunsch nach frühzeitiger Information bei den Wetterämtern gerecht zu werden, wurden zusätzlich auch Vorhersagegleichungen entwickelt, die sich nur auf Zeitreihen des BKF-Modell-Outputs stützen. Diese sog. „Backup“-Vorhersagen gehen unmittelbar nach Vorliegen der 00 UTC-BKF-Vorhersagedaten gegen 05 UTC an die Empfänger.

Begonnen wurde zunächst mit der Extremtemperaturvorhersage, also $T_{max}/T_{min}/T_{max}$. Die Temperatur wird in relativ geringem Maß durch lokale Einflüsse bestimmt, die nicht in irgendeiner Weise, zumindest teilweise, durch die Modellgrößen parametrisierbar wären. Sie neigt — vom Modellscale gesehen — nicht zu großen „zufälligen“ Schwankungen. Erwartungsgemäß hoch fällt auch die Verbesserung aus, wenn man die Vorhersagen „BKF“ (Interpolierte Gitterpunktwerte der BKF-Temperatur in Anemometerhöhe, höhenreduziert) und „BKF + MOS“ vergleicht (Abb. 1).

Der zweite Prädiktand ist der mittlere 12-stündige Bedeckungsgrad, bezogen auf die drei erwähnten Vorhersageintervalle. Im Gegensatz zur Temperatur ist die Bewölkung eine wesentlich sensiblere Größe, was die Reaktion auf lokale bzw. regionale Einflüsse betrifft. Geringe Vorhersagefehler bei den auf die Wolkenbildung wirkenden meteorologischen Größen können Schwankungen über den gesamten Skalenbereich von 8/8 bis 0/8 bewirken — man denke nur an die Auflösung bzw. Nicht-Auflösung einer Wolkendecke in Abhängigkeit von der vorhergesagten Stabilität. Daher ist mit einem relativ großen unsystematischen Fehleranteil bei der BKF-Prognose zu rechnen, der von der MOS-Statistik nicht reduziert werden kann.

Im März 1985 wurde als dritter Prädiktand die Windgeschwindigkeit (maximaler 10 min-Mittelwind im Vorhersageintervall) und im Dezember 1985 als bisher letztes Element die zugehörige Windrichtung eingeführt. Der Bodenwind ist eine stark von der örtlichen Orographie abhängige Größe. Speziell die Windrichtung, aber auch die Windgeschwindigkeit werden von der Orientierung des Tales bestimmt, in dem die Station liegt. Die

Kanalisation der Strömung verursacht je nach Windrichtung oberhalb der Grenzschicht und je nach Stabilität auch Bodenwinde, die in ihrer Richtung stark von den mit üblichen Reibungsansätzen berechneten Winkeln abweichen. Diese Abweichungen sind bis zu einem gewissen Grad noch systematischer Natur. Die größte Schwierigkeit bei der Vorhersage des Windes ist die Ausbildung von Lokalwindzirkulationen bei schwachgradientigen Lagen. Diese Winde sind rein orographisch bedingt und völlig von der Wetterlage und vom Höhenwind entkoppelt. Es gibt daher auch keine Modell-Prädiktoren, die dieses Phänomen in physikalisch sinnvoller Art beschreiben können. Derartige Überlegungen sind insofern nützlich, als sie dem Nutzer der MOS-Vorhersage

gen die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der MOS-Technik vor Augen führen.

Als eines der wichtigsten Wetterelemente bleibt der Niederschlag. Trotz verschiedener Anläufe konnte hier bisher noch kein entscheidender Fortschritt erzielt werden. Das liegt an der außerordentlichen Variabilität dieses Elements. Statistisch gesehen besteht eben kein genügend eindeutiger Zusammenhang zwischen den Niederschlag produzierenden Modellgrößen (Feuchte, Hebung, Höhendivergenz usw.) und der Beobachtung an einer bestimmten Synopstation. Repräsentativere Niederschlags-Meßreihen sind durch Gebietsmittelbildungen zu erreichen, wenn man das bis zu 10fach dichtere Netz der Klimahauptstationen zugrunde legt. Mit Hilfe einer Einteilung der BR Deutschland in Gebiete, die — jedes für sich — eine einigermaßen homogene Niederschlagsverteilung aufweisen, konnte eine erfolgversprechende MOS-Gebietsniederschlagsvorhersage entwickelt werden, deren Routinereife 1986 erwartet werden kann. Dennoch wird auch in Zukunft die Vorhersage des Niederschlagsbetrages ein schwieriges Unterfangen bleiben.

4 Vorläufiges Ziel

Mit den diskutierten Elementen Temperatur, Bedeckung, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlag ist der derzeitige MOS-Entwicklungsstand beschrieben. Zusätzlich in Planung sind routinemäßige MOS-Windvorhersagen in Böen (stationsbezogen) und Ja/Nein-Vorhersagen von Gewitter oder Starkregen-Ereignissen (Gebietsmittel-Vorhersage). Damit wären die wichtigsten meteorologischen Elemente in die MOS-Wettervorhersage einbezogen und die MOS-Entwicklung inhaltlich zu einem vorläufigen Abschluß gebracht. Weitere Möglichkeiten, wie die Ausweitung des Vorhersagezeitraums, die MOS-Vorhersage auf Basis des 12 UTC-Modell-Laufs oder spezielle Parameter für die Flugmeteorologie wie Sichtweite und Ceiling lassen sich in absehbarer Zukunft noch nicht verwirklichen.

W. KUSCH, R. v. PANDER

W. PEYINGHAUS, Offenbach

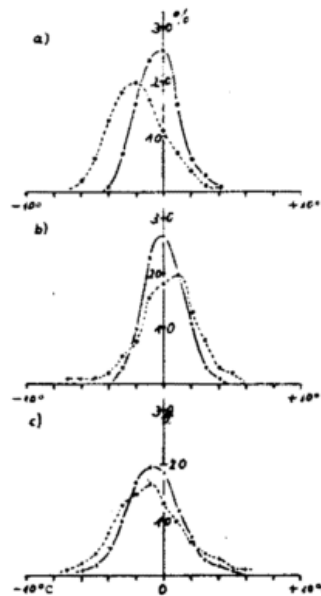


Abb. 1: Prozentuale Fehlerhäufigkeit der Extremtemperaturvorhersagen (BKF: - - -, BKF + MOS: — —) a) Maximum, b) Minimum der Folgenacht, c) Maximum des Folgetages.

Dargestellt ist die Differenz Prognose minus Beobachtung, einbezogen wurden die Vorhersagen für 46 deutsche Stationen aus dem Zeitraum 4.6.1985 bis 1.8.1985.

Buchbesprechungen — Neuerscheinungen

BECKER, K. H.; LÖBEL, J. (Hrsg.): Atmosphärische Spurenstoffe und ihr physikalisch-chemisches Verhalten. Ein Beitrag zur Umweltforschung. Berlin (u.a.): Springer 1985. 264 S. DM 98,—
ISBN 3-540-15503-1.

Der Sammelband enthält 14 Beiträge verschiedener Autoren. In den Beiträgen wird zum Teil Grundlagenwissen vermittelt; hauptsächlich werden neue Erkenntnisse über das physikalisch-chemische Verhalten von Luftverunreinigungen dargestellt. Diese Darstellungen basieren im wesentlichen auf Messungen in der Atmosphäre und auf numerischen Modellen. Am Anfang des Bandes findet man Aufsätze über anthropogene Emissionen von Spurenstoffen, Eigenschaften der reinen und verschmutzten Atmosphäre und die Grundlagen der chemischen Kinetik. Daran schließen sich mehrere Arbeiten über die Reaktionen von Spurengasen in der Tropo- und Stratosphäre an. Den Aerosolen, ihren Reaktionen mit Gasen, ihrer Deposition sowie ihrer Konzentration im Niederschlagswasser sind weitere Beiträge gewidmet. Die Arbeiten im letzten Drittel des Bandes behandeln die Vorgänge in der Mischungsschicht und die Modellierung dieser Vorgänge, wie Diffusion, trockene Deposition und Aerosol-Scavenging. Zwei Arbeiten über Modellrechnungen zur Chemie der Atmosphäre und über chemische Umsetzungen in Ausbreitungsrechnungen schließen die Sammlung ab.

Jeder Beitrag enthält ein Literaturverzeichnis. Der Übersicht dient ein Sachwörterverzeichnis am Schluß des Bandes. Bedauerlich ist, daß das Buch kein einheitliches Schriftbild aufweist und der Einband häufigen Gebrauch nicht standhalten dürfte.

H.-D. Kirch

SCHÖNWIESE, C.-D.: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Berlin, Stuttgart: Gebr. Borntraeger 1985. VI, 231 S. DM 28,80
ISBN 3-343-01021-0.

In Klimabeschreibungen und Klimastatistiken dominierte lange Zeit die sog. „Mittelwertklimatologie“. Für viele klimatologische Fragestellungen der Gegenwart müssen jedoch modernere statistische Methoden zur tieferen Durchleuchtung der Probleme angewendet werden. In der deutschsprachigen Literatur ist auf diesem Gebiet in Buchform bisher wenig erschienen. Es ist deshalb zu begrüßen, daß der Verfasser auf der Grundlage

seiner Vorlesungen über statistische Methoden an der Universität Frankfurt in diesem Buch die wichtigsten Verfahren der beschreibenden und analytischen Statistik sowie eine Reihe moderner Methoden vorstellt. Die einzelnen Kapitel behandeln: Grundlagen der Statistik, ein- und mehrdimensionale Stichprobenverteilungen, theoretische Verteilungen, Fehlerrechnung, Schätzverfahren, Repräsentanz, Hypothesenprüfung, Varianzanalyse, Korrelation und Regression sowie die Zeitreihenanalyse. In einem Tabellenanhang werden u.a. Funktionswerte der Normalverteilung, Quantile (Verteilungsfunktion) der Normalverteilung und anderer theoretischer Verteilungen (Student, X^2 , Fisher, Weibull) wiedergegeben.

Der Nutzen des Buches für Meteorologen und andere Geowissenschaftler liegt zu einem guten Teil in seiner auf die Praxis bezogenen Darstellung, die man sich bei einer Neuauflage in noch stärkerer Betonung wünschen möchte.

M. Schlegel

ERIKSEN, W. (Hrsg.): Klimageographie. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1985. VII, 425 S. (= Wege der Forschung Bd. 615). DM 89,—
ISBN 3-534-08673-2.

Befindet sich die geographische Klimaforschung in einer Krise? In der Tat besteht ein Spannungsfeld zwischen der geographisch orientierten und der meteorologisch orientierten Klimaforschung. In der vorliegenden, chronologisch geordneten Aufsatzsammlung wird die historische Entwicklung der Klimaforschung aus einer geographischen Teildisziplin zu einer meteorologisch orientierten Wissenschaft aufgezeigt, die sich heute auch physikalisch-exakter Arbeitsweisen bedient und numerisch-analytische modellorientierte Ansätze verwendet. Für diese moderne Arbeitsrichtung der geographischen Klimaforschung wurde der Begriff Klimageographie geprägt.

Die Abhandlung des Themas ist in drei Teile gegliedert: I. Entwicklung der klimatologischen/klimageographischen Fragestellungen und Aufgaben, II. Beiträge zur allgemeinen Klimageographie, III. Beiträge zur regionalen Klimageographie.

M. Goesch

FLOHN, H.: Das Problem der Klimaänderungen in Vergangenheit und Zukunft. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1985. XVIII, 228 S. (= Erträge der Forschung Nr. 220) DM 49,—
ISBN 3-534-08889-1.

Der Verfasser legt einen umfassenden state-of-the-art-report der Erforschung der Klimaänderungen in Vergangenheit und Zukunft vor. Der Forschungsbericht beruht auf einigen größeren Arbeiten des Autors zum Kohlendioxid-Klimaproblem, geht jedoch weit darüber hinaus.

Nach einem allgemeinen Überblick über das geophysikalische Klimasystem mit seinen natürlichen und seinen anthropogenen Effekten werden in den folgenden drei Kapiteln die Vorgänge näher erläutert: Interne, externe und anthropogene klimatogenetische Wechselwirkungen und Effekte. Die letzten vier Kapitel behandeln die besonders interessanten Themen der Entwicklung des Klimas in Vergangenheit und Zukunft: Klimavorschau (Modelle, Analogfälle, Szenarien), Grundfragen der Paläoklimatologie, Warm- und Kaltzeiten in der jüngeren Klimageschichte, und schließlich das faszinierende, aber auch sehr umstrittene Problem eines völligen Verschwindens des Treibeises im arktischen Ozean (bei vereister Antarktis). Am Schluß wird noch einmal der Anstieg des Kohlendioxidgehaltes und die künftige Klimaentwicklung betrachtet.

M. Goesch

BATTAN, L. J.: Fundamentals of meteorology. 2nd ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall 1984. XXII, 304 S.
ISBN 0-13-341123-0.

FEIGELSON, E. M. (Ed.): Radiation in a cloudy atmosphere. Dordrecht; Boston; Lancaster: Reidel 1984. IX, 293 S. (Atmospheric Sciences Library; 6).
ISBN 90-277-1803-2.

HENDERSON-SELLERS, A. (Ed.): Satellite sensing of a cloudy atmosphere: Observing the third planet. London; Philadelphia: Taylor & Francis 1984. XIV, 340 S.
ISBN 0-85066-254-0.

HIDY, G. M.: Aerosols: an industrial and environmental science. Orlando (u.a.): Acad. Press 1984. XX, 774 S.
ISBN 0-12-347260-1.

PEARCE, E. A.; SMITH, C. G.: The world weather guide. London (u.a.): Hutchinson 1984. 480 S.
ISBN 0-09-151751-6.

STERN, A. C. (u.a.): Fundamentals of air pollution. 2nd Orlando (u.a.): Acad. Press 1984. XVII, 530 S.
ISBN 0-12-666580-X.

Berichtigungen

H. 2/3 '85:

S. 45, 1. Sp. Abschn. 5: es muß heißen: . . . kurzwelligen und im langwelligen Spektralbereich.

S. 50, r. Sp. drittletzte Zeile und S. 51, 1. Sp. 2. Zeile v. u.: Längengrad statt Breitengrad

Anschriften der Autoren (Thema des Heftes)

Prof. Dr. C.-D. SCHÖNWIESE

Prof. Dr. H.-W. GEORGII

Institut für Meteorologie und Geophysik
der Universität Frankfurt

Feldbergstraße 47, 6000 Frankfurt am Main 1

Prof. Dr. G. H. KOHLMAIER

Dipl.-Phys. H. BRÖHL

Dr. U. FISCHBACH

Dipl.-Phys. A. JANECEK

Dipl.-Biol. G. E. K. BENDEROTH

Chemische Institute

der Universität Frankfurt

Niederurseler Hang, 6000 Frankfurt am Main 50

Prof. Dr. W. BACH

Forschungsstelle für Angewandte Klimatologie
und Umweltstudien

Institut für Geographie der Universität

Robert-Koch-Straße 26, 4400 Münster

Redaktionelle Hinweise für Autoren

1 Allgemeines

Promet dient der Fortbildung von Meteorologen und Wetterberatern. Die Beiträge zum „Thema des Heftes“ sollen den neuesten Stand des zu behandelnden Spezialgebietes auf wissenschaftlicher Basis, jedoch in einer verständlichen und anschaulichen Weise darstellen.

2 Äußere Form des Manuskriptes

2.1 Text

Einseitig auf durchnummerierten DIN-A4 Blättern (links 4 cm, oben 2 cm als freier Rand), Maschinenschrift, 1 1/2zeilig, ca. 60 Anschläge/Zeile und 30 Zeilen/Seite.

2.2 Gliederung

Numerierung der Haupt- und Unterabschnitte nach dem Dezimalsystem (1, 1.1, 1.2 ..., 2, 2.1, 2.2 usw.).

2.3 Abbildungen, graphische Darstellungen

Kontrastscharfe und reproduktionsfähige Vorlagen (Fotos mit Hochglanz,

Strichzeichnungen mit schwarzer Tusche und klarer Beschriftung). Legenden zu den Abbildungen auf besonderem Blatt beifügen.

2.4 Formeln, Gleichungen

Auf das Notwendige beschränken, deutlich lesbar mit fortlaufender Numerierung in runden Klammern am rechten Textrand.

2.5 Tabellen

Nur im notwendigen Umfang, klar und übersichtlich, ggf. auch als Abbildungen.

2.6 Literaturzitate

Literaturhinweise im *Text*: ... MÜLLER (1980) ... oder ... (MÜLLER 1980) ...

Literaturverzeichnis:

— Autoren in alphabetischer Reihenfolge. Herausgeber werden durch den Zusatz: „Hrsg.“ gekennzeichnet.

— Zeitschriftenaufsatz:

KURZ, M.: Zum Einfluß diabatischer Prozesse auf die Frontogenese in Bodennähe. *Meteorol. Rdsch.* 35 (1982) Nr. 1, S. 21—30.

— Buch:

SCHÖNWIESE, C.-D.: *Klimaschwankungen*. Berlin: Springer-Verlag 1980.

3 Korrekturen

Autoren, die das „Thema des Heftes“ behandeln, erhalten Fahnenabzüge ihres Beitrages zur Korrektur. Die Umbruchkorrekturen werden von der Hauptschriftleitung durchgeführt.

4 Belegexemplare, Fortdrucke

Autoren des Hauptthemas erhalten je 5 Belegexemplare des betreffenden Heftes, Autoren von Kurzmitteilungen (3spaltige Texte) je 1 Heft. Zusätzliche Exemplare können gegen Erstattung der Fortdruckkosten bei der Rücksendung der Korrekturen bestellt werden.

Manuskriptsendungen werden erbeten an:

Deutscher Wetterdienst, Hauptschriftleitung „Promet“
Frankfurter Straße 135, 6050 Offenbach am Main

oder

Hauptschriftleitung „Promet“, Herrn Dipl.-Met. M. Schlegel
Brandsbornstraße 3, 6050 Offenbach am Main, (Tel. 069/83 53 57)