

# **CO<sub>2</sub>, Kohlenstoff-Kreislauf und Klima**

## **II. Strahlungsbilanz und Wasserhaushalt**

Hartmut Grassl

Institut für Meereskunde, D-2300 Kiel

Ernst Maier-Reimer

Max Planck-Institut für Meteorologie,  
D-2000 Hamburg

Egon T. Degens, Stephan Kempe  
und Alejandro Spitzky

SCOPE/UNEP International Carbon Center,  
Geologisch-Paläontologisches Institut  
der Universität, D-2000 Hamburg

To assess the reaction of the climate system on increased CO<sub>2</sub> in the air either numerical atmospheric models have been used, or one has tried to filter a CO<sub>2</sub>-induced climate trend (such as increasing temperature) from existing meteorological records. Even though a serious effect of increased CO<sub>2</sub> on climate has become highly probable, it has neither been empirically proven so far (diagnosis of observations) nor is the effect theoretically undisputed (prognosis by climate models).

## **Reaktion des Klimasystems auf das in der Atmosphäre bleibende Überschuß-CO<sub>2</sub>**

Globale Klimaveränderungen durch menschliche Aktivität sind während der letzten Jahre, nachdem regionale Wirkungen zunehmend nachweisbar sind, immer wahrscheinlicher geworden, jedoch noch nicht eindeutig belegt [1]. Von den vier Zugängen zum Klimasystem, nämlich Abwärme, Änderung der Zusammensetzung der Gase in der Atmosphäre, Eingriff in den Haushalt der Aerosolteilchen und Veränderung der Rückstreuungsfähigkeit der Erdoberfläche, ist die erste noch wegen Geringfügigkeit (gegenwärtiger Energieverbrauch ca. 0,04% der einfallenden Sonnenenergie) vernachlässigbar. Der dritte und vierte ist bisher nicht zuverlässig abgeschätzt, da sich erhebliche methodische Schwierigkeiten ergeben. Die größte Beachtung findet also bisher die Emission von Gasen, vor allem CO<sub>2</sub>, aber auch von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), und deren Umwandlungen in der Atmosphäre. Im einzelnen wurde die Entdeckung neuer photochemischer Reaktionen (z.B. [2]) dieser leicht umzuwandelnden Gase oder neuer Quellen oder Senken jeweils zu Meilensteinen bei der Beurteilung der „Gefährlichkeit“ für weitere Injektionen.

### **Der Glashaus-Effekt**

Bei dieser Diskussion ragt besonders der Glashaus-Effekt einzelner Gase und dabei wiederum der des CO<sub>2</sub> hervor, obwohl eine neue Zusammenstellung [3] zeigt, daß viele andere Spurenstoffe rascher als CO<sub>2</sub> anwachsen. Sollten diese ebenfalls den Strahlungshaushalt verändern, also Bedeutung für das globale Klima haben, wird sich die Diskussion dieser Gase noch verstärken. Vom Glashaus- oder Treibhaus-Effekt kann immer dann gesprochen werden, wenn eine in der Atmosphäre vorkommende Substanz — ähnlich dem Fensterglas — Wärmestrahlung im Wellenlängenbereich > 4 µm stärker absorbiert als im energetisch wichtigen Bereich der Sonnenstrahlung mit Wellenlängen < 4 µm. Bei Zunahme einer solchen Glashaus-Substanz muß, wegen im Langzeitmittel auszugleichendem Energiehaushalt und bei konstanten anderen Parametern, die Oberflächentemperatur der Erde ansteigen. Es sollte in diesem Zusammenhang jedoch nicht vergessen werden, daß die geringfügige Absorption des CO<sub>2</sub> im Bereich der Sonnenstrahlung von 1–3 µm Wellenlänge zwischen einzelnen Absorptionsbanden des Wasserdampfes zu einer Schwächung der für den Beginn der Schneeschmelze benötigten Strahlungsenergie führt [4]. In hohen polaren Breiten kann dadurch die Albedo des Schnees besonders im Frühsommer etwas län-

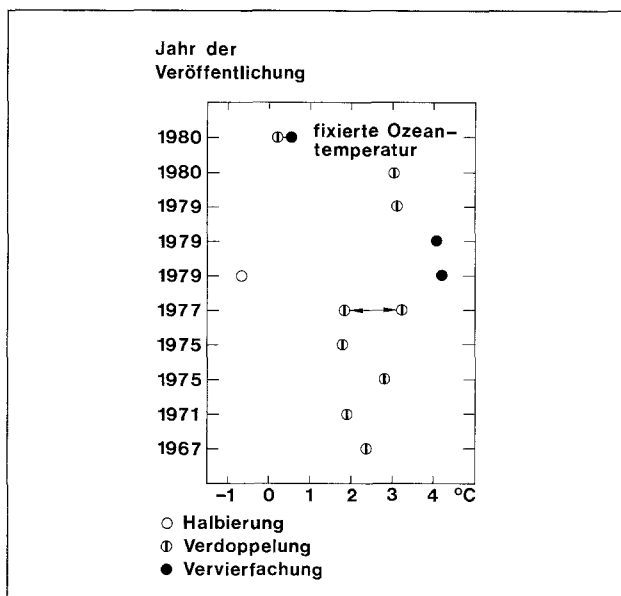


Fig. 1. Vergleich von Klimamodellen: mittlere globale Temperaturänderung bei Halbierung, Verdoppelung und Vervielfachung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Atmosphäre (nach [11] mit leichten Änderungen). Neuere Modellrechnungen haben für die Mittelwerte keine wesentlichen Änderungen gebracht

ger hoch bleiben, was einem abkühlenden Effekt bei der  $\text{CO}_2$ -Zunahme gleichkommt. Ob dieser Effekt bedeutend ist, ist noch unklar.

### Beweisführung mit Klimamodellen

Seit Plass [5] nach fast vergessenen Vorläufern neuere Werte der Erwärmung bei  $\text{CO}_2$ -Zunahme vorstellte, ist das  $\text{CO}_2$  zum Motor der Suche nach Klima-Rückkoppelungen geworden, die bevorzugt positiv, also verstärkend waren. Sobald eine neue positive Rückkoppelung des Klimasystems eingeführt wurde, erschienen Folgearbeiten mit dämpfenden Effekten, so daß – wie in Fig. 1 illustriert – die bei Verdoppelung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Atmosphäre nach den Modellen zu erwartende mittlere Erwärmung in Erdbodennähe stark schwankt.

Die Klimamodelle der Fig. 1 mit ihren wechselnden Temperaturergebnissen beschreiben zudem nur den am raschesten reagierenden Teil, die Atmosphäre, mit Ausnahme weniger, die auch eine begrenzte Behandlung des Ozeans enthalten. Dabei werden fast ausschließlich stationäre Endzustände als Reaktion auf eine impulsartige  $\text{CO}_2$ -Vervielfachung berechnet. Eine Modellierung der zeitabhängigen Wechselwirkung mit dem träger reagierenden Ozean [6] und der noch langsamer reagierenden Kryosphäre – den Gletschern und polaren Eiskappen – ist erst jüngst angepackt worden.

Daß überhaupt menschlicher Einfluß auf globales Klima mit numerischen Modellen nachgewiesen werden soll, erzwingt das natürliche Rauschen des Klimasystems. Die über einige Jahre gleitend gemittelte Temperatur der nördlichen Erdhälfte z.B. sank 1940 bis 1975 um ca. 0,5 K ab, um seither wieder anzusteigen. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zur Modell-Voraussage einer stetigen Erwärmung durch  $\text{CO}_2$ -Erhöhung. Fünf Erklärungsversuche seien vorgestellt:

Die Modelle sind falsch oder bestenfalls bruchstückhaft richtig.

Die Modelle sind richtig, es fehlen aber noch unerkannte negative, d.h. dämpfende Rückkopplungen.

Andere Folgen menschlicher Aktivität kompensieren den Glashaus-Effekt.

Der von den Modellen berechnete stationäre Endzustand einer einmaligen, plötzlichen  $\text{CO}_2$ -Erhöhung tritt wegen langlebiger Komponenten des Klimasystems (Ozean, Kryosphäre) erst verzögert ein. Die Verzögerung der Temperaturwelle durch die hohe Wärmekapazität des Ozeans wird von mehreren Autoren auf rund zehn Jahre geschätzt (z.B. [12]). Die Wärmedämpfung darf nicht verwechselt werden mit der chemischen Pufferwirkung des Ozeans für  $\text{CO}_2$ .

Die Modelle sind richtig, aber die Temperaturerniedrigung zwischen 1940 und 1975 im „natürlichen Klimasystem“ wäre ohne  $\text{CO}_2$ -Effekt noch stärker ausgefallen.

Sind die Temperaturschwankungen schon recht unsicher, so gilt dies verstärkt für den Niederschlag, der in großen Teilen der Erde ein noch wichtigerer Überlebensparameter ist. In diesen Punkten den Modellen zu glauben, hieße sie überfordern, da sie auch die gegenwärtige Verteilung – speziell in den bei Änderungen besonders empfindlichen semiariden Gebieten – nicht befriedigend wiedergeben [7].

### Modelle als Indikatoren für empfindliche Teile des Klimasystems

Die sehr aufwendigen Modelle der atmosphärischen Zirkulation (z.B. [8]) geben trotz aller Zweifel jedoch Hinweise, wo nach ersten Signalen einer  $\text{CO}_2$ -Klimaänderung gesucht werden sollte: nämlich dort, wo das Klimasystem am empfindlichsten reagiert und mit den größten Temperaturschwankungen antwortet. Den Modellen zufolge sind dies: die nördlichen polaren Breiten und die Stratosphäre. Allerdings ist auch gerade in Polargebieten die natürliche Variabilität des Klimas ausgeprägter, so daß dort für eine Detektion des  $\text{CO}_2$ -

Signals das Signal/Rausch-Verhältnis relativ ungünstig ist. Auch haben dort Wirkungen der Aerosolteilchen gleiches Vorzeichen. In der Stratosphäre ist trotz langer Meßreihen am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin [9, 10] kein Hinweis auf eine systematische Abkühlung zu finden.

### **Regionalisierung der Modelle**

Wie bei natürlichen Klimaschwankungen sollte auch der Regionalisierung des CO<sub>2</sub>-Effekts besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden [11], denn eine systematische Änderung der allgemeinen Zirkulation wird auch die bevorzugten Positionen von Hochdruckrücken und Tiefdrucktrögen in der geographischen Länge wie Breite verschieben. Die Regionalisierung erlaubt auch bei insgesamt höherem Niederschlag Gebiete mit Defizit. Regionalisierung bedeutet weiterhin, daß in verschiedenen Gebieten unterschiedliche Randbedingungen zu beachten sind. So wird der mittlere feucht-adiabatische, vertikale Temperaturgradient von ca. 6,5 K/km — meist als Standardmodell und bei fixierter relativer Feuchte betrieben — in einer anderen Region vielleicht nicht mehr angemessen sein. Auch die relative Feuchte, oder gar die absolute Feuchte plus Niederschlag, könnten konstant bleiben. Nach Modellergebnissen von Ramanathan [12] bedeutet dies bei Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes für die von ihm untersuchten vier Fälle: 1) feste relative Feuchte und 6,5 K/km vertikaler Gradient, 2) feste relative Feuchte und exakter feucht-adiabatischer Gradient, 3) fixierte absolute Feuchte und 4) fixierte absolute Feuchte und Niederschlag eine Erhöhung der mittleren globalen Deckschicht-Temperatur des Ozeans um 1,8, 1,2, 0,64 oder gar nur 0,17 K. Die Erwärmung durch Zunahme des CO<sub>2</sub> ist also fast ganz von der Reaktion des hydrologischen Zyklus bestimmt.

### **Einfluß der Bewölkung**

Noch eine weitere, schwer zu schließende Wissenslücke steckt in den als Klimamodell benutzten atmosphärischen Zirkulationsmodellen: Die Vorhersage der Bewölkung und ihr Einfluß auf den Energiehaushalt sind weitgehend ungeklärte Probleme. Je nach Region können nämlich Wolken zu Energiegewinn oder Energieverlust für das Gesamtsystem führen [13]. Wissenschaftlern, die die Wirkung der Bewölkung vernachlässigen möchten, stehen jene gegenüber, die Wolken als *den* Regulator ansehen. Schon eine Erhöhung der Wolkenobergrenze um 0,5 km kann bei fixiertem Bedeckungsgrad und unveränderten optischen Eigenschaften

der Wolken einen dramatischen Effekt hervorrufen. Schneider [14] wörtlich: „Eine Erhöhung der Wolkenobergrenze von 5,5 km auf 6,1 km könnte die Oberflächentemperatur um 2 K anheben, eine Veränderung des Bedeckungsgrades von 50 auf 58% könnte sie um 2 K erniedrigen“.

In auf Paltridge [15] zurückgehenden Klimamodellen mit einer nicht begründbaren, aber durch Messungen gestützten [16] Extremalbedingung (maximale Entropie-Erzeugung durch meridionale Wärmeflüsse in Atmosphäre und Ozean) konnte die Bewölkung als Unbekannte mitgeführt werden. Bei Verdoppelung des CO<sub>2</sub> [17] ergab sich dann eine nur schwache Temperaturerhöhung von ca. 1 °C und — noch erstaunlicher — keine besondere Empfindlichkeit der polaren Zonen. Der Grund dafür ist der kombinierte Effekt geringerer Bewölkung in Polargebieten und schwächeren Wärmetransports in Polrichtung.

Der Nachweis globaler Klimaänderungen mit gegenwärtigen numerischen Modellen der Atmosphäre allein ist unbefriedigend. Erst zeitabhängige, dreidimensionale Simulationen der Komponenten Atmosphäre, Ozean und Kryosphäre mit einem realistischen CO<sub>2</sub>-Szenario werden vielleicht die heute noch fehlende Aussagekraft besitzen.

### **Versuche, das CO<sub>2</sub>-Temperatur-Problem mit Meßdaten zu entscheiden.**

#### *Veränderlicher Glashaus-Effekt der gegenwärtigen Atmosphäre*

Da sich Teile der Atmosphäre wegen des stark schwankenden Wasserdampfgehaltes immer wieder auf damit auch wechselnden Glashaus-Effekt einstellen müssen, ist es nur folgerichtig, wenn aus Meßreihen der Komponenten des Strahlungshaushaltes und anderer Klimaparameter die Empfindlichkeit z.B. der Oberflächentemperatur gegenüber diesen Änderungen gefiltert wird. Alle möglichen Rückkoppelungen sind dann berücksichtigt. Geschieht dies aber wie beim ersten Versuch von Idso [18] nur für ein kleines Gebiet und dazu über einem trockenen Teil des Kontinents (Arizona), dann kann aus den sehr niedrigen Werten bei Unkenntnis der Advektion und fehlender Rückkoppelung über die Verdunstung noch nicht auf globale Reaktionen bei CO<sub>2</sub>-Schwankungen und schon gar nicht auf eine Überbewertung des CO<sub>2</sub>-Problems geschlossen werden. Auch eine Ausweitung der Untersuchungsgebiete über den Kontinenten [19] und auf angrenzende Küsten löst dieses Problem noch nicht, erst recht nicht, wenn nur kurzfristige Phänomene (kurzfristig im Vergleich zur Einstellzeit des Klimasystems auf CO<sub>2</sub>-Änderungen) be-

trachtet werden. Geht man wie Newell und Dopplick [20] vor, und rechnet man allein die Gegenstrahlungsänderung bei Änderung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes und vergleicht diese Temperaturänderungen mit gemessenen Änderungen im Strahlungshaushalt, so erreicht man von den drei immer gleichzeitig zu betrachtenden Rückkoppelungen nur die schwächste. Denn nach Ramanathan [12] kommt zur direkten Gegenstrahlungsänderung von ca.  $1 \text{ W/m}^2$  bei Verdoppelung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes und fixierter Temperaturstruktur noch der Zuschlag durch veränderte Temperaturstruktur der Atmosphäre als Folge des neuen „radiative – convective“ Gleichgewichtes ( $3 \text{ W/m}^2$ ) und als Hauptzuschlag (ca.  $12 \text{ W/m}^2$ ) die Reaktion des Wasserdampfes auf die veränderten Temperaturen.

### *Suche nach ersten Signalen im Klimasystem*

Einen Versuch, die Modellrechnungen durch Meßdaten zu stützen, stellten jüngst Kukla und Gavin [21] vor. Basierend auf der Modellaussage von Ramanathan et al. [22], daß im polaren Sommer maximale Signale zu erkennen sein sollten, wurde die zeitliche Veränderung der Meereismenge um die Antarktis im Sommer untersucht und bei gutwilliger Interpretation der erste Fingerzeig einer Reaktion entdeckt. Da der Trend aber auch durch einen Wechsel im Beobachtungssystem – von Einzelbeobachtungen von Schiffen und Inseln aus zu globalen Satellitendaten – vorgetäuscht sein kann, muß weiter gesucht werden. Mit ausführlicheren Daten, jetzt aber allein auf 9 Jahre Satellitenbeobachtungen gestützt, können Zwally et al. [23] ebenfalls keinen der  $\text{CO}_2$ -Zunahme zuzuordnenden Trend entdecken.

Allgemein sollte in den Gebieten der Erde gesucht werden, wo eine im natürlichen System vergleichsweise ruhige Zone mit besonderer Empfindlichkeit gegenüber Konzentrationsänderungen von Spurenstoffen zusammenfällt. Dies machte Naujokat [10] bei der Zeitserienanalyse der Berliner Datenbank zur stratosphärischen Temperatur. Diese sollte nach übereinstimmenden Modellaussagen vor allem in den Tropen, einem sonst „ruhigen“ Gebiet, drastisch zurückgehen. Das Ergebnis der Untersuchung ist negativ, d.h. nach einem mehrere Jahre andauerndem Temperaturfall in den frühen siebziger Jahren erfolgte seit 1975 ein neuerlicher Anstieg. Also ist auch hier die natürliche Fluktuation noch stärker als das  $\text{CO}_2$ -Signal. Nach Labitzke et al. [24] ist die Temperaturänderung in der mittleren Stratosphäre stark von Vulkanstaubschichten geprägt. Die beobachtete Temperaturzunahme läuft gegen das  $\text{CO}_2$ -Signal.

Alle diese negativen Ergebnisse sollten jedoch nicht zu einer Bagatellisierung des Problems verleiten. Die von den – zugegeben noch recht einfachen Modellen – vorhergesagten Temperatur- und vor allem Niederschlagsänderungen [11] sind zu groß, um als harmlos abgetan zu werden. Außerdem läßt die Größenordnung des Signals auf eine baldige Entdeckung hoffen.

### **Ausblick**

Die anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen berühren drei Bilanzen des Klimasystems: Die Strahlungsbilanz, die Wasserbilanz und die Kohlenstoffbilanz. Alle drei Bilanzen beeinflussen sich gegenseitig durch Rückkoppelungen.

Die Strahlungsbilanz reagiert auf  $\text{CO}_2$ -Erhöhungen mit einem Grünhaus-Effekt. Dies gilt als gesichert. Völlig unklar sind hingegen Vorzeichen und Ausmaß der Reaktion im Wasserkreislauf auf eine Temperaturerhöhung. Die Rückkoppelungen der Wolkenverteilung und der Niederschläge sind aber für das Klima kritisch, sie bestimmen letztlich, ob der Grünhaus-Effekt wirklich greifen kann. Der Kohlenstoff-Kreislauf reagiert auf erhöhte  $\text{CO}_2$ -Emissionen mit einer Verstärkung der  $\text{CO}_2$ -Abführung in den Ozean und andere kleine Senken. Die Rate, mit der der Ozean  $\text{CO}_2$  aufnehmen kann, ist durch die chemische Pufferkapazität des Meerwassers und durch die Mischungsgeschwindigkeit des Weltozeans begrenzt. Die Pufferkapazität ist gut bekannt, Unsicherheiten bestehen aber hinsichtlich der Geschwindigkeit, mit der  $\text{CO}_2$  ins Tiefenwasser abgeführt wird. In Entwicklung befindliche numerische Modelle der Ozeanmischung werden hier Verbesserungen gegenüber einfachen Box-Modellen bringen. Noch weniger wissen wir über die Funktion der Biosphäre, die auf die menschlichen Eingriffe eher als weitere  $\text{CO}_2$ -Quelle reagiert, statt zusätzlich  $\text{CO}_2$  zu binden. Ein  $\text{CO}_2$ -Düngeeffekt kann noch nicht als gesichert angenommen werden. Nach wie vor ist daher der anthropogen gestörte Kohlenstoff-Kreislauf nicht im Detail befriedigend zu bilanzieren.

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung ihrer Arbeiten beim Bundesministerium für Forschung und Technologie, bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft, bei den Europäischen Gemeinschaften, beim Gesamtverband des Deutschen Steinkohlebergbaus, beim Scientific Committee on Problems of the Environment, beim Shell Grants Committee, beim Umweltbundesamt und beim United Nations Environmental Program.

1. MacCracken, M.C.: Proc. Carbon Dioxide Res. Conf. CO<sub>2</sub>, Science and Consensus, Berkeley Springs, W. Vir. 1982, CO<sub>2</sub>-021, V. 3-45 (1983)
2. Fabian, H.W.: Naturwissenschaften 67, 109 (1979)
3. World Meteorological Organisation: Report of the meeting of experts on potential climatic effects of ozone and other minor trace gases. — WMO Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 14, Genf 1982
4. Choudhury, B., Kukla, G.: Nature 280, 668 (1979)
5. Plass, G.N.: Tellus 8, 140 (1956)
6. Thompson, S.L., Schneider, S.H.: Nature 290, 9 (1980)
7. Schlesinger, M.E.: Proc. Carbon Dioxide Res. Conf. CO<sub>2</sub>, Science and Consensus, Berkeley Springs, W. Vir. 1982, CO<sub>2</sub>-021, III.3-139 (1983)
8. Manabe, S., Stouffer, R.J.: J. Geophys. Res. 86, 5529 (1980)
9. Labitzke, K.: J. Met. Soc. Japan 60, 124 (1982)
10. Naujokat, B.: J. Geophys. Res. 86, 9811 (1981)
11. Manabe, S., Wetherald, R.T., Stouffer, R.J.: Clim. Change 3, 347 (1981)
12. Ramanathan, V.: J. Atmos. Sci. 38, 918 (1981)
13. Hartmann, D.L., Short, D.A.: ibid. 37, 1233 (1980)
14. Schneider, S.H.: ibid. 29, 1413 (1972)
15. Paltridge, G.: Quatern. J. Roy. Met. Soc. 101, 475 (1975)
16. Mobbs, S.D.: ibid. 108, 535 (1982)
17. Grassl, H.: ibid. 107, 153 (1981)
18. Idso, S.B.: Science 207, 1462 (1980)
19. Idso, S.B.: New Scient. 92, 444 (1981)
20. Newell, R.E., Dopplick, T.G.: J. Appl. Meteor. 18, 822 (1979)
21. Kukla, G., Gavin, J.: Science 214, 497 (1981)
22. Ramanathan, V., Lian, M.S., Cess, R.D.: J. Geophys. Res. 84, 4949 (1979)
23. Zwally, H.J., Parkinson, C.L., Comiso, J.C.: Science 220, 1005 (1983)
24. Labitzke, K., Naujokat, B., McCormick, P.: Geophys. Res. Lett. 10, 24 (1983)

Eingegangen am 11. August 1983