Zeitschrift: Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 163 (1983)

Artikel: CO2-Anstieg und Klimaveränderung

Autor: Sigenthaler, Ulrich

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-90903

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

CO_2-Anstieg und Klimaveränderung

Ulrich Siegenthaler

Zusammenfassung

In den letzten 150 Jahren ist die atmosphärische Konzentration des Kohlendioxids (CO_2) von etwa 270 ppm auf 340 ppm angestiegen. Die Ursache des Anstiegs sind die Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie Entwaldungen und die landwirtschaftliche Nutzung von Böden. Ein weiterer CO_2-Anstieg kann zu globalen Klimaänderungen führen (Treibhauseffekt); die beobachtete Erwärmung der letzten 100 Jahre ist möglicherweise durch das CO_2 verursacht. Die zukünftige Entwicklung hängt vor allem vom Verbrauch fossiler Energieträger ab. Die Auswirkungen sind nur teilweise und nur langsam reversibel, weil das zusätzliche CO_2 aus der Atmosphäre nur langsam in den Ozean verschwinden wird.

Résumé

Pendant les dernières 150 années, la concentration atmosphérique de gaz carbonique (CO_2) a augmenté d'environ 270 ppm à 340 ppm. Cette croissance est causée par la combustion de combustibles fossiles ainsi que par la destruction de forêts et l'exploitation agricole du sol. Une croissance continue peut mener à des modifications du climat global (effet de serre); il semble possible que le réchauffement observé pendant le dernièr siècle soit causé par le CO_2. Le développement futur depend surtout de la production d'énergie par les combustibles fossiles. Les effets ne sont que partiellement et lentement réversibles, parce que le CO_2 additionnel ne passera que lentement de l'atmosphère à l'océan.

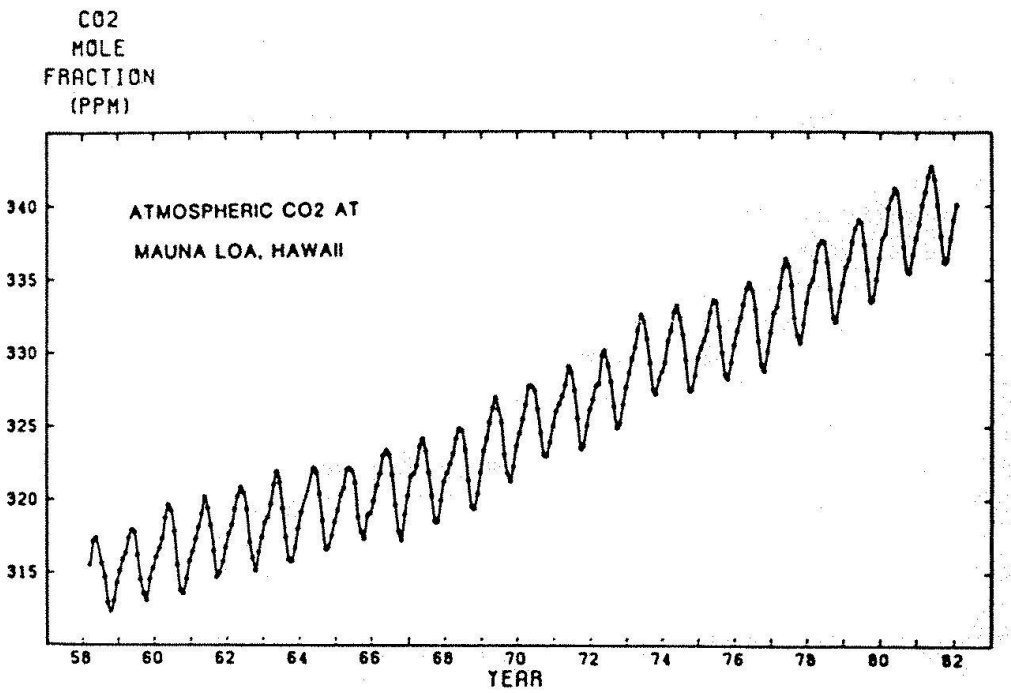

Abb. 1 Atmosphärische CO_2-Konzentration, gemessen im Observatorium Mauna Loa, Hawaii. Einheit: ppm (parts per million; Volumenanteil). Die regelmässigen Jahresschwankungen werden durch den Photosynthese-Respirationszyklus der Vegetation der Nordhalbkugel verursacht.

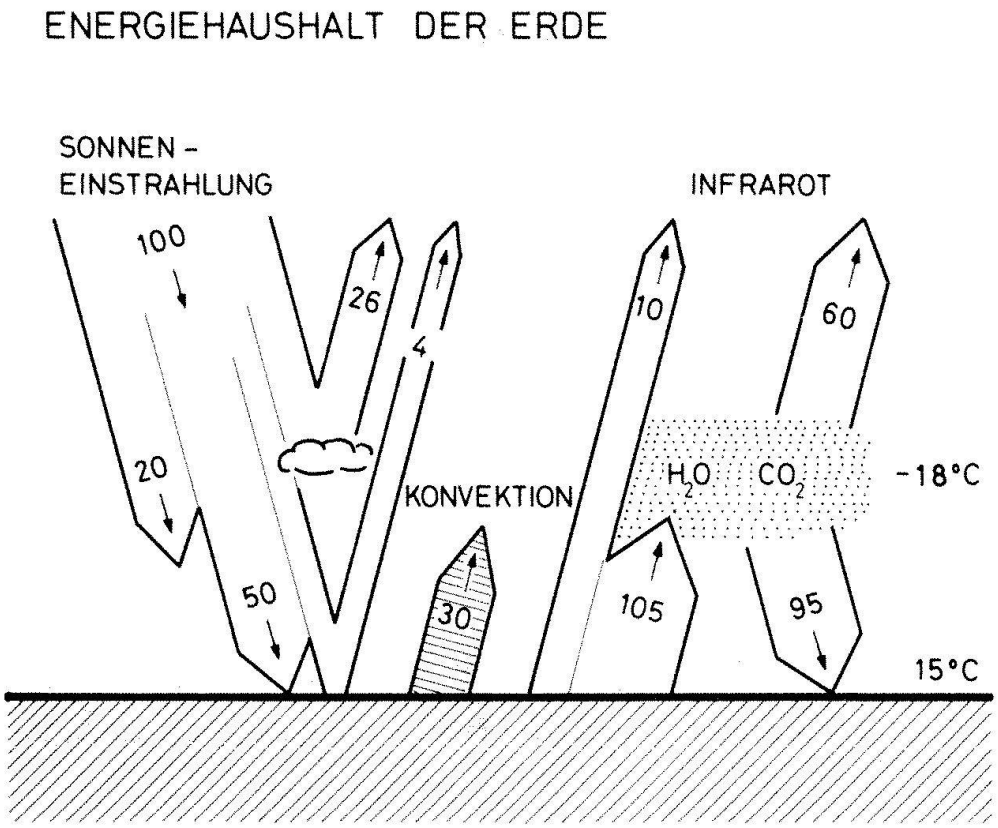

Abb. 2 Energiehaushalt der Erde; Sonneneinstrahlung am obern Rand der Atmosphäre = 100 Einheiten. Die wolkenfreie Atmosphäre ist durchlässig für Sonnenlicht, aber nur teilweise für Infrarotstrahlung. Zusätzlich zur Sonneneinstrahlung erhält die Oberfläche Infrarot- = Wärmestrahlung aus der Atmosphäre (Treibhauseffekt). Ausstrahlungstemperatur der Erde: -18°C, mittlere Oberflächentemperatur: +15°C.

Einleitung

Kohlendioxid (CO_2) ist in der Atmosphäre nur in geringer Konzentration vorhanden. Dennoch ist es in zweierlei Hinsicht für das Leben auf der Erde von grosser Bedeutung. Es ist ein Grundnährstoff für die Pflanzen, die bei der Photosynthese im wesentlichen aus CO_2 und Wasser organisches Material bilden. Zum andern beeinflusst das CO_2 als infrarotaktives Gas das Klima der Erde.
Die Menschheit hat ungewollt in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf eingegriffen. Durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen – Kohle, Erdöl und Erdgas – sind riesige Mengen CO_2 produziert worden. In der Folge ist die atmosphärische CO_2-Konzentration seit Beginn der Industrialisierung von etwa 0,027 % oder 270 ppm (= parts per million) bis 1980 auf 338 ppm angestiegen. Messungen, die seit 25 Jahren von Prof. C.D. Keeling und seinen Mitarbeitern auf Mauna Loa, Hawaii, und am Südpol vorgenommen werden, zeigen die kontinuierliche Zunahme deutlich (Abb. 1). In den letzten zehn Jahren sind zahlreiche weitere CO_2-Messstationen dazugekommen, die zeigen, dass Mauna Loa und Südpol repräsentativ für die ganze Atmosphäre sind.

Die Veränderung der CO_2-Konzentration beeinflusst den Strahlungshaushalt der Erde, und ein fortdauernder Anstieg wird vermutlich in absehbarer Zeit zu merklichen globalen Klimaänderungen führen. Modellrechnungen ergeben, dass diese Änderungen auch nach einem CO_2-Produktionsstopp nur teilweise und nur langsam reversibel sind. Die geschätzten Vorräte an fossilen Brennstoffen entsprechen etwa der achtfachen CO_2-Menge in der vorindustriellen Atmosphäre. Es stellt sich die Frage, ob diese grossen Vorräte weiterhin unkontrolliert verbraucht werden dürfen.

Der Treibhauseffekt

Der Energiehaushalt der Erde wird bestimmt durch die einfallende Sonnenstrahlung und die von der Erde emittierte Wärmestrahlung (Abb. 2). Rund 30 % der gesamten Einstrahlung wird reflektiert, der Rest von der Atmosphäre oder der Oberfläche absorbiert. Entsprechend der mittleren Temperatur von 288 K (15 °C) der Erdoberfläche liegt die Wärmestrahlung im Infraroten. Während die wolkenfreie Atmosphäre für das Sonnenlicht fast völlig transparent ist, absorbieren (und

reemittieren) Wasserdampf, CO_2 und verschiedene Spurengase im Infraroten. Die Reemission erfolgt sowohl nach unten wie nach oben. Somit erhält die Erdoberfläche neben der Sonnenbestrahlung zusätzlich Infrarotstrahlung und ist wärmer als sie es ohne infrarotaktive Gase wäre; dies ist der sogenannte Treibhauseffekt. Die aus der Atmosphäre in den Weltraum ausgesandte Strahlung stammt im Mittel aus mehreren km Höhe, wo es kälter als an der Oberfläche ist. Die Strahlungstemperatur der Erde ist denn auch etwa 33 K niedriger als die mittlere Oberflächentemperatur. Atmosphärisches CO_2 und Wasserdampf wirken also gewissermassen als Wärmeisolation.

Bei einem erhöhten CO_2-Pegel wird zunächst weniger Infrarot in den Weltraum abgestrahlt. Die Erdoberfläche und die untern Luftschichten erwärmen sich und senden mehr Wärmestrahlung aus, bis sich ein neues Gleichgewicht mit der Sonneneinstrahlung einstellt. Für eine quantitative Abschätzung geht man davon aus, dass die Wärmestrahlung F pro Oberflächeneinheit für einen schwarzen Körper der Temperatur T gegeben ist durch $F = \sigma T^4$. Die Abstrahlung der Erde am obern Rand der Atmosphäre beträgt etwa 240 W/m^2, entsprechend T = 255 K (-18°C). Im Gleichgewicht muss die mittlere Ausstrahlung der Erde gleich dem absorbierten Bruchteil der Sonneneinstrahlung S sein (A = Albedo, Reflexionsvermögen der Erde):

$$S(1 - A) = F = \sigma T^4$$

Detaillierte Rechnungen ergeben, dass bei einer CO_2-Verdoppelung die Infrarot-Ausstrahlung um etwa 4,4 W/m^2 verringert wird (Augustsson und Ramanathan 1977). Durch Differenzieren erhält man für die relative Infrarot-Flussänderung $\Delta F/F = 4\Delta T/T$; somit muss, um die Infrarot-Flussänderung wettzumachen, die Temperatur zunehmen um

$$\Delta T = \frac{1}{4} \cdot 255\ K \cdot \frac{4.4\ W/m^2}{240\ W/m^2} = 1.2\ K$$

Verschiedene Rückkopplungseffekte verstärken aber die Temperaturänderung. So nimmt bei einer Erwärmung die Wasserdampfkonzentration zu, da die Atmosphäre die Tendenz hat, die relative Feuchtigkeit konstant zu halten. Wasserdampf ist infrarotaktiv und verstärkt den Treibhauseffekt, gemäss Modellrechnungen um etwa einen Faktor 1,7 (Dickinson 1982). Weiter bewirkt die hohe Albedo von Schnee und Meereis eine positive Rückkopplung: Bei der Erwärmung werden gewisse Gebiete frei von Schnee resp. Eis, dort wird die Albedo drastisch verringert und somit mehr Sonnenstrahlung absorbiert. Der Verstärkungsfaktor für diesen Rückkopplungseffekt beträgt etwa 1,2. Unter Berücksichtigung dieser zwei Effekte erhält man für CO_2-Verdoppelung bei Strahlungsgleichgewicht eine mittlere Erwärmung um etwa 2,4 K.

Diese Abschätzung stimmt gut überein mit den Resultaten von detaillierten Klimamodellen, einschliesslich dreidimensionalen allgemeinen Zirkulationsmodellen, die Werte zwischen 1,5 und 4 K für CO_2-Verdoppelung vorhersagen. Der relativ grosse Bereich führt daher, dass bezüglich gewisser Prozesse, etwa das Verhalten der Wolkenbedeckung, noch Unsicherheiten bestehen. Dies darf angesichts der Komplexität des globalen Klimasystems nicht erstaunen.

Diese Resultate sind von einzelnen Forschern angezweifelt worden, die für die Temperaturänderung Werte erhielten, die um eine Grössenordnung niedriger sind (Idso 1980). Der scheinbare Widerspruch rührt von zwei Fehlüberlegungen her: erstens von einem unzulässigen Vergleich mit jahreszeitlichen Temperaturvariationen (die durch die Wärmekapazität des Ozeans stark gedämpft sind) und zweitens von der Vernachlässigung wichtiger Rückkopplungseffekte (Wasserdampf-Treibhauseffekt).

Die obige Diskussion geht von der Annahme aus, dass Strahlungsgleichgewicht herrscht. Dieses wird aber bei einer Störung erst nach langer Zeit erreicht; zuerst müssen die verschiedenen Wärmespeicher des irdischen Klimasystems, insbesondere der Ozean, aufgeheizt werden. Abb. 3 zeigt den modellmässig berechneten Temperaturanstieg für den Fall, dass zur Zeit Null eine sprungartige CO_2-Verdoppelung einträte. Die grosse Wärmekapazität des Ozeans bewirkt, dass die Gleichgewichtstemperatur erst nach Jahrhunderten erreicht wird. Dies gilt natürlich nicht nur für CO_2-bedingte, sondern für alle

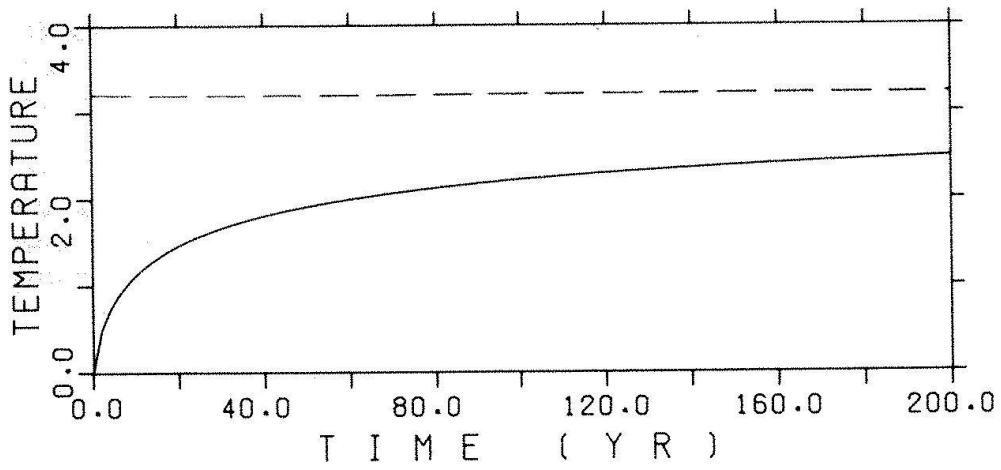

Abb. 3 Modellmässig berechneter Temperaturanstieg für eine plötzliche CO_2-Verdoppelung zur Zeit 0. Gestrichelt: für Strahlungsgleichgewicht (+3,2 K); ausgezogen: unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Ozeans (Siegenthaler und Oeschger 1984).

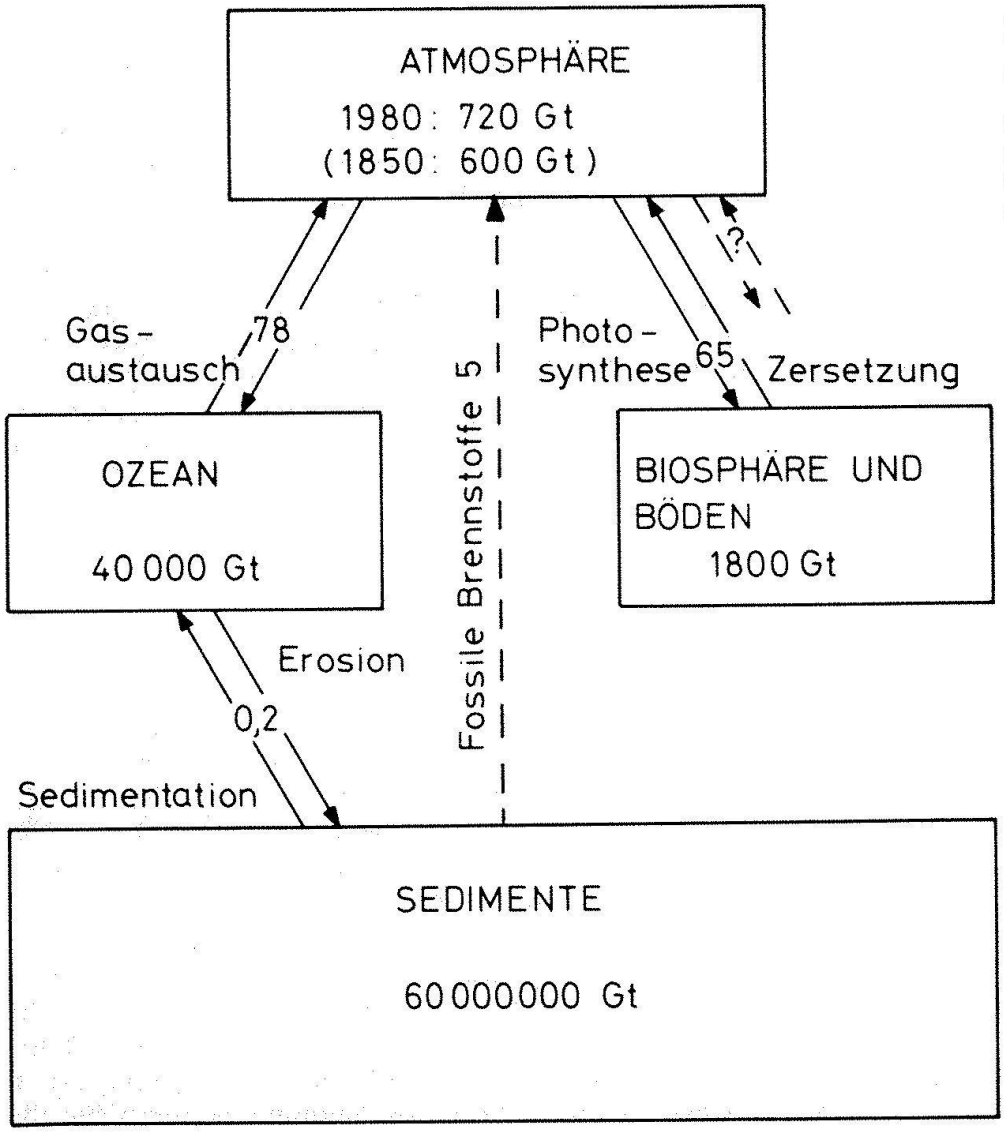

Abb. 4 Kohlenstoffreservoirs und Austauschflüsse. Mengen in Gt C (1 Gt = 1 Gigatonne = 10^9 t), Flüsse in Gt C/a. Ausgezogene Pfeile: natürliche Flüsse; gestrichelte Pfeile: zusätzliche Flüsse.

Störungen des Strahlungshaushaltes der Erde.
Neben CO_2 tragen auch Spurengase, die bei verschiedenen menschlichen Tätigkeiten entstehen, wie Stickoxydul (N_2O), Methan und Freone, zum Treibhauseffekt bei. Es ist geschätzt worden, dass sie zukünftig die CO_2-bedingte Temperaturveränderung um mehrere 10 % erhöhen könnten.

Der globale Kohlenstoffkreislauf

Das CO_2 der Atmosphäre befindet sich im Austausch mit dem Karbonatsystem des Ozeans sowie mit der Land- und Meeresbiosphäre (Abb. 4). Die Kohlenstoffmengen in Atmosphäre und Ozean sind durch Messungen gut bekannt; schwieriger ist, wegen ihrer Heterogenität, die Abschätzung der Menge für die Biosphäre (Landvegetation). Auch die Sedimente bilden ein riesiges Kohlenstoffreservoir, doch ist der natürliche Austausch mit ihnen so langsam, dass er für das CO_2-Problem vernachlässigt werden kann.
Die heutigen Vorräte an Kohle, Erdöl und Erdgas entstanden über geologische Zeiträume. Ihre Nutzung bedeutet die schnelle Rückführung von sedimentärem organischem Kohlenstoff in die Atmosphäre und zugleich die Zerstörung von Vorräten, die erst in geologischen Zeitspannen wieder nachgebildet werden.
Ein Vergleich der aus fossilen Brennstoffen von 1959 bis 1978 erzeugten Menge CO_2 mit dem atmosphärischen Anstieg zeigt, dass etwa 55 % oder gut die Hälfte in der Atmosphäre verblieben ist. Der Rest ist im Ozeanwasser aufgelöst worden, ein kleiner Teil vielleicht auch durch vermehrtes Pflanzenwachstum in die Biosphäre gelangt. Der Ozean könnte an sich wesentlich mehr, fast 90 % der produzierten Menge, aufnehmen, doch wird es viele Jahrhunderte dauern, bis das zusätzliche CO_2 in die Tiefsee hinunter gemischt worden ist. Über die CO_2-Austauschrate zwischen Atmosphäre und Ozean sowie die Mischungszeiten des Ozeanwassers weiss man dank ^{14}C-Messungen an Meerwasserproben aus verschiedenen Tiefen relativ gut Bescheid. Das radioaktive Kohlenstoff-Isotop ^{14}C (Halbwertszeit 5730 a) wird durch die kosmische Strahlung in der Atmosphäre erzeugt. Gelangt Wasser von der Ozeanoberfläche in die Tiefe, so wird kein ^{14}C mehr nachgeliefert und die darin enthaltene Menge ^{14}C nimmt infolge des radioaktiven Zerfalls nach einer bekannten Gesetzmässigkeit ab; aus dem noch vorhandenen ^{14}C-Gehalt lässt sich das Alter des Wassers ermitteln, also die Zeit, seit welcher es die Oberfläche verlassen hat. Das Tiefenwasser des Atlantischen Ozeans ist einige hundert, jenes des Pazifischen Ozeans über tausend Jahre alt.
Für den Kohlenstoff-Kreislauf spielt die Pflanzenwelt eine grosse Rolle. Kohlendioxid ist, neben Wasser, das Grundnahrungsmittel für die Planzen: Bei der Photosynthese wird es umgewandelt zu organischem Pflanzenmaterial, wobei eine entsprechende Menge Sauerstoff erzeugt wird. Der jahreszeitliche Zyklus der Biosphäre widerspiegelt sich deutlich in der atmosphärischen CO_2-Konzentration (Abb. 1): In der Wachstumsperiode entzieht die Vegetation der Atmosphäre CO_2 und die Konzentration sinkt, im Winter zerfällt organisches Material, wodurch der Atmosphäre wieder CO_2 zugefügt (und Sauerstoff entzogen) wird. Ohne menschliche Eingriffe bleibt die Biomasse im Jahresmittel konstant, so dass die Biosphäre netto weder eine Quelle noch eine Senke für CO_2 darstellt. Ebenso heben sich im Mittel Sauerstoff-Produktion und -Verbrauch (bei der oxidativen Zersetzung von organischem Material) auf; andernfalls würde ja die atmosphärische Sauerstoffmenge allmählich zu- oder abnehmen. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass der Luftsauerstoff nicht in Gefahr ist, weder durch Energienutzung noch durch die Zerstörung von Wäldern. Die dabei verbrauchten Mengen sind immer noch winzig im Vergleich zum gesamten Sauerstoff der Atmosphäre.
Um die CO_2-Aufnahme durch Ozean und den Einfluss der Biosphäre abschätzen zu können, braucht man ein mathematisch-physikalisches Modell des irdischen Kohlenstoff-Kreislaufs. Dabei ist es unmöglich, sämtliche Einzelheiten nachzubilden; man muss sich mit groben Vereinfachungen zufrieden geben. Das Problem besteht darin, die wesentlichen Vorgänge zu erkennen und zu berücksichtigen, aber zugleich auch abzuschätzen, wie gross die Fehler sein könnten, die man durch die notwendigen Vernachlässigungen begeht. Die heute bestehenden Modelle (Broecker et al. 1979, Siegenthaler 1983) simulie-

ren die CO_2-Aufnahme durch den Ozean vermutlich einigermassen richtig. Leider ist es nicht möglich, die CO_2-Zunahme im Meerwasser mit befriedigender Genauigkeit zu messen, denn biologische Prozesse erzeugen räumliche Konzentrationsunterschiede, die gross sind gegenüber den anthropogenen Zunahmen. Jedoch können die Modelle anhand von ^{14}C-Messungen getestet werden. Durch Verdünnung mit fossilem CO_2 sank die atmosphärische ^{14}C-Konzentration bis 1950 leicht ab; infolge der Wasserstoffbomben-Tests stieg sie danach stark an. Die CO_2-Modelle erlauben es, auch diese Störungen befriedigend zu simulieren, was das Vertrauen in sie stärkt.

Die Rolle der Biosphäre ist noch nicht sehr gut bekannt. Stark diskutiert wird gegenwärtig, ob nicht durch Waldrodung im grossen Massstab, z. B. in Südamerika, beachtliche Mengen Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangen, da ein grosser Teil der zerstörten Biomasse durch Feuer oder durch Vermodern in CO_2 umgewandelt wird. Die Ermittlung dieses CO_2-Flusses in die Atmosphäre ist mit grossen Unsicherheiten behaftet, und die Schätzungen verschiedener Autoren unterscheiden sich zum Teil stark. Die neueren Schätzungen konzentrieren sich in einem Bereich von 1-2,5 Gt C/a (zum Vergleich: Verbrennung fossilen Kohlenstoffs knapp 5 Gt C/a). Eine neue Studie (Richards et al. 1983) schätzt, dass durch Oxidation von lebender und toter Biomasse (inkl. Böden) infolge menschlicher Nutzung von 1860 bis 1920 etwa 29 Gt und von 1920 bis 1978 etwa 33 Gt Kohlenstoff in CO_2 umgewandelt wurden.

Tab. 1. Budget der CO_2-Störungen, in Gt C/a (1 Gt = 10^9 Tonnen); Mittelwerte für 1970–1978. Die fehlende Senke ist vermutlich in der Landbiosphäre zu suchen (Wiederbewaldung; CO_2-Düngung).

CO_2-Produktion	
Fossile Brennstoffe	4.6
Zerstörung von Biomasse	1.0–2.5
	5.6–7.1
Verteilung	
Atmosphäre (beobachtet)	2.5
Ozean (Modellrechnung)	1.8–2.2
	4.3–4.7
Fehlende Senke (Differenz)	0.9–2.8

Die Mengen produzierten fossilen Kohlendioxids für die gleichen Zeitspannen betragen 25 Gt resp. 121 Gt C. Vermutlich sind also schon im 19. und frühen 20. Jahrhundert recht grosse Mengen von nicht-fossilem CO_2 in die Atmosphäre gelangt, während der Beitrag aus Fossilenergienutzung noch relativ klein war.

In Tab. 1 ist eine Bilanz für die Störungen der Kohlenstoff-Flüsse gemäss den heutigen Kenntnissen aufgestellt. Einer jährlichen Produktionsrate von 5,6 bis 7,1 Gt C steht ein Kohlenstoffzuwachs in Atmosphäre plus Ozean von 4,3 bis 4,7 Gt C gegenüber; es scheint also eine CO_2-Senke von 0,9 bis 2,8 Gt C/a zu fehlen. Vermutlich ist diese Senke in der Landbiosphäre zu suchen. Einerseits bewirkt die erhöhte CO_2-Konzentration eine vermehrte biologische Produktivität; andererseits wird Kohlenstoff fixiert durch die Wiederbewaldung von früher gerodeten und jetzt nicht mehr landwirtschaftlich genutzten Gebieten (z. B. in gemässigten Breiten der Nordhemisphäre). Der CO_2-Düngungseffekt ist vom Labor her gut bekannt, doch ist nicht klar, wie wichtig er in der Natur ist, wo andere Faktoren – wie Licht oder Platz – begrenzend sind. Es gibt einen indirekten Hinweis darauf, dass die biologische Aktivität in den letzten 25 Jahren stärker geworden ist: Die Amplitude der CO_2-Jahresschwankungen nahm auf Mauna Loa (und an anderen Messstationen) signifikant zu. Dies lässt vermutlich auf eine Intensivierung des Vegetationsumsatzes in der Nordhemisphäre schliessen.

Um die bestehenden Wissenslücken zu schliessen, braucht es noch grosse Forschungsanstrengungen betreffend die Rolle der Landbiosphäre, aber auch betreffend das Zusammenspiel von physikalischen, chemischen und biologischen Vorgängen im Ozean.

Bisherige und zukünftige Klimaauswirkungen von CO_2

Sind CO_2-bedingte Klimaänderungen bereits zu beobachten? Diese Frage lässt sich heute noch nicht mit Sicherheit beantworten. Abb. 5 illustriert die Problematik. Die modellmässig berechnete Erwärmung hängt von der vorindustriellen CO_2-Konzentration c_0 ab. Bis vor kurzer Zeit wurde allgemein ein Wert

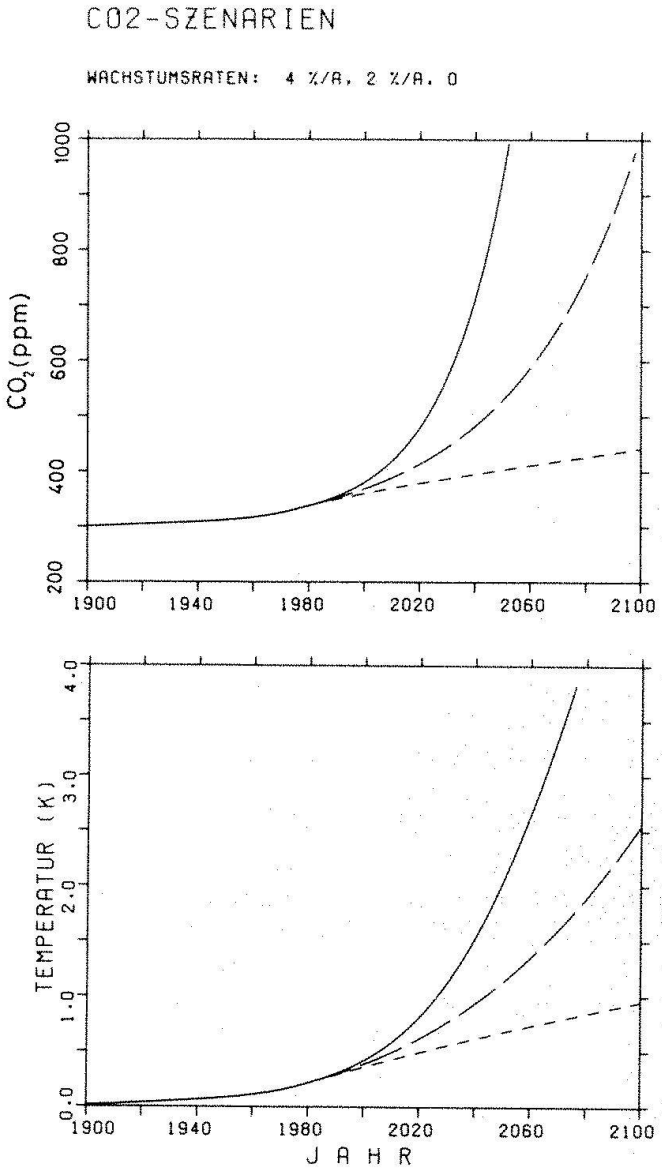

Abb. 5 Beobachteter mittlerer Temperaturverlauf für die Nordhemisphäre («observed»; nach Jones et al. 1982) und modellmässig berechneter Verlauf infolge des CO_2-Anstiegs. Vorindustrielle CO_2-Konzentration c_0 für die Modellkurven 297 ppm, entsprechend CO_2-Produktion nur aus fossilen Brennstoffen, resp. 265 ppm, gemäss Messungen an Eisbohrkernen.

zwischen 290 und 300 ppm angenommen, was mit einer Rückwärts-Extrapolation der Mauna-Loa-Daten unter der Annahme, dass nur fossile Brennstoffe zum Anstieg beitrugen, übereinstimmt. Für $c_0 = 297$ ppm ergibt die Modellrechnung eine Erwärmung um 0,20 K bis 0,26 K bis 1980. Die beiden Werte bilden dabei eine untere und eine obere Grenze, entsprechend den bestehenden Unsicherheiten. (In Abb. 5 ist die Modellkurve für den höheren Temperaturanstieg gegeben.) CO_2-Messungen an Luftblasen in altem Polareis (vgl. Stauffer, in diesem Band) ergeben aber einen Wert zwischen 260 und 270 ppm. Diese tiefere Konzentration lässt übrigens darauf schliessen, dass bereits im 19. und im frühen 20. Jahrhundert bedeutende CO_2-Mengen in die Atmosphäre freigesetzt wurden, wofür Waldrodungen und Bodennutzung verantwortlich sein müssen.

Für eine angenommene vorindustrielle Konzentration von 265 ppm ergibt die Modellrechnung eine Erwärmung zwischen 0,46 K und 0,62 K. Dabei wurde die Verzögerung durch die Wärmekapazität des Ozeans berücksichtigt.

Der beobachtete mittlere Temperaturtrend für die Nordhemisphäre (Figur 5; nach Jones et al. 1982) zeigt tatsächlich einen Anstieg seit dem Ende des 19. Jahrhunderts. Allerdings verläuft er keineswegs so regelmässig wie die CO_2-Modellkurven: so sank die Temperatur von 1940 bis nach 1960 ab, und weiter sind kurzfristige Schwankungen zu beobachten. Offensichtlich haben neben dem CO_2 noch weitere Faktoren, wie Vulkanstaub in der Stratosphäre oder vielleicht veränderliche Sonnenausstrahlung, das Klima der Erde beeinflusst. Um den CO_2-Effekt nachzuweisen, muss man diese anderen Einflüsse mit einiger Zuverlässigkeit kennen und aus den Beobachtungen herausfiltern. Versuche in dieser Richtung sind unternommen worden (Hansen et al. 1981), doch bleiben noch zu viele Unsicherheiten, um die Erwärmung der letzten 100 Jahre eindeutig als Folge des CO_2-Anstiegs zu bezeichnen. Immerhin entspricht der langfristige Temperaturtrend dem, was aufgrund der Modellrechnungen für einen relativ niedrigen vorindustriellen CO_2-Gehalt erwartet wird. Einigermassen zuverlässige Aussagen dazu dürften in etwa 10 bis 15 Jahren möglich sein.

Mit Hilfe der Kohlenstoffkreislauf- und der Klimamodelle lassen sich zukünftige CO_2-Konzentrationen und die entsprechenden globalen Temperaturänderungen abschätzen. Dabei muss man sich auf Energieszenarien abstützen, die naturgemäss weitgehend Ermessensfragen sind. In Abb. 6 sind CO_2- und Temperaturvorhersagen für drei Szenarien der zukünftigen CO_2-Produktion angegeben (vor 1980: historische Produktionsraten):

- Produktionsrate konstant auf dem Wert von 1980;

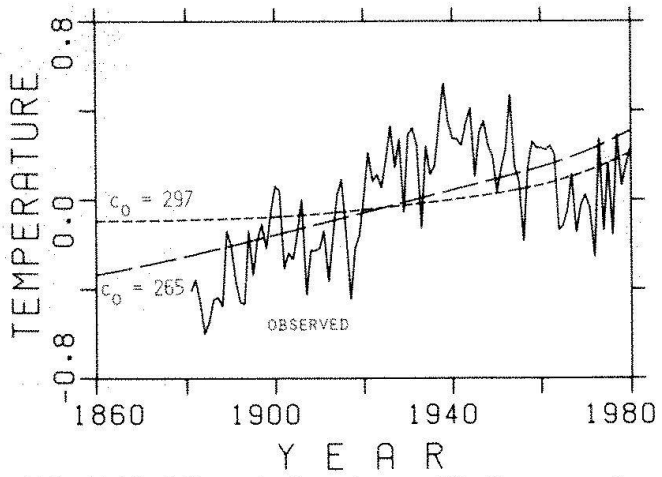

Abb. 6 Modellmässig berechnete CO_2-Konzentration und Temperaturanstieg für drei Energieverbrauchsszenarien: CO_2-Produktion nach 1980 konstant (kurz gestrichelt), exponentiell zunehmend mit Wachstumsrate 2%/a (lang gestrichelt) resp. 4%/a (ausgezogen). Die Wärmekapazität des Ozeans ist im Modell berücksichtigt.

- Produktionsrate exponentiell ansteigend, Wachstum 2%/Jahr;
- Produktionsrate exponentiell ansteigend, Wachstum 4%/Jahr.

Gemäss dem mittleren Szenarium würde eine CO_2-Verdoppelung etwa um 2060 erfolgen, und die mittlere globale Erwärmung betrüge dann etwa 1,4 K (geschätzte Unsicherheit: ± 0,7 K). Diese Erwärmung scheint vielleicht nicht besonders gross, doch zeigt ein Vergleich mit der Klimageschichte das Gegenteil: In den letzten 100000 Jahren lag die Temperatur der Erde nie mehr als etwa 1,5 K über der heutigen. Selbst nach dem mässigen 2%/Jahr-Szenarium riskieren wir also, in 100 Jahren infolge des CO_2-Anstieges eine wärmere Erde als je seit der letzten Zwischeneiszeit (ca. 125000 Jahre vor heute) zu haben.

Bemerkenswert in Abb. 6 ist ferner, dass auch bei konstanter Produktion die CO_2-Konzentration und damit die Temperatur weiter ansteigen werden; und selbst bei völligem Produktionsstopp würde die Konzentration nur langsam zurückgehen – so langsam, dass der CO_2-Anstieg als (teilweise) irreversibel bezeichnet werden muss.

3-dimensionale Modelle ergeben in Polargebieten eine wesentlich stärkere Erwärmung als im gemässigten und äquatorialen Breiten. Dies ist für das Meereis von Bedeutung, das relativ empfindlich auf Klimaänderungen reagiert. Langfristig könnte eine starke Erwärmung zum Abschmelzen der Polareiskappen führen; allerdings wäre dies vermutlich nicht eine Sache der näheren Zukunft, sondern von Jahrhunderten.

Bei klimageschichtlichen Diskussionen spricht man im Zusammenhang mit einer Erwärmung oft von einer Klimaverbesserung. In der Tat mag eine wärmere Erde in einigen Gegenden zu besseren Lebensbedingungen führen. Jedoch haben sich Wirtschaft und Gesellschaft den heutigen klimatischen Bedingungen angepasst; es ist daher zu vermuten, dass eine signifikante Klimaänderung – in welcher Richtung auch immer – sich ungünstig auswirken würde.

Dabei sind andere Klimafaktoren vielleicht wichtiger als die Temperatur. Eine globale Erwärmung wäre wahrscheinlich begleitet von einer Verschiebung der Klimazonen in Richtung Pole, und in den heutigen Landwirtschaftsgebieten würden sich andere Umweltbedingungen, insbesondere eine andere Niederschlagsverteilung, einstellen. Damit würde eine Anpassung an die neuen Bedingungen, z. B. eine Verlagerung von Anbauflächen, innert relativ kurzer Zeit notwendig, was zu ernsten Problemen, insbesondere für die Nahrungsversorgung, führen könnte. Für eine Simulation der Niederschlagsveränderungen sind 3-dimensionale allgemeine Zirkulationsmodelle erforderlich. Erste Resultate liegen vor, doch bestehen bei der Modellierung des atmosphärischen Wasserkreislaufes noch grosse Schwierigkeiten, so dass sie noch nicht zuverlässig sind.

Es stellt sich die Frage, wie die Menschheit auf die Gefahr von globalen Klimaänderungen reagiert. Es bestehen zwei Möglichkeiten: Entweder man akzeptiert die vorausgesagten Klimaveränderungen und versucht sich anzupassen, oder man bemüht sich, eine solche zu vermeiden. Beides bedeutet einen grossen Aufwand. Um einen möglicherweise fatalen CO_2-Anstieg zu vermeiden, darf der globale Fossilenergie-Verbrauch nicht wie bis anhin weiter ansteigen. Dazu sind einerseits Energiesparmassnahmen, andererseits das Ausweichen auf andere Energieformen notwendig. In Anbetracht des Nachholbedarfs der Entwicklungsländer ist es fraglich, ob dieses Ziel erreicht werden kann. Bei einer Anpassungsstrategie andererseits kennt man, jedenfalls beim heutigen Wissenstand, die

zukünftigen Probleme zu wenig genau, als dass man wirksam vorsorgen könnte.
Eine einfache Lösung des CO_2-Problems ist also nicht in Sicht. Eines aber ist klar: Man darf nicht zuwarten, bis die vermuteten Klimafolgen eintreten und erst dann handeln; denn die atmosphärische CO_2-Konzentration wird selbst nach einem völligen Produktionsstopp während vieler Generationen deutlich über dem vorindustriellen Wert bleiben. Die CO_2-Heizung lässt sich nicht einfach wieder abstellen!

Literatur

Augustsson, T., Ramanathan, V. 1977: A radiative convective model study of the CO_2 climate problem. J. Atmos. Sci., Band 34, 1977, 448-451.

Broecker, W.S., Takahashi, T., Simpson, H.J., Peng, T.-H. 1979: Fate of fossil fuel carbon dioxide and the global carbon budget. Science, Band 206, 1979, 409-418.

Dickinson, R.E. 1982: Modeling climate changes due to carbon dioxide increases. In «Carbon Dioxide Review: 1982», Herausg. W.C. Clark, 103-133, Clarendon Press (Oxford).

Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D., Russel, G. 1981: Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. Science, Band 213, 1981, 957.

Idso, S.B. 1980: The climatological significance of a doubling of earth's atmospheric carbon dioxide concentration. Science, Band 207, 1462/3. - Entgegnungen: Science, Band 210, 1980, 6-8.

Jones, P.D., Wigley, T.M.L., Kelly, P.M. 1982: Variations in surface air temperatures: Part 1. Northern hemisphere, 1881-1980. Monthly Weather Review, Band 110, 1982, 59-69.

Richards, J.F., Olson, J.S., Rotty, R.M. 1983: Development of a data base for carbon dioxide releases from conversion of land to agricultural uses. Bericht Institute for Energy Analyses, Oak Ridge Assoc. Univ., Oak Ridge, ORAU/IEA-82-10 (M).

Siegenthaler, U. 1983: Uptake of excess CO_2 by an outcrop-diffusion model of the ocean. J. Geophys. Res., Band 88, 1983, 3599-3608.

Siegenthaler, U., Oeschger, H. 1984: Transient temperature changes due to increasing CO_2 using simple models. Annals of Glaciology, Band 5, 1984, 153-159.

PD Dr. Ulrich Siegenthaler
Physikalisches Institut
der Universität Bern
Sidlerstrasse 5
CH-3012 Bern