

Der Anstieg des atmosphärischen Kohlendioxids

F. Joos und J. L. Sarmiento

Beobachtungen lassen heute keine Zweifel mehr daran zu, daß der atmosphärische CO₂-Gehalt seit Beginn der Industrialisierung um beinahe 30 % zugenommen hat. Wir verfügen heute über ein gutes Verständnis der meisten Prozesse, die zu diesem Anstieg geführt haben. Die wichtigste Quelle, die Freisetzung von CO₂ durch die Verbrennung fossiler Energieträger, ist gut bekannt, und die CO₂-Aufnahme durch den Ozean wird ebenfalls relativ gut verstanden. Die größten Probleme gibt es bezüglich der Landbiosphäre. Diese wirkt sowohl als Senke als auch als Quelle für atmosphärisches CO₂. Zusätzliches CO₂ wird aufgrund von Prozessen, die man nur schlecht versteht, in der Biosphäre gespeichert, aber auch durch Abholzungen in den Tropen und Änderungen in der Landnutzungspraxis freigesetzt.

Die gut bekannte und direkte Wirkung dieser erhöhten CO₂-Werte ist die verstärkte Absorption der von der Erde abgestrahlten Infrarotstrahlung. Unsicher ist jedoch, wie sich diese erhöhte Absorption genau auf das Klima auswirkt. Die meisten Wissenschaftler sind sich aber einig, daß eine globale Erwärmung resultieren wird. Wegen der zu erwartenden Klimaveränderung und weil der CO₂-Gehalt durch die fortdauernde Emission weiter ansteigt, ist es außerordentlich wichtig, die Prozesse zu verstehen, welche den atmosphärischen Kohlenstoffhaushalt in den nächsten Jahrzehnten regulieren. Im folgenden fassen wir Beobachtungen und Ergebnisse zusammen, die zum heutigen Verständnis der Ursachen des beobachteten CO₂-Anstiegs geführt haben.

Dr. Fortunat Joos, Physikalisches Institut der Universität Bern, Abt. Klima- und Umweltphysik, CH-3012 Bern. – Prof. Dr. Jorge L. Sarmiento, Atmospheric and Oceanic Sciences Program, Princeton University, Princeton, NJ 08544, 1994/1995 Gastprofessor am Physikalisches Institut der Universität Bern.

1896: Arrhenius postuliert globale Klimaveränderungen

Im Jahre 1896 postulierte der spätere schwedische Chemie-Nobelpreisträger Svante Arrhenius, daß Kohlendioxid, freigesetzt durch die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, die Transparenz der Erdatmosphäre verändert und eine in der Geschichte der Menschheit noch nie erfahrene Erwärmung der Erde verursachen könnte [1]. (Grundlegende Informationen und Referenzen findet man in den Übersichtsarbeiten [2–5].)

Die Grundlagen der Treibhaustheorie wurden bereits siebzig Jahre früher durch den französischen Mathematiker Jean-Baptiste-Joseph Fourier gelegt. Er erkannte, daß einige atmosphärische Gase das Potential haben, die von der Erdoberfläche und den unteren Luftschichten abgegebene Wärmestrahlung zu absorbieren und wieder Richtung Erde zurückzustrahlen. Damit erhält die Erdoberfläche zusätzlich zur Energie des kurzwelligigen Sonnenlichts Energie in Form einer längerwelligen Gegenstrahlung. Ohne diese natürlichen „Treibhausgase“, von denen Wasserdampf das wichtigste ist und einen Beitrag von etwa 2/3 zum zusätzlichen Strahlungsfluß aller Treibhausgase liefert, wäre die mittlere Temperatur in unserem Lebensraum um unwirtliche 33 °C kälter. In den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts analysierte der britische Physiker John Tyndall die Eigenschaften verschiedener atmosphärischer Gase und demonstrierte, daß Kohlendioxid starke Absorptionsbanden im Bereich des Infrarots hat und damit ein Treibhausgas ist.

Die Idee von Arrhenius geriet rasch in Vergessenheit. Unter anderem auch deshalb, weil Wissenschaftler bezweifelten, daß durch Verbrennungsprozesse freigesetztes Kohlendioxid in der Atmosphäre akkumuliert wird. Der Ozean spielt eine ungewöhnlich wichtige Rolle für atmosphärisches CO₂. Kohlendioxid reagiert mit Wasser zu Bicarbonat- und Carbonationen (siehe Informationskasten Seite

409). Wegen dieser Pufferung und der hohen Löslichkeit von CO₂ befindet sich rund 65mal mehr Kohlenstoff im Ozean als in der Atmosphäre. Daher schien es Arrhenius' Zeitgenossen vernünftig anzunehmen, daß sämtliches durch Menschen freigesetztes Kohlendioxid in kürzester Zeit vom Ozean aufgenommen wird.

Heute wissen wir, daß dies falsch ist: 1957 veröffentlichten Roger Revelle und Hans Suess von der Scripps Institution of Oceanography (Kalifornien) eine Publikation [6] mit zwei grundlegenden Beiträgen zum Verständnis des atmosphärischen CO₂-Gehalts. Darin zeigten sie, daß die Aufnahmekapazität von Meerwasser für zusätzliches CO₂ drastisch niedriger ist, als man aufgrund der gegenwärtigen Verteilung des Kohlenstoffs zwischen Atmosphäre und Ozean (Verhältnis: 590 Gt-C: 39 700 Gt-C = 1:67) annehmen könnte. Chemische Gleichgewichtsrechnungen ergeben, daß bei einer Störung des Systems Atmosphäre-Ozean durch zusätzlich emittiertes Kohlendioxid der Ozean nur etwa 5–6 mal soviel wie die Atmosphäre aufnimmt. Damit verbleiben etwa 15 % der Emissionen in der Atmosphäre. Diese Aufnahmekapazität von 15 % steht jedoch nicht sofort zur Verfügung, sondern erst nach langer Zeit, wenn der ganze Ozean mit der atmosphärischen CO₂-Konzentration in ein neues Gleichgewicht gelangt ist.

Zweitens benutzten Revelle und Suess Beobachtungen der ozeanischen Verteilung von ¹⁴C, einem radioaktiven Kohlenstoffisotop mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren, um zu zeigen, daß die Aufnahme des freigesetzten Kohlendioxids durch den Ozean langsam ist im Vergleich mit der Rate, mit der wir CO₂ freisetzen. So ist zum Beispiel bis heute nur etwa die Hälfte des im Jahre 1957 in die Atmosphäre eingebrachten Kohlenstoffs im Ozean gelöst. Die charakteristische Zeit, innerhalb der sich ein neues Gleichgewicht zwischen Atmosphäre und Ozean einstellt, beträgt etwa tausend Jahre, entsprechend der Umwälzzeit der Tiefsee.

Messungen belegen 30 %-Zunahme von CO₂ in der Atmosphäre

Die Zunahme von CO₂ in der Atmosphäre wurde durch Messungen bestätigt. Die Gruppen von C. D. Keeling (Scripps) und von H. Oeschger und B. Stauffer (Bern) haben in diesem Bereich Pionierarbeit geleistet. Keelings Datensätze der CO₂-Konzentration auf Hawaii und am Südpol reichen bis in die späten fünfziger Jahre zurück. Diese Daten, zusammen mit den in Bern durchgeführten Messungen an Luftblasen, die aus polaren Eisbohrkernen extrahiert wurden, zeigen für die letzten zweihundert Jahre einen kontinuierlichen Anstieg der CO₂-Konzentration von etwa 280 ppm auf den heutigen Wert von 355 ppm (Abb. 1a und b). Mittlerweile sind diese Ergebnisse von einer Reihe anderer Laboratorien bestätigt worden.

Aus Statistiken schätzt man ab, daß in den letzten hundertfünfzig Jahren durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Öl, Kohle und Gas) 210 Gigatonnen Kohlenstoff (1 Gt-C = 10¹⁵ Gramm Kohlenstoff ≈ 0,5 ppm) und durch Abholzungen 110 Gt-C in die Atmosphäre emittiert wurde (Abb. 2). Von diesen anthropogenen Emissionen sind zur Zeit etwa 43 % immer noch in der Atmosphäre.

Bis heute ist von den fossilen Brennstoffvorräten der Erde nur ein geringer Teil verbrannt worden. Im Vergleich zum atmosphärischen Reservoir (600 Gt-C) und

zur lebenden Vegetation (≈ 500 Gt-C) bilden die fossilen Brennstoffe, vor allem Kohle, ein riesiges Reservoir (50 000–10 000 Gt-C). Steigen in Zukunft die fossilen Emissionen gemäß dem Trend der vergangenen dreißig Jahre, dann werden bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts etwa 1450 Gt-C emittiert sein. Ein großer Teil dieses anthropogenen Kohlendioxids wird durch den Ozean aufgenommen, aber die atmosphärische CO₂-Konzentration würde gemäß eines solchen Szenarios auf das zweieinhalbfache des vorindustriellen Wertes ansteigen. Revelle und Suess beschreiben diesen Sachverhalt in ihrer Veröffentlichung treffend so: „Die Menschheit führt jetzt ein großskaliges geophysikalisches Experiment durch, in einer Form, wie es weder in der Vergangenheit möglich war, noch in Zukunft wiederholt werden kann. Innerhalb von wenigen hundert Jahren entlassen wir in die Atmosphäre und den Ozean den organischen Kohlenstoff, der sich über hunderte von Millionen Jahren in den Sedimenten angesammelt hat.“

Die natürlichen Austauschflüsse zwischen Atmosphäre, Ozean und Biosphäre sind groß im Vergleich zu den anthropogenen Flüssen. Daher taucht oft die Frage auf, ob der zu beobachtende atmosphärische CO₂-Anstieg nicht eine natürliche Schwankung des Kohlenstoffkreislaufes sei. Verschiedene Argumente widerlegen diesen Einwand. In Abb. 2 wird die jährliche Zunahme der atmosphärischen Kohlenstoffmen-

ge mit den geschätzten, anthropogenen Emissionen verglichen. Seit 1900 ist der atmosphärische Anstieg in jedem einzelnen Jahr kleiner als die geschätzte Freisetzung aus fossilen Energieträgern, und sogar um einen Faktor von 2–3 kleiner als die geschätzte Summe aller Emissionen. Daraus folgt, daß während all dieser Jahre der Ozean und die Landbiosphäre zusammen Senken und nicht Quellen für atmosphärisches CO₂ waren. Ein weiteres eindrückliches Indiz für den Zusammenhang zwischen Emissionen und atmosphärischem CO₂-Anstieg ergibt sich aus den Beobachtungen, daß die atmosphärische CO₂-Konzentration in der Nordhemisphäre, wo 95 % der fossilen Emissionen produziert werden, im Jahresmittel größer ist als auf der Südhalbkugel, und daß die interhemisphärische Differenz parallel zu den Emissionen angewachsen ist.

Ist es möglich, daß natürliche Variationen den CO₂-Anstieg moduliert haben? Während der jetzigen Warmzeit und auch in der letzten Zwischeneiszeit lag der atmosphärische CO₂-Gehalt nahe bei 280 ppm. Analysen an mehreren polaren Eisbohrkernen zeigen, daß zwischen 1000 A.D. und 1800 die CO₂-Werte nur innerhalb von 10 ppm geschwankt haben (Abb. 1a). Änderungen der CO₂-Konzentration von vergleichbarer Größenordnung wie der moderne Anstieg sind nur für Perioden mit dramatischen Klimawechseln dokumentiert, wie die Übergänge Eiszeit-Warmzeit. Für kürzere Zeitspannen sind Variationen

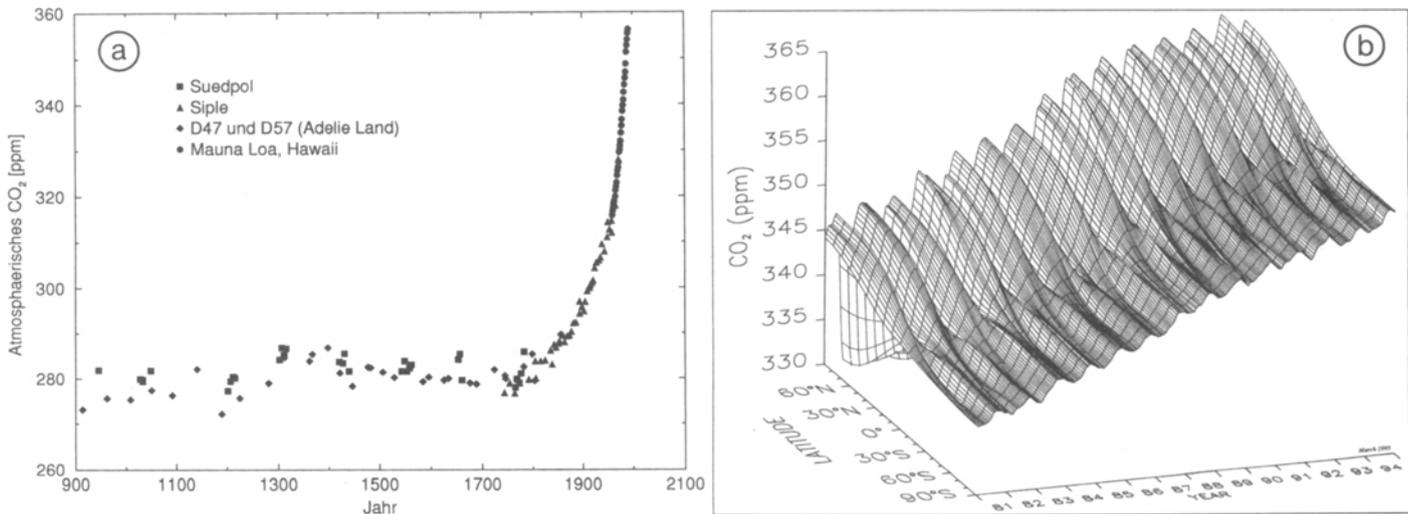


Abb. 1: a) Eine über tausend Jahre reichende, zusammengesetzte Meßreihe dokumentiert den CO₂-Anstieg. Die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre hat sich kontinuierlich von etwa 280 ppm vor Beginn der industriellen Revolution auf den heutigen Wert von knapp 360 ppm erhöht. Dieser Anstieg wird durch Messungen von Gruppen aus Bern und Grenoble an Luftblasen, aus antarktischen Eisbohrkernen von Siple Station, Südpol, D47 und D57 sowie seit 1958 durch direkte Messungen der Scripps Institution of Oceanography in Mauna Loa, Hawaii, dokumentiert. – b) Der atmosphärische CO₂-Anstieg wird weltweit an etwa 36 Stationen der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; T. J. Conway, P. P. Tans, L. S. Waterman) kontinuierlich erfaßt. Dieser Graph wurde durch Interpolation von den zonal und monatlich gemittelten Beobachtungen erhalten. Verborgene im langjährigen Trend ist eine Welt von faszinierenden Details. Besonders eindrücklich ist der saisonale CO₂-Zyklus. Die höchsten atmosphärischen CO₂-Werte werden in den Wintermonaten in der nördlichen Hemisphäre beobachtet. Der starke Jahresgang in der Nordhemisphäre wird vor allem durch Variationen der terrestrischen Biosphäre verursacht. Im Sommerhalbjahr dominiert der CO₂-Einbau in die Vegetation durch Photosynthese über die Freisetzung durch Respiration und Zerfall von totem Material. In der südlichen Hemisphäre ist die Landmasse (Vegetation) zu klein, um einen ähnlich signifikanten Jahresgang zu verursachen.

von etwa einem ppm im Zusammenhang mit den periodisch wiederkehrenden El-Niño-Klimaschwankungen belegbar. Erst kürzlich (um 1991) flachte die Wachstumsrate der Konzentration von atmosphärischem CO₂ aufgrund einer natürlichen Klimaschwankung ab. Mittlerweile wachsen die Werte aber wieder im selben Tempo wie zuvor. Es gibt demnach gute Hinweise, daß die natürlichen CO₂-Variationen unter dem jetzigen Klimaregime klein sind.

Das Budget für die letzte Dekade

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) erstellte 1994 ein Budget des anthropogenen Kohlendioxids für die letzte Dekade. Dieses basiert auf den besten Beobachtungen und Modellergebnissen (Tabelle 1; [2, [3] und darin aufgeführte Referenzen). Demnach wurden im Schnitt 7.1 Gt-C pro Jahr durch die Verbrennung fossiler Energieträger, Abholzung in den Tropen und Änderungen der Landnutzung emittiert. Die jährliche Zunahme in der Atmosphäre von 3.2 Gt-C ist aus Beobachtungen sehr gut bekannt. Die Aufnahme durch den Ozean von 2.0 Gt-C pro Jahr wurde mit Hilfe von Ozeanmodellen berechnet. Aus Inventarerhebungen wird abgeschätzt, daß eine weitere halbe Gigatonne durch Nachwachsen von Wäldern in der nördlichen Hemisphäre absorbiert wurde. Daraus ergibt sich, daß die Summe der Senken um 1.4 ± 1.5 Gt-C pro Jahr kleiner ist als die gesamten Emissionen. Während man die Größe der fossilen Emissionen auf etwa $\pm 10\%$ genau kennt, sind die Abschätzungen der Freisetzungsrates von CO₂ durch Abholzung und Landnutzungsänderungen sehr unsicher ($\pm 60\%$). Die Existenz und Größe des Ungleichgewichts im Budget steht in einem direkten Zusammenhang mit der Größe des postulierten Flusses durch Abholzungen. Obwohl die Unsicherheiten relativ groß sind, wird die Existenz dieses Ungleichgewichts zwischen Quellen und Senken von Geowissenschaftlern sehr ernst genommen.

Das Ungleichgewicht im Budget wurde in der Vergangenheit mit dem Begriff *missing sink* („fehlende Senke“) umschrieben. Aufgrund des heutigen Wissens rückt man von dieser Umschreibung ab, und man geht davon aus, daß zusätzlich Kohlenstoff in der Landbiosphäre gespeichert wird. Das heißt, die Emissionen durch Abholzungen in den Tropen werden in etwa durch eine erhöhte biosphärische Aufnahme, die durch andere nicht genau bekannte Prozesse gesteuert wird, kompensiert. Die Ursachen dafür stehen möglicherweise im Zusammenhang mit klimatischen Variatio-

nen. Wahrscheinlich wichtig ist aber eine mögliche Düngung durch erhöhte CO₂-Werte und durch Stickstoffverbindungen, die ebenfalls bei der Verwendung fossiler Brennstoffe freigesetzt werden. Der sog. C₃-Photosynthese-Mechanismus, der bei der Mehrheit der Pflanzen zum Tragen

kommt, benutzt das Enzym Ribulose-Biphosphat-Carboxylase, welches bei erhöhten CO₂-Konzentrationen aktiver ist. Wie in Treibhausexperimenten nachgewiesen, führen erhöhte CO₂-Werte bei vielen Pflanzen zu einer verstärkten Photosyntheseaktivität.

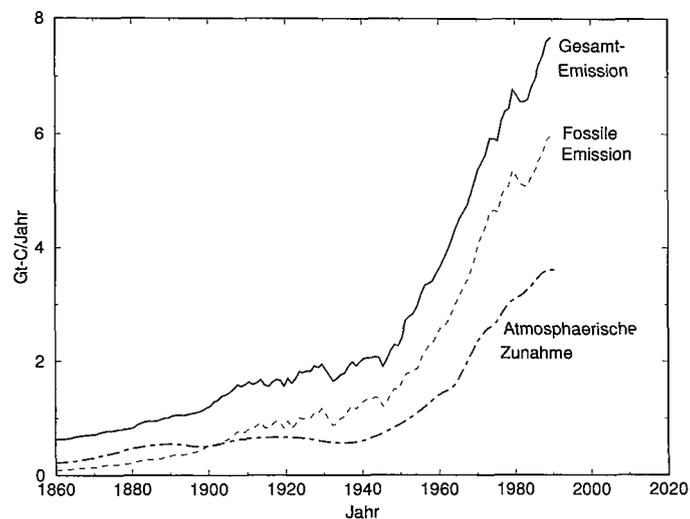


Abb. 2: Vergleich der jährlichen Zuwachsrates von Kohlenstoff in der Atmosphäre und der CO₂-Emissionen. Die Emissionen werden aufgrund von Handelsstatistiken (fossil) und Statistiken über die Landnutzung sowie aus Satellitenbeobachtungen (Abholzung) geschätzt. Die Differenz zwischen den fossilen Emissionen und den geschätzten Gesamtemissionen entspricht der geschätzten CO₂-Freisetzung durch Abholzung und Landnutzungsänderungen. Seit dem Beginn der Statistiken war die Summe der Emissionen Jahr für Jahr um einen Faktor 2–3 größer als der atmosphärische Anstieg. Für die ganze Periode 1860–1989 betragen die geschätzten Emissionen etwa 325 Gt-C, rund zweieinhalbmal soviel wie der atmosphärische Anstieg von 138 Gt-C. Daraus folgt, daß Ozean und Biosphäre zusammengenommen Senken für atmosphärisches CO₂ waren.

	Mittelwerte in Gt-C/a	Unsicherheit in Prozent
CO₂-Quellen		
(1) fossile Energieträger	5.5 ± 0.5	± 9
(2) Abholzung und Landnutzungsänderungen	1.6 ± 1.0	± 63
total	7.1 ± 1.1	± 15
CO₂-Senken		
(3) Atmosphäre	3.2 ± 0.2	± 6
(4) Ozean	2.0 ± 0.8	± 40
(5) Wälder in der nördlichen Hemisphäre	0.5 ± 0.5	± 100
total	5.7 ± 1.0	± 18
(6) Zusätzliche terrestrische Senken = [(1) + (2)] – [(3) + (4) + (5)]	1.4 ± 1.5	± 107

Tabelle 1: Das Budget für den durch menschliche Aktivitäten emittierten Kohlenstoff, wie es vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) für die Dekade 1980–89 aufgestellt wurde. Die angegebenen Fehler sind nicht streng statistisch definiert (außer für die atmosphärische CO₂-Zunahme), sondern geben einen ungefähren Unsicherheitsbereich an.

Szenarien für die Zukunft

Aufgrund der fortgesetzten Emission von CO_2 wird die atmosphärische Konzentration auch in naher Zukunft weiter zunehmen. Das genaue Ausmaß der Emissionen hängt von vielen Faktoren ab und ist schwierig vorauszusagen. Szenarienrechnungen, die auf unterschiedlichen Annahmen für die zukünftige Emissionen basieren, zeigen die Bandbreite der zu erwartenden Konzentrationsänderungen. Für den Report des Intergovernmental Panel on Climate Change haben achtzehn Gruppen rund um die Welt solche Rechnungen mit Kohlenstoffkreislauf-Modellen verschiedenster Komplexität durchgeführt. Im sog. „business as usual“-Szenario (IPCC, Szenario A), bei dem die Emissionen weiterhin zunehmen, steigt der atmosphärische CO_2 -Gehalt rasch und erreicht in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts das Doppelte des vorindustriellen Wertes, d. h. 560 ppm. Werden die Emissionen auf dem Wert von 1990 eingefroren, nimmt die atmosphärische Konzentration ebenfalls weiterhin zu und erreicht Ende des nächsten Jahrhunderts etwa 500 ppm. Um die atmosphärische Konzentration zu stabilisieren, genügt es also nicht, die Emissionen konstant zu halten. Dies ist eine Konsequenz der langen Lebensdauer von CO_2 in der Atmosphäre.

Abb. 3 zeigt einen möglichen Weg zur Stabilisierung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration. Hier wurde in unserem Kohlenstoffkreislauf-Modell (HILDA-Modell) die atmosphärische CO_2 -Konzentration derart vorgeschrieben, daß eine neue

Gleichgewichtskonzentration von 550 ppm erreicht wird (IPCC-Szenario S550). Mit Hilfe des Modells werden die Flüsse in den Ozean und in die Biosphäre berechnet. Die mit diesem Szenario konsistenten Emissionen müssen dann gleich groß sein wie die gesamte Kohlenstoffaufnahme von Atmosphäre, Biosphäre und Ozean. Abb. 3b zeigt kumulativ die verschiedenen Quellen und Senken. Um eine Stabilisierung der atmosphärischen Konzentration zu erreichen, müssen die Quellen stark abnehmen.

Das erwähnte Ungleichgewicht im Budget (Tabelle 1) resultiert in einer Unsicherheit für die Ergebnisse solcher Szenarienrechnungen. Um das Budget für die letzte Dekade zu schließen, wird im Modell angenommen, daß durch die erhöhten CO_2 -Werte eine zusätzliche Kohlenstoffaufnahme der Biosphäre erfolgt. Der Zusammenhang zwischen zusätzlicher Photosynthese und atmosphärischer Konzentration wird logarithmisch angenommen. Läßt man diese zusätzliche CO_2 -Düngung weg, so müssen die Emissionen in Zukunft noch stärker abnehmen, um eine Stabilisierung auf einer konstanten Konzentration zu ermöglichen. Für das in Abb. 3 gezeigte Szenario dürften dann zum Beispiel die Emissionen im Jahr 2015 nur noch etwa 6.5 Gt-C/Jahr betragen (Summe der Zunahme in Atmosphäre plus Ozean; kurz-lang gestrichelte Linie) anstatt etwa 8.8 Gt-C/Jahr (fette Linie). Andere Modelle zeigen sogar noch größere Unterschiede. Unsicherheiten gibt es auch bezüglich der Aufnahme durch den Ozean. So beruhen die hier vorgelegten

Rechnungen auf der Annahme, daß sich der Ozean in Zukunft gleich verhält wie heute. Dies braucht bei größeren Klimaänderungen nicht mehr der Fall zu sein. Tatsächlich haben Manabe und Stouffer vom Geophysical Fluid Dynamics Laboratory in Princeton für eine wärmere Atmosphäre einen Zusammenbruch der Nordatlantischen Tiefenwasserbildung in ihrem dreidimensionalen Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodell erhalten. Generell sind Ergebnisse von Szenarienrechnungen mit einer großen Unsicherheit behaftet.

Welche Bedeutung haben diese möglichen zukünftigen Konzentrationsänderungen? Die Wirkung des zusätzlichen CO_2 auf den Temperaturhaushalt der Erde wird verstärkt durch weitere Treibhausgase wie Methan und Freone, deren atmosphärische Konzentration aufgrund menschlicher Aktivitäten ebenfalls zunimmt. Der Anteil des zusätzlichen CO_2 an der Störung des Strahlungshaushaltes beträgt heute etwa 60% der Wirkung aller Treibhausgase zusammengenommen. Auf der anderen Seite wird Aerosolen, deren Konzentration ebenfalls stark angestiegen ist, ein kühlender Effekt von recht ungewisser Größe zugeschrieben. Aerosole haben jedoch eine beträchtliche kürzere Aufenthaltszeit in der Atmosphäre (\approx Wochen) als die langlebigen Treibhausgase. Bei Verdoppelung (560 ppm) des atmosphärischen CO_2 -Gehalts (ohne andere Treibhausgase) schätzt man, daß langfristig die globale mittlere Temperatur um 1.5–4.5 °C zunimmt. Zum Vergleich: Der globale Temperaturunterschied zwischen Eiszeit und Warmzeit betrug etwa 5 °C.

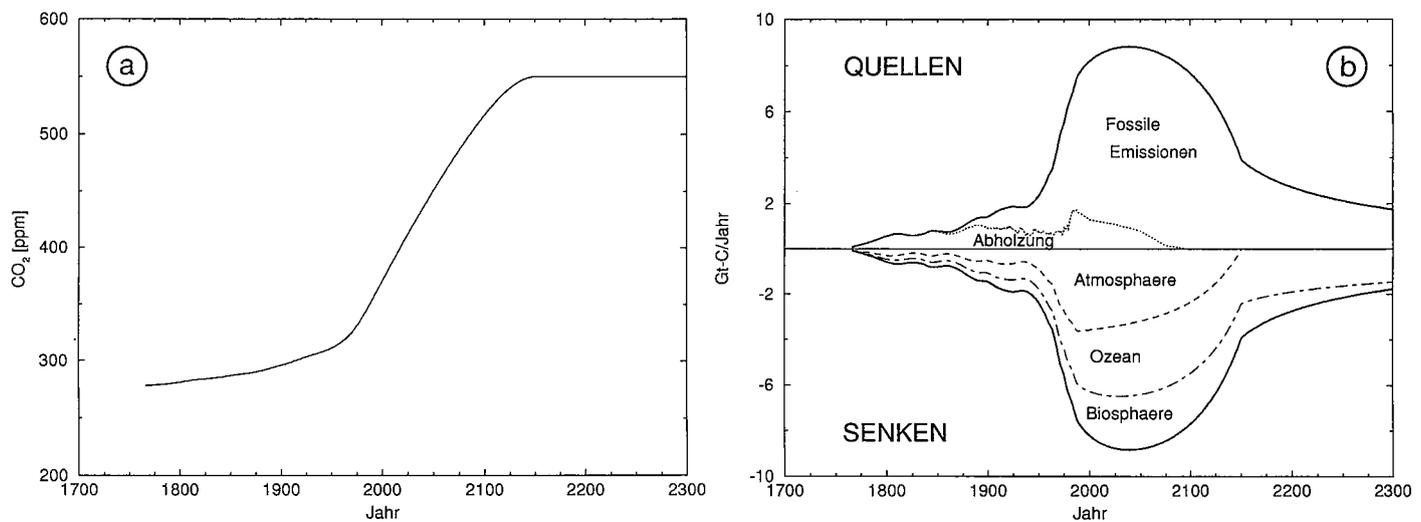


Abb. 3: Ein möglicher Weg zur Stabilisierung des atmosphärischen CO_2 -Gehalts. Soll die atmosphärische CO_2 -Konzentration dem in Teilbild a gezeigten Verlauf folgen (IPCC-Szenario S550), so müssen sich die CO_2 -Emissionen etwa wie in Teilbild b entwickeln. Die anthropogenen Emissionen werden aus Modellrechnungen abgeleitet. Dazu werden die atmosphärische CO_2 -Konzentration gemäß Teilbild a im Modell vorgeschrieben und die Austauschflüsse mit Modell-Ozean und Modell-Biosphäre berechnet. Die anthropogenen Emissionen ergeben sich dann aus der Kohlenstoffaufnahme von Atmosphäre (gestrichelte Linie), Ozean (Differenz zwischen kurz-lang gestrichelter Linie und gestrichelter Linie) und Biosphäre (Differenz zwischen durchgezogener Linie und kurz-lang gestrichelter Linie). Ebenfalls eingetragen sind die im Modell vorgeschriebenen Kohlenstoffemissionen aus Abholzung und Änderung der Landnutzung (gepunktete Linie). Die hier gezeigten Resultate wurden mit Hilfe unseres Kohlenstoffkreislauf-Modells (HILDA) berechnet, welches von IPCC als Referenzmodell gewählt wurde.

Die Kohlenstoffzunahme in Biosphäre und Ozean direkt zu bestimmen, ist schwierig

Warum sind mehr als dreißig Jahre nach der Arbeit von Revelle und Suess die Unsicherheiten im Budget des anthropogenen Kohlenstoffs immer noch relativ groß? Der Grund liegt darin, daß es außer-

ordentlich schwierig ist, die Aufnahme von Kohlenstoff durch den Ozean und die Biosphäre direkt zu messen.

Die zusätzlichen Kohlenstoffflüsse, ausgelöst durch die anthropogene Störung, sind gegenüber den natürlichen Austauschflüssen klein. So beträgt das Ungleichgewicht im Budget nur wenige Pro-

zent der jährlichen Netto-Primärproduktion, bzw. der CO_2 -Freisetzung aus der Biosphäre durch Respiration. Die großen Unsicherheiten der terrestrischen Quellen und Senken spiegeln auch die Tatsache wider, daß Vegetation und Böden extrem heterogen sind. Der postulierte Kohlenstoffzuwachs in Vegetation und Böden ist relativ klein, und so konnte bis jetzt nicht

Die CO_2 -Chemie

Vorindustrielle Verteilung • Kohlenstoffmenge im Ozean ist 67mal größer als in der Atmosphäre

Wenn man 1073 Kohlenstoffmoleküle der Atmosphäre farbig kennzeichnen könnte und diese etwa tausend Jahre lang verfolgte – dies ist die charakteristische Zeit bis ein neues Gleichgewicht erreicht wird –, würde man in etwa die folgende Verteilung wiederfinden:

anorganischer Pool	1000
Atmosphäre: CO_2	15
Ozean:	
CO_2	5
HCO_3^-	875
CO_3^{2-}	105
total Ozean	985
organischer Pool	73
Land	55
Ozean	18
total	1073

98.5 % der bezeichneten „anorganischen“ Moleküle enden im Ozean. Der Grund ist die hohe Löslichkeit von CO_2 in Wasser und die Weiterreaktion von gelöstem CO_2 ($\text{CO}_2(\text{aq})$) zu Bicarbonat- (HCO_3^-) und Carbonationen (CO_3^{2-}). Tatsächlich liegt nur etwa 0.5 Prozent des gesamten anorganischen Kohlenstoffs im Ozean in der Form von gelöstem CO_2 vor.

Was geschieht mit CO_2 aus fossilen und biosphärischen Quellen?

Die vorindustrielle Verteilung, wie sie in der Tabelle wiedergegeben wird, gilt jedoch *nicht* für zusätzliche Emissionen. Werden die CO_2 -Emissionen heute gestoppt, dauert es aufgrund der langsamen Umwälzzeit des Ozeans etwa 1000 Jahre bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen Atmosphäre und Ozean eingestellt hat. Man würde *jetzt* vielleicht aufgrund der vorindustriellen Verteilung erwarten, daß von den emittierten Molekülen

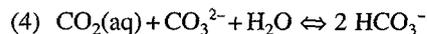
schließlich nurmehr 1.5 % in der Atmosphäre verbleiben. Tatsache ist, daß selbst nach Erreichen eines neuen Gleichgewichts zwischen Atmosphäre und Ozean von dem zusätzlich emittiertem CO_2 etwa 15–20 % in der Atmosphäre zurück bleibt. Die fossilen und biosphärischen Emissionen verteilen sich also etwa im Verhältnis 1:5 zwischen Atmosphäre und Ozean und nicht gemäß dem vorindustriellen Verhältnis von 1:67 (siehe nebenstehende Tabelle). Diese Zahlen gelten, falls Wechselwirkungen mit den ozeanischen Sedimenten vernachlässigt werden. Diese spielen aufgrund der langsamen Umwälzzeit des Ozeans und der geringen Austauschrate zwischen Ozean und Sedimentreservoir erst für Zeiträume, die deutlich über hundert Jahre liegen, eine Rolle. Berücksichtigt man diese zusätzliche Wechselwirkung, so findet man nach mehreren tausend Jahren nicht mehr 15 % der Emissionen in der Atmosphäre sondern nur noch etwa 7 % [7].

Diese Schätzungen beruhen auf Modellrechnungen mit komplizierten Kohlenstoffkreislauf-Modellen, zum Beispiel mit dreidimensionalen Zirkulationsmodellen des Ozeans in denen die Kohlenstoffchemie an mehreren tausend Gitterpunkten berechnet wird. Der generelle Trend läßt sich aber auch durch die folgenden qualitativen(!) Überlegungen verstehen. Im folgenden vernachlässigen wir die Wechselwirkung mit Sedimenten und betrachten nur das Gleichgewicht zwischen Atmosphäre und Ozean.

Die Absorption von CO_2 in Wasser führt zu folgenden Gleichgewichten:

- (1) $\text{CO}_2(\text{gas}) \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{aq})$
- (2) $\text{CO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
- (3) $\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$

Die Gleichgewichte (2) und (3) können zusammengefaßt werden, und wir erhalten folgende Summenformel:



Dieses thermodynamische Gleichgewicht verlangt, daß das folgendes Verhältnis erhalten bleibt:

$$(5) \frac{[\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_2][\text{CO}_3^{2-}]} = \text{konstant,}$$

und da der Bicarbonat-Pool sehr groß ist, erhalten wir folgende Näherung:

$$(6) [\text{CO}_2][\text{CO}_3^{2-}] \approx \text{konstant.}$$

Ein zweite Bedingung für die Ionen in Lösung ist die elektrische Neutralität. Die Ladungen positiver und negativer Ionen müssen sich aufheben. Diese Bedingung läßt sich stark vereinfacht ausdrücken durch die Annahme einer konstanten Carbonat-Alkalinität:

$$(7) [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] \approx \text{konstant}$$

Werten wir Gleichung (6) und (7) zusammen mit (1) aus. Gemäß (1) erhalten wir für einen Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration von 20 % einen ebenso großen Anstieg des aquatischen CO_2 -Pools, während gemäß (6) die CO_3^{2-} -Konzentration in linearer Näherung um 20 % abnimmt. Ausgedrückt in Einheiten der von uns gekennzeichneten, farbigen Moleküle, erhöht sich also der atmosphärische CO_2 -Pool von 15 auf 18 Moleküle, der ozeanische CO_2 -Pool steigt von 5 auf 6 Moleküle, und der CO_3^{2-} -Pool nimmt um 21 Moleküle ab. Gleichung (7) verlangt eine Zunahme des Bicarbonat-Pools um $2 \cdot 21 = 42$ Moleküle. Damit ergibt sich, daß zusätzlich 3 gekennzeichnete Moleküle in der Atmosphäre zu finden sind und $1 - 21 + 42 = 22$ Moleküle im Ozean. Somit erhalten wir, daß von 25 zusätzlichen Molekülen, 3 oder 12 % in der Atmosphäre verbleiben. Das Resultat dieser einfachen Überlegung kommt damit den Ergebnissen aus vollständigeren Modellen der aquatischen Kohlenstoffchemie recht nahe.

nachgewiesen werden, ob im Freiland tatsächlich ein Düngungseffekt eine Rolle spielt. Ein indirekter Hinweis für eine wachsende Aktivität der Biosphäre folgt aus den Beobachtungen, daß die saisonalen CO₂-Schwankungen an vielen Stationen signifikant zugenommen haben.

Um die Zunahme der Kohlenstoffmenge im Ozean zu bestimmen, stehen zwei direkte Meßmethoden zur Verfügung. Aber beide haben eine Vielzahl praktischer Probleme, die hauptsächlich durch die große natürliche Variabilität im Ozean und die riesige Ausdehnung der Weltmeere verursacht sind.

Bei der ersten Methode wird die Kohlenstoffmenge im Ozean gemessen. Aus Modellen weiß man, daß die Kohlenstoffkonzentration in den relevanten obersten Schichten pro Jahr um etwa 1 µmol/kg zunimmt. Es ist schwierig, einen so kleinen Trend aus den Meßdaten zu ermitteln, da die Amplitude des natürlichen Jahreszyklus diesen Trend um 1–2 Größenordnungen übersteigt. Die analytische Prozedur bietet ebenfalls Schwierigkeiten: Vergleichsmessungen zwischen verschiedenen Labors zeigen Abweichungen bis zu 10 µmol/kg.

Die zweite Methode versucht, den Nettofluß von Kohlenstoff in den Ozean zu bestimmen. Dieser ist eine Funktion der CO₂-Partialdruckdifferenz zwischen dem Oberflächenwasser und der darüberliegenden Luft. Ein Transfer von 2 Gt-C pro Jahr in den Ozean entspricht grob einer globalen Partialdruckdifferenz von etwa 8 ppm. Aber die natürliche Variabilität des Partialdrucks ist etwa eine Größenordnung höher. Dies erfordert eine gut durchdachte Meßstrategie.

Trotz dieser Schwierigkeiten bestätigen die bis heute gewonnenen Meßergebnisse die Größenordnung der abgeschätzten Kohlenstoffspeicherung im Ozean.

Ozeanmodelle

Die klassische Methode von Revelle und Suess, die Aufnahme von anthropogenem Kohlenstoff in den Ozean mit Hilfe von Modellen zu berechnen, ist bis heute die wohl quantitativ verlässlichste Methode geblieben. Die drei grundlegenden Prozesse, die ein solches Modell beinhalten muß, sind der Gasaustausch von CO₂ zwischen Atmosphäre und Oberflächenwasser, die Dissoziation von CO₂ zu Bicarbonat- und Carbonationen, und der Transport in die Tiefe. Oberflächenwasser erreicht durch Gasaustausch ein chemisches Gleichgewicht mit der Atmosphäre etwa innerhalb

eines Jahres. Auf der anderen Seite sind die Zeitskalen für den Transport von der Oberfläche in die Tiefsee beträchtlich länger. Daher limitiert der vertikale Wassertransport die Aufnahmerate des Ozeans. Dieser muß korrekt durch Kohlenstoffkreislauf-Modelle simuliert werden. Unsicherheiten in der Gasaustauschrate und den chemischen Gleichgewichtskonstanten sind für diese Methode von untergeordneter Bedeutung. Wechselwirkungen mit den Sedimenten, die in einigen Modellen bereits berücksichtigt sind, spielen wegen der langen Zeitskalen nur eine geringe Rolle.

Die heute verwendeten Modelle des Ozeans variieren in ihrer Komplexität von einfachen Box-Modellen bis hin zu dreidimensionalen Ozeanmodellen. Die Transportrate in diesen Modellen wird durch den Vergleich von Beobachtungen und Modellergebnissen für geeignete Spurenstoffe geprüft. Beobachtungen existieren zum Beispiel für natürliches und anthropogenes ¹⁴C, das durch die Atombombentests in den fünfziger und sechziger Jahren gebildet wurde, für Chlorfluorkohlenwasserstoffe (CFKW) und radioaktives ³⁹Ar. Allen diesen Spurenstoffen ist gemeinsam, daß sie eine Zeitinformation beinhalten: entweder durch ihren radioaktiven Zerfall (natürliches ¹⁴C und ³⁹Ar), oder durch die bekannte, zeitlich variable, atmosphärische Geschichte (CFKW, bombenproduziertes ¹⁴C). Für die heute gebräuchlichen Modelle (IPCC, 1994), liegen die Resultate für die CO₂-Aufnahme des Ozeans während der letzten Dekade zwischen 1.5 und 2.3 Gt-C pro Jahr.

Information aus den Änderungen der Verteilung von Sauerstoff und ¹³C im Klimasystem

Gibt es weitere Möglichkeiten, die Verteilung von anthropogenem Kohlenstoff im Klimasystem zu bestimmen? Zwei vielversprechende neue Methoden, das globale Kohlenstoffbudget zu quantifizieren, wurden kürzlich vorgeschlagen. Sie machen Gebrauch von Beobachtungen des O₂/N₂-Verhältnisses und des Kohlenstoffisotops ¹³C, zwei Größen, die eng mit dem globalen Kohlenstoffkreislauf gekoppelt sind.

Erste Messungen von Keeling und Shertz zeigen einen Abfall der atmosphärischen Sauerstoffkonzentration. Sauerstoff verhält sich in vieler Hinsicht komplementär zu Kohlenstoff. Bei der Photosynthese und Verbrennung von organischem Kohlenstoff wird ungefähr ein Mol O₂ verbraucht für die Produktion eines Mols CO₂. Daher ist der atmosphärische CO₂-Anstieg begleitet von einem geringen Abfall im Sau-

erstoffgehalt. Im Gegensatz zu CO₂ wird dieser Abfall aber nur geringfügig durch den Ozean gepuffert, da Sauerstoff nicht von weiteren aquatischen Reaktionen betroffen ist. Hochpräzise O₂-Messungen erlauben es daher, die gesamte Bildung von CO₂ aus fossilen Brennstoffen und in der Biosphäre zu bestimmen. Zusammen mit Messungen des atmosphärischen CO₂ und Statistiken über die fossilen Emissionen ist so eine unabhängige Bestimmung des Budgets möglich. Die Abnahme des Sauerstoffgehalts ist sehr klein (4 ppm pro Jahr im Vergleich zur atmosphärischen Sauerstoffmenge von 0.21 atm) und schwierig zu messen. Die Methode steht erst am Anfang, doch weitere Ergebnisse werden in den nächsten Jahren folgen.

Den zweiten Weg hat Paul Quay von der Washington University durch seine Messungen der ozeanischen Verteilung des Isotops ¹³C gebahnt. Kohlendioxid aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe oder aus der Biosphäre besitzt ein spezifisches Isotopen-Signal. Dieser Kohlenstoff hat ein viel kleineres ¹³C/¹²C-Verhältnis als atmosphärischer und ozeanischer Kohlenstoff. Durch die Freisetzung von fossilem und biosphärischem Kohlenstoff hat daher das ¹³C/¹²C-Verhältnis in den verschiedenen Kohlenstoffreservoirs abgenommen. Aus dem beobachteten Eindringen dieses Isotopen-Signals in den Ozean wurden durch ausgefeilte Ansätze von Pieter Tans, von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und von Martin Heimann und Ernst Maier-Reimer am MPI für Meteorologie in Hamburg die Aufnahme von anthropogenem Kohlenstoff durch den Ozean zu 2.2 ± 0.8 Gt-C pro Jahr (1-σ-Abweichung) für die Periode 1970–1990 bestimmt. Die Ergebnisse dieser neuen und unabhängigen Methode stimmen also relativ gut mit den Resultaten der klassischen Ozeanmodell-Studien (1970–1990: 1.8 ± 0.4 Gt-C pro Jahr) überein.

Ein weiterer Test wird durch die Analyse der regionalen atmosphärischen CO₂- und ¹³C-Verteilung ermöglicht. Die CO₂-Konzentration ist, wie erwähnt, in der Nordhemisphäre größer als in der Südhemisphäre, da 95 Prozent der fossilen Emissionen im Norden freigesetzt werden. Durch Inversionsrechnung – mathematisch heikel – läßt sich mit Hilfe von Modellen des Transports in der Atmosphäre aus der atmosphärischen Verteilung eine regionale Verteilung der Quellen und Senken berechnen. Obwohl die Ergebnisse der verschiedenen Gruppen (Scripps, CSIRO, NOAA, Princeton) noch etwas kontrovers sind, hilft diese Methode, die Konsistenz des Gesamtbudgets zu prüfen.

Was ist das Fazit?

Zusammenfassend darf gesagt werden, daß das von IPCC geschätzte Budget des anthropogenen Kohlenstoffs durch eine Vielzahl von Beobachtungen gestützt wird. Wesentliche Prozesse, wie etwa die Aufnahme von Kohlenstoff durch den Ozean, sind gut verstanden. Trotzdem: Wir sind erst auf dem Weg, den komplexen Kohlenstoffkreislauf vollständig zu verstehen. Viele offene Fragen gibt es vor allem noch zu möglichen zukünftigen Wechselwirkungen zwischen Klima und atmosphärischem CO₂.

Wir denken, daß man in Zukunft das globale Kohlenstoffbudget durch ¹³C- und O₂-Messungen noch etwas besser eingrenzen kann. Über die beteiligten Mechanismen und Prozesse lernen wir wohl besonders viel aus den immer zahlreicheren und sich ergänzenden Beobachtungen der atmosphärischen Verteilung von Kohlendioxid, Sauerstoff und deren Isotopen. Diese erlauben, den Zusammenhang zwischen regionalen Variationen der CO₂-Quellen und -Senken und dem Klima zu bestimmen.

Was folgt für die Zukunft? Die größte

Unsicherheit über die Zunahme der CO₂-Konzentration in den nächsten Jahrzehnten steckt in der möglichen Entwicklung der anthropogenen Emissionen. Sie hängen von politischen, wirtschaftlichen und sozialen Faktoren ab und sind schwierig vorauszusagen. Szenarienrechnung zeigen aber, daß bei gleichbleibenden oder steigenden Emissionen der atmosphärische CO₂-Gehalt weiterhin zunimmt. Um die Konzentration auf einem konstanten Wert zu stabilisieren, müssen die Emissionen abnehmen. Dies folgt aus der wichtigen Erkenntnis, daß freigesetztes CO₂ extrem langsam aus der Atmosphäre entfernt wird. Von einem Kilogramm Kohlenstoff, das wir heute in die Luft emittieren, wird in zwanzig Jahren die Hälfte, und in hundert Jahren immer noch ein Drittel in der Atmosphäre sein. Und selbst nach mehreren tausend Jahren, wenn sich ein neues Gleichgewicht zwischen Atmosphäre, Ozean, Biosphäre und den Sedimenten eingestellt hat, verbleiben noch immer etwa 7 % in der Atmosphäre [7]. Dieses zusätzliche CO₂ wird den Strahlungshaushalt der Erde nachhaltig beeinflussen. Revelle und Suess haben recht: Wir führen ein nicht mehr rückgängig zu machendes, globales Experiment durch.

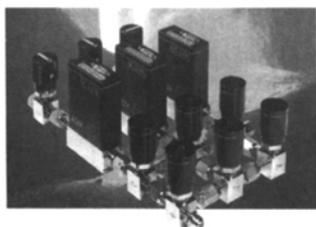
Literatur

- [1] *S. Arrhenius*: On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Phil. Mag. Sci.* **5**, 237–276, 1896.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Herausgeg. von *J. T. Houghton*, *G. J. Jenkins* u. *J. J. Ephraums*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1990.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. Radiative forcing of climate change. Report to IPCC from the Scientific Assessment Working Group, WMO/ UNEP, 1994.
- [4] *U. Siegenthaler* u. *J. L. Sarmiento*: Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature* **365**, 119–125, 1993.
- [5] *J. L. Sarmiento*: Ocean Carbon Cycle. *Chem. Eng. News* **71**, 30–43, 1993.
- [6] *R. Revelle* u. *H.E. Suess*: Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during past decades. *Tellus* **9**, 18–27, 1957.
- [7] *E. Maier-Reimer*: The biological pump in the greenhouse. *Global and Planetary Change* **8**, 13–5, 1993.

QUALIFLOW
MODULINE
IM SYSTEM-
VERGLEICH

QUALIFLOW®
Moduline

Wir dürfen nicht vergleichen. Aber Sie.



Unser Angebot:
Wenn Sie möchten, geben wir Ihnen
gerne unsere Testergebnisse an die Hand.
Einfach bei CIV abrufen.

Klassische
Lösungen

CIV TECHNOLOGIE VERTRIEBS GMBH
Komponenten - Ionentechnologie - Vakuumtechnik
Unterfeldring 13 Tel.: (081 39) 93 05 - 0
85256 Vierkirchen Fax: (081 39) 93 05 - 8

Mehr Leistung
gleich mit CIV
sprechen