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: 158 (1978)

Artikel: Das CO2-Problem

Autor: Oeschger, Hans / Sigenthaler, Ulrich

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-90755

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: 22.08.2025

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

Das CO_2-Problem

Hans Oeschger und Ulrich Siegenthaler

Einleitung

Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe – Kohle, Erdöl, Erdgas – entsteht als Hauptprodukt Kohlendioxyd (CO_2). Als Folge der fossilen Energieproduktion ist die atmosphärische CO_2-Konzentration messbar angestiegen und steigt weiter an (Abb. 1).
Das CO_2-Problem ist seit langem bekannt. 1957 schrieben die amerikanischen Forscher R. Revelle und H. Suess (1957), die Menschheit führe ein gewaltiges geophysikalisches Experiment durch. Innerhalb weniger Jahrhunderte werde der während hunderten von Millionen Jahren in den Sedimenten gespeicherte organische Kohlenstoff in Atmosphäre und Ozean zurückgeführt. Dieses Experiment könne, falls dokumentiert, tiefe Einsicht in die Prozesse gewähren, die Wetter und Klima bestimmen. Damals stellte dies noch eine eher distanzierte Haltung dar; die Frage nach den Auswirkungen einer Klimaexkursion auf die Gesellschaft wurde noch nicht gestellt.
In den letzten Jahren sind in einer grossen Zahl von wissenschaftlichen Arbeiten Aspekte des CO_2-Problems behandelt und an mehreren Symposien und Workshops diskutiert worden. In vermehrtem Mass nehmen auch diejenigen, die sich mit der langfristigen zukünftigen Energieversorgung auseinandersetzen, davon Kenntnis, dass die Nutzung von Fossilenergie Probleme mit sich bringt.

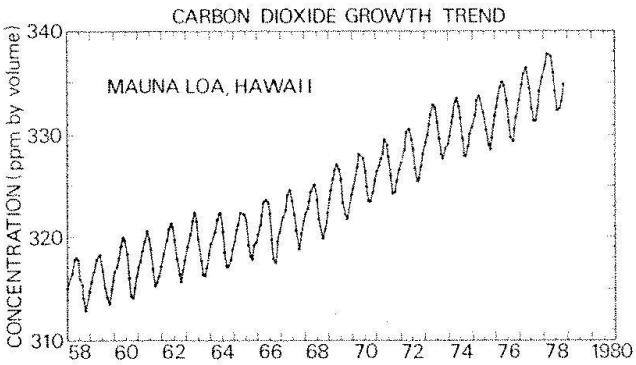


Abb. 1. Verlauf der atmosphärischen CO_2-Konzentration, gemessen in Mauna Loa, Hawaii (Keeling und Bacastow 1977). Die periodischen Variationen sind eine Folge des Pflanzenwachstums im Sommer und -zerfalls im Winter, wobei CO_2 gebunden resp. freigesetzt wird.

Das CO_2-Problem

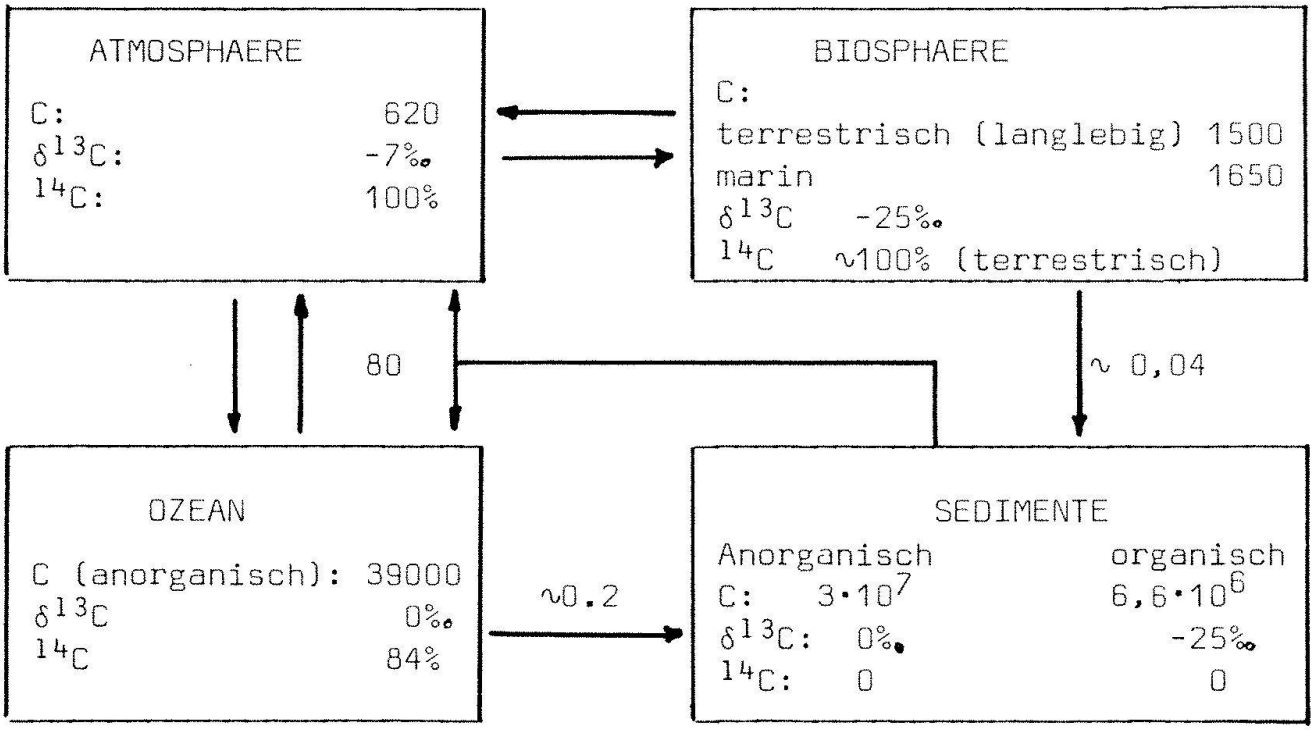
Während man noch vor zwei Jahren annahm, dass der vorindustrielle CO_2-Gehalt der Atmosphäre etwa zwischen 290 und 295 ppm (parts per million = Millionstel) gelegen habe, schliesst man heute Werte, die deutlich unter 290 ppm liegen, nicht aus, da neben den fossilen Brennstoffen auch die Abholzung von Wäldern zum CO_2-Anstieg beigetragen haben dürfte. Bliebe die gesamte fossile CO_2-Produktion von 1959 bis 1973 in der Atmosphäre, so machte dies 24.4 ppm aus. Der beobachtete Anstieg beträgt jedoch nur 13.8 ppm (Keeling und Bacastow 1977). Während dieser Periode ist also etwa 56% des produzierten CO_2 in der Atmosphäre zurückgeblieben. Der Anteil des total in die Atmosphäre injizierten CO_2, der zurückbleibt, ist geringer, je nachdem wie gross der CO_2-Beitrag als Folge der Rodungen angesetzt wird. Dies ist schwierig abzuschätzen; die Werte in der Literatur streuen stark. Unter Berücksichtigung aller verfügbaren Informationen kann man mit einiger Sicherheit sagen, dass bei der gegenwärtigen Produktion rund die Hälfte des total produzierten CO_2 in der Atmosphäre bleibt.
Der CO_2-Anstieg führt zu einer Veränderung der Strahlungsbilanz sowohl an der Erdoberfläche als auch in der Atmosphäre. Das einfallende, kurzwellige Sonnenlicht wird kaum beeinflusst, jedoch absorbiert das zusätzliche CO_2 in höherem Mass die von der Erdoberfläche emittierte langwellige Wärmestrahlung (Treibhauseffekt). Ein

Strahlungsgleichgewicht ist bei erhöhtem CO_2-Pegel nur dann realisiert, wenn die Erdoberfläche und die unteren Schichten der Erdatmosphäre eine höhere Temperatur annehmen. Diese indirekte Aufheizung der Erdatmosphäre ist weit stärker als die direkte, die durch die Umwandlung der genutzten Energien in Wärme zustande kommt.
Die Reserven an Kohle, Erdöl und Erdgas entsprechen rund dem zehnfachen atmosphärischen CO_2-Gehalt. Dürfen sie uneingeschränkt genutzt werden, ohne dass sich Klimaveränderungen einstellen, die sich ungünstig auf die Gesellschaft auswirken?
Um diese Frage zu beantworten, müssen wir 1. den Kohlenstoffkreislauf genügend genau verstehen, um aufgrund von Energieszenarios die zukünftigen atmosphärischen CO_2-Gehalte voraussagen zu können, 2. die Klimamechanismen genügend genau kennen, um Prognosen darüber aufstellen zu können, wie sich eine angenommene CO_2-Erhöhung global und regional auf das Klima auswirkt, 3. die Auswirkungen evaluieren, welche die Klimaveränderungen auf den Menschen und seine ökologische und soziale Umwelt haben könnten.

Der CO_2-Kreislauf

Das CO_2 der Atmosphäre befindet sich im Austausch mit dem anorganischen Kohlenstoff im Ozean und mit der terrestrischen und marinen Biosphäre (Abb. 2). Kaum ins Gewicht fallend, da sehr langsam, ist der Austausch mit den Sedimenten. Nutzung von Fossilenergie ist eine schnelle Rückführung eines Teils des organischen Kohlenstoffs der Sedimente in die Atmosphäre. Die Grösse der CO_2-Reservoirs Atmosphäre und Ozean ist gut bekannt, schwieriger ist die Abschätzung der biosphärischen Reservoirs. Über die Dynamik des Austausches zwischen Atmosphäre und Ozean besitzt man Kenntnisse aufgrund von ^{14}C-Messungen an Proben aus Atmosphäre, Ozeanoberfläche und

Abb. 2. Der CO_2-Kreislauf. Die Kohlenstoffmengen in den Reservoirs sind ausgedrückt in 10^{15}g C; die Flüsse in 10^{15}g C pro Jahr. Für die Isotopenverhältnisse sind Mittelwerte angegeben. Die ^{14}C-Konzentrationen sind korrigiert für Isotopenfraktionierung. Nur ein Bruchteil des organischen Kohlenstoffs in den Sedimenten ist als Brennstoff ausbeutbar, der Grossteil liegt fein verteilt vor.



Tiefsee. Das Kohlenstoff-Isotop ^{14}C wird durch die kosmische Strahlung in der Atmosphäre erzeugt. In den Ozeanen werden niedrigere ^{14}C-Konzentrationen als in der Atmosphäre gemessen wegen des radioaktiven Zerfalles in diesen Reservoirs. Das so bestimmte Alter des Tiefenwassers des Atlantischen Ozeans beträgt 500, jenes des Pazifischen Ozeans 1500 Jahre. Diese Daten dienen zur Simulation des CO_2-Kreislaufs.

Die Nutzung von fossilen Brennstoffen hat eine Störung des natürlichen Kreislaufs zur Folge. Atmosphärische Messungen zeigen, dass der totale CO_2-Gehalt zunimmt, das $^{14}C/^{12}C$-Verhältnis vor den Kernwaffentests abnahm, da der fossile Kohlenstoff kein ^{14}C mehr enthält, und das Verhältnis der stabilen Kohlenstoffisotope $^{13}C/^{12}C$ in der Atmosphäre abnimmt, da es im fossilen Kohlenstoff niedriger als in atmosphärischem CO_2 ist.

Die erarbeiteten Modelle gestatten es, diese Störungen sowie den ^{14}C-Anstieg als Folge der ^{14}C-Produktion bei Kernwaffentests befriedigend zu simulieren (Oeschger et al. 1975). Es scheint daher gerechtfertigt, darauf zu vertrauen, dass wir mit ihrer Hilfe auch den zukünftigen Anstieg für verschiedene Szenarien berechnen können. Die Reaktion der Biosphäre auf einen erhöhten CO_2-Pegel ist allerdings schwieriger abzuschätzen.

Prognosen

Vorerst interessiert uns, mit welcher Geschwindigkeit das überschüssige CO_2, das sich heute in der Atmosphäre befindet, nach einem CO_2-Produktionsstopp wieder verschwinden würde. Abb. 3 zeigt, dass die Modellrechnungen einen relativ raschen Abfall in den ersten Jahrzehnten ergeben. Dieser würde sich jedoch rasch verringern und in vielen Jahrhunderten würde schliesslich ein Endwert erreicht, der etwa einem Viertel des heutigen Überschusses entspricht. Eine weitere Reduktion würde sich über grosse Zeiträume durch Auflösung von Ozeansedimenten ergeben.

Als obere Grenze für die CO_2-Produktion kann angenommen werden, dass die Vorräte an fossilen Brennstoffen im wesentlichen in den nächsten 150 Jahren verbraucht werden (Abb. 4) (Siegenthaler und Oeschger 1978). Die Produktionsrate würde gemäss dieser Annahme ihr Maximum, etwa das 18fache des heutigen Wertes, um das Jahr 2060 erreichen. Das Modell ergibt, dass die CO_2-Konzentration im Jahr 2020 den doppelten, um 2100 sogar den sieben- bis neunfachen Wert erreichen würde. Bei aller Vorsicht, die gegenüber derartigen Abschätzungen angebracht ist, wird doch die Grössenordnung der Problematik sichtbar.

Interessant ist die Frage, welchen Verlauf die CO_2-Produktion nehmen müsste, damit der vorindustrielle CO_2-Gehalt um höchstens 50% übertroffen wird. Abb. 5 zeigt, dass in diesem Fall die jährliche Produktion bis zum Jahr 2000 noch um etwa einen Faktor 1.5 steigen könnte (Siegenthaler und Oeschger 1978). Im Jahr 2070 dürfte sie nur noch soviel betragen wie heute, im Jahr 2100 sogar nur noch halb so viel. Dieses Szenarium würde also schon in wenigen Jahrzehnten eine massive Ablösung der fossilen Brennstoffe durch andere Energieformen bedingen.

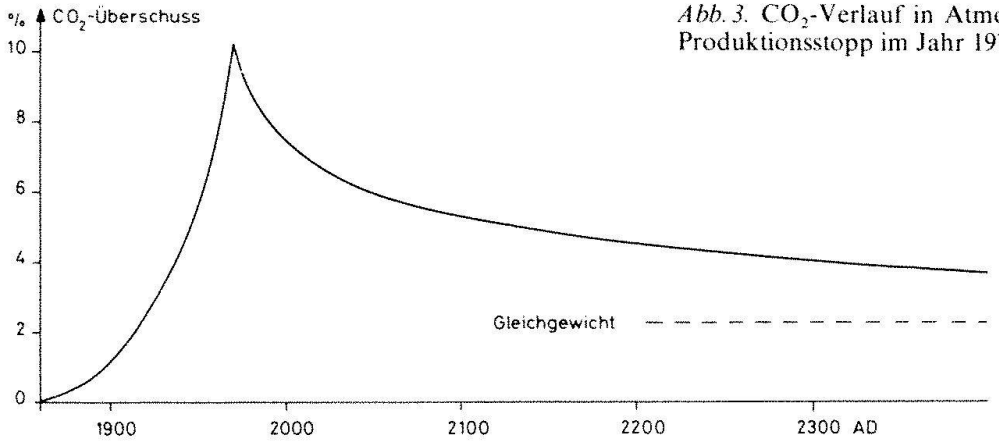


Abb. 3. CO_2-Verlauf in Atmosphäre für hypothetischen Produktionsstopp im Jahr 1970.

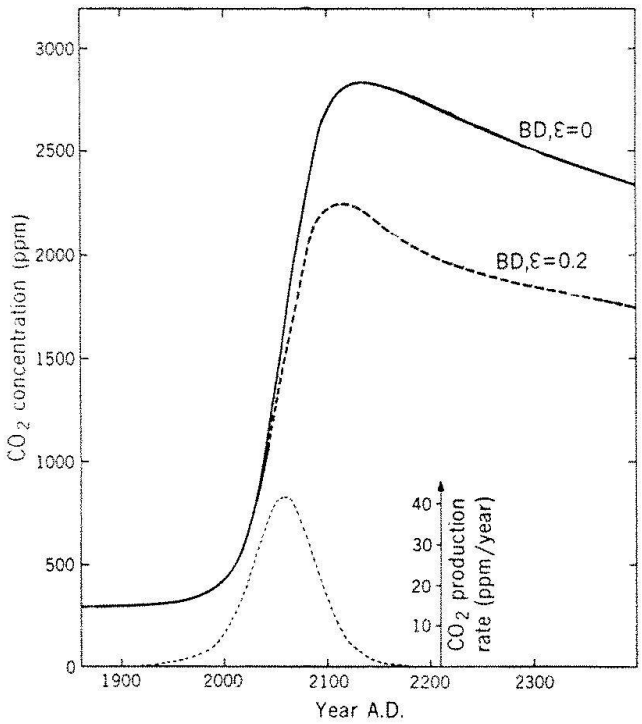


Abb. 4. Modellmässig berechneter Verlauf der atmosphärischen CO_2-Konzentration, wenn alle ausbeutbaren fossilen Brennstoffe verbrannt werden; die angenommene CO_2-Produktionsrate wird durch die unterste Kurve wiedergegeben. Die zwei Konzentrationskurven entsprechen verschiedenen Modellannahmen, einmal mit einer konstanten Biosphärengrösse ($\varepsilon = 0$), einmal mit einer wachsenden Biosphäre ($\varepsilon = 0{,}2$). (Siegenthaler und Oeschger 1978)

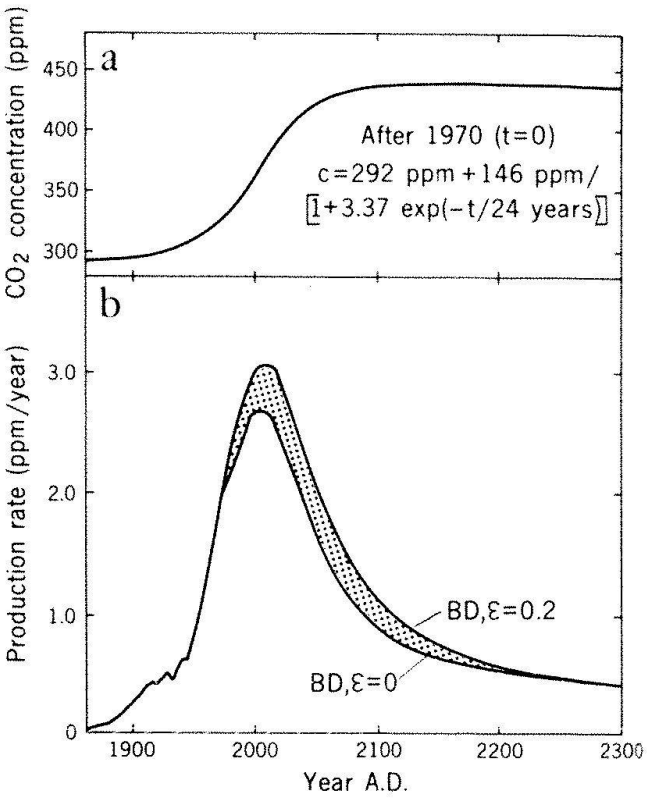


Abb. 5. Oberer Teil: Atmosphärischer vorgeschriebener CO_2-Konzentrationsverlauf. Logistische Annäherung an 50%-igen Überschuss. Unterer Teil: Zugehöriger modellmässiger Produktionsverlauf (konstante Biosphärengrösse ($\varepsilon = 0$); mit Biosphärenwachstum ($\varepsilon = 0{,}2$). (Siegenthaler und Oeschger 1978)

Schätzungen des zukünftigen Energieverbrauchs ergeben, dass in den nächsten Jahrzehnten mit einem globalen Wachstum des Fossilenergie-Umsatzes von mehreren Prozent pro Jahr gerechnet werden muss (Rotty 1977). Zwar schwächt sich die Wachstumsrate in den westlichen Ländern ab, doch ist der Nachholbedarf in den planwirtschaftlichen und insbesondere auch in den Entwicklungsländern gross. Das 50%-Szenario (Abb. 5) wird deshalb kaum eingehalten werden und der CO_2-Anstieg vermutlich wesentlich grösser sein.

Die Auswirkungen auf das Klima

Die Auswirkung des CO_2-Anstiegs auf das Klima wird mit Hilfe einer ganzen Reihe von einfachen bis sehr komplizierten Modellen, die den physikalischen Details, so weit es die heutigen Computerkapazitäten gestatten, Rechnung tragen, simuliert. Damit wird untersucht, wie sich Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei einer CO_2-Verdopplung verändern würden. Kurz zusammengefasst ergeben sich die folgenden Resultate:

- Erwarteter Temperaturanstieg bei einer Verdopplung des CO_2-Gehaltes in der Atmosphäre 2–3 °C, an den Polen 6–10 °C. Jede weitere Verdopplung bringt nochmals dieselbe Erwärmung (Manabe und Wetherald 1975; Schneider 1975).
- Der modellmässige CO_2-Effekt beträgt bis heute $\sim 0.3°$. Er liegt noch im Bereich der natürlichen Klimaschwankungen und ist deshalb noch nicht nachweisbar. Die Erwärmung wird aber vor der Jahrtausendwende feststellbar sein (Flohn 1978).
- Die Spurengase Stickoxydul, Methan und Freone tragen zum Treibhauseffekt bei und können je nach zukünftiger Produktion den CO_2-Effekt um bis 50% und mehr erhöhen (Wang et a. 1976).
- Eine Erwärmung um 0,5 °C wäre wahrnehmbar, eine solche um 1 °C entspricht der mittelalterlichen Warmzeit; plus 2–2,5 °C entsprechen den Bedingungen während des

letzten Interglazials und plus 4 °C kann wohl zu einem eisfreien arktischen Ozean führen (Flohn 1978).

Auswirkungen auf die Gesellschaft

Die Auswirkungen des CO_2-Anstiegs auf Temperatur, Niederschläge und atmosphärische Zirkulation werden vermutlich zu einer Verschiebung der Landwirtschaftszonen in Richtung der Pole führen. Dabei sollten die Auswirkungen auf die tropische Landwirtschaft relativ gering sein; man fürchtet jedoch, dass in mittleren Breiten häufiger Dürreperioden auftreten werden (Bach 1978). Schwierig ist es, die Auswirkungen auf die polaren Eisschilder abzuschätzen. Mit dem Ansteigen der Nullgradgrenze wird das Eis stärker abschmelzen, und mit der Zeit ist ein Anstieg des Meeresspiegels zu befürchten. Grösse und Geschwindigkeit eines Anstieges sind noch schlecht untersucht, doch am Effekt selber ist kaum zu zweifeln. Einen Hinweis liefert die Tatsache, dass während der letzten Zwischeneiszeit vor 100000 Jahren die Temperatur etwa 2 °C wärmer und der Meeresspiegel 5–6 m höher als heute waren.
Natürlich stellt man sich auch die Frage, ob das anfallende CO_2 ausserhalb der Atmosphäre gelagert werden könnte. Der CO_2-Anstieg liesse sich vermindern, indem man z.B. das CO_2 in Tiefenwasser des Ozeans (etwa bei Gibraltar) ableiten würde (Marchetti 1977). In Anbetracht der Tatsache, dass pro 1 kg verbrannte Kohle 3,6 kg gasförmiges CO_2 anfällt, handelt es sich allerdings um ein gigantisches Projekt. Eine andere Möglichkeit wäre das Recycling von CO_2 via Photosynthese oder künstliche photochemische Sonnenenergienutzung. Auch könnte aus CO_2 und Wasser, mit Hilfe von Kernenergie oder Sonnenenergie, Methanol als neuer Energieträger synthetisiert werden. Alle diese Projekte setzen jedoch noch riesige Entwicklungs- und Aufbauarbeiten voraus und scheinen teilweise kaum realisierbar.

CO_2 und Energiestrategie

Das CO_2-Problem war Gegenstand mehrerer internationaler Tagungen, wobei die Beteiligten zu folgenden Schlüssen kamen:
Ein fortgesetzter CO_2-Anstieg führt mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu deutlichen Klimaänderungen auf der ganzen Erde. Die Energieplanung darf sich deshalb nicht weiter auf die reichlich vorhandene, billige Fossilenergie verlassen, sondern muss eine Umstellung auf andere Energiearten in Betracht ziehen. Diese Entscheidung muss in fünf bis zehn Jahren erfolgen, gestützt auf Angaben über den maximal zulässigen Fossilenergie-Verbrauch. Dazu müssen wir den Kohlenstoffkreislauf kennen und die Auswirkungen eines CO_2-Anstiegs auf Klima und Gesellschaft abschätzen können. Noch sind die Aussagen zu unsicher, um konkrete Massnahmen zur Einschränkung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe zu fordern. Andererseits wäre es falsch, hauptsächlich auf Kohlenutzung zu setzen. In Anbetracht der Bedeutung des Problems ist es unumgänglich, die Umwelteinflüsse der steigenden Energienutzung gründlicher zu untersuchen.
Man kann sich fragen, ob sich das heutige Bild in den nächsten Jahren grundsätzlich ändern kann. Es scheint jedoch unwahrscheinlich, dass wesentliche Aspekte des CO_2-Kreislaufes übersehen wurden und dass der heute vorausgesagte Anstieg stark überschätzt ist. Anfängliche Differenzen zwischen verschiedenen Abschätzungen der Auswirkungen auf die Temperatur sind in den letzten Jahren weitgehend beseitigt worden. So bleibt nur die Hoffnung, dass sich die erwarteten Klimaveränderungen in gewissen Gegenden als günstig, in andern als tolerabel erweisen. Man muss sich jedenfalls bewusst sein, dass die Menschheit durch die unverminderte Nutzung fossiler Brennstoffe das Risiko eingeht, das Klima der ganzen Erde zu verändern. Die Frage, ob man ein solches Wagnis eingehen kann, stellt sich nicht nur den Wissenschaftern, sondern allen, die sich mit der Zukunft der Menschheit auseinandersetzen.

Literatur

Anderson N.R. und Malakoff A., hg. 197: The Fate of Fossil Fuel CO_2 in the Oceans, Proc. of a Symposium.

Bach W. 1978: The Potential Consequences of Increasing Co_2 Levels in the Atmosphere in: Carbon Dioxide, Climate and Society, Proc. of a IIASA Workshop, 141–167.

Flohn H. 1978: Estimates of a Combined Greenhouse Effect as Background for a Climate Scenario During Global Warming, in: Carbon Dioxide, Climate and Society. Proc. of a IIASA Workshop, 227–237.

Keeling C.D. und Bacastow R.B., 1977: Impact of Industrial gases on Climate, in: Energy and Climate, Nat. Academy of Sciences, Washington D.C. 72–95.

Manabe S. und Wetherald R.T. 1975: The Effects of Doubling the CO_2 concentration on the Climate of a General Circulation Model. J. Atmos. Sci. 32, 3–15.

Marchetti C. 1977: On Geoengineering and the CO_2 Problem. Climatic Change 1, 59–68.

Oeschger H., Siegenthaler U., Schotterer U. und Gugelmann A. 1975: A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. Tellus 27, 168–192.

Revelle, R. und Suess, H.E. 1957: Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean, and the question of an increase of atmospheric CO_2 during the past decades. Tellus 9, 18.

Rotty, R.M. 1977: Global Carbon Dioxide Production from Fossil Fuels and Cement, A.D. 1950 – A.D. 2000, in: The Fate of Fossil Fuel CO_2 in the Oceans, Proc. of a Symposium, 167–182.

Schneider S. 1975: On the Carbon Dioxide-Climate Confusion. J. Atmos. Sci. 32, 2060–2066.

Siegenthaler U. und Oeschger H. 1978: Predicting Future Atmospheric Carbon Dioxide Levels. Science 199, 388–395.

Stumm W., Hg. 1977: Global Chemical Cycles and their Alterations by Man, Berlin 1977.

Wang W.C., Yung Y.L., Lacis A.A., Mo T. und Hansen J.E. 1976: Greenhouse Effect due to Man-Made Perturbations of Trace Gases. Science 194, 685–690.

Williams J., Hg. 1978: Carbon Dioxide, Climate and Society, Proc. of a IIASA Workshop.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Hans Oeschger
Dr. Ulrich Siegenthaler
Physikalisches Institut
der Universität Bern
Sidlerstrasse 5
CH-3012 Bern