



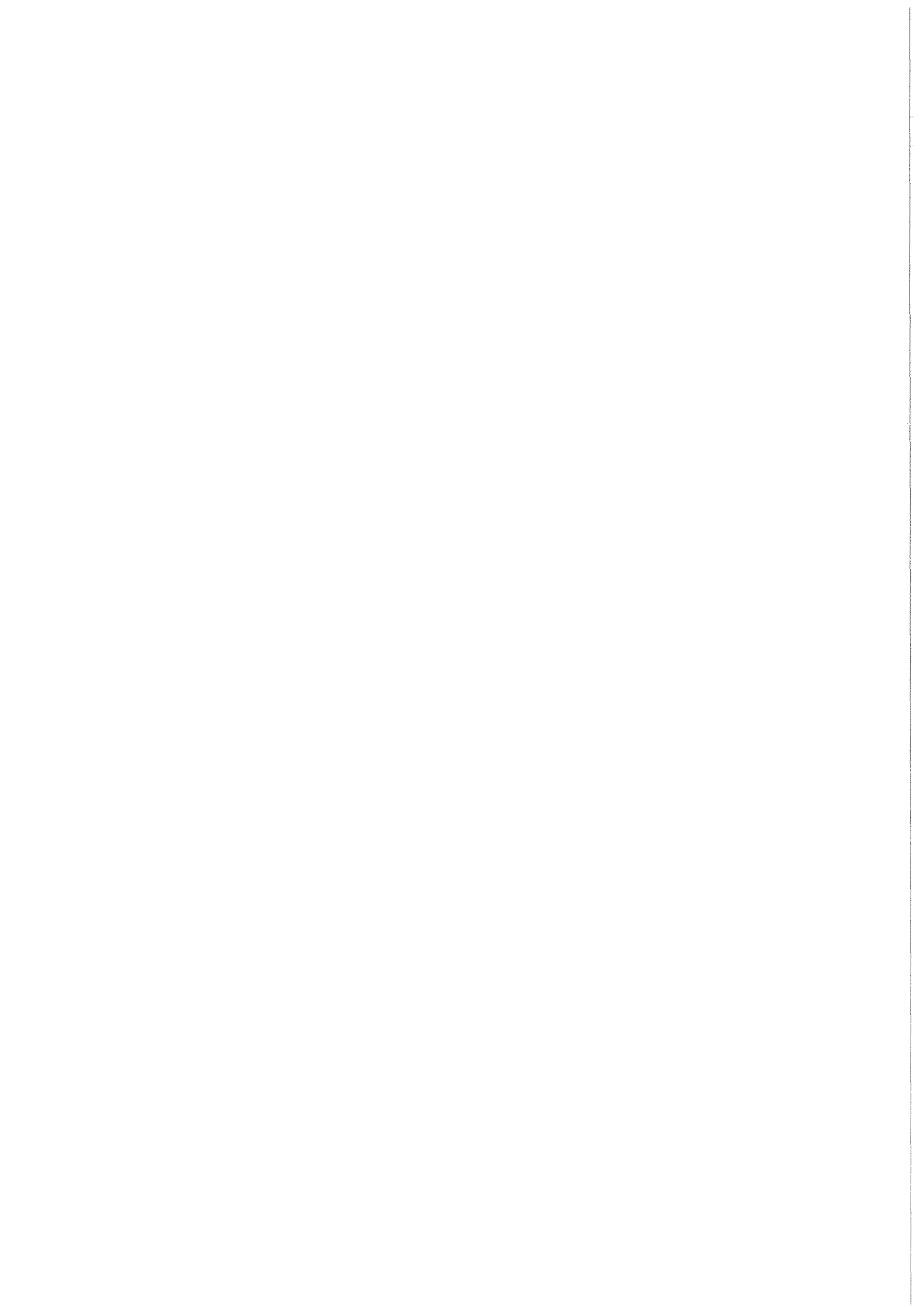
KfK 3285
Mai 1982

Der Kohlenstoffkreislauf

**Entwicklung der
Kohlendioxidkonzentration in der
Atmosphäre und mögliche Auswirkungen
erhöhter Kohlendioxidkonzentration auf
das Klima**

J. Jäger
unter Mitarbeit von
G. Halbritter, G. Neumann-Hauf
Abteilung für Angewandte Systemanalyse

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Abteilung für Angewandte Systemanalyse

KfK 3285

DER KOHLENSTOFFKREISLAUF, ENTWICKLUNG DER
KOHLENDIOXIDKONZENTRATION IN DER ATMOSPHERE
UND MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN ERHÖHTER KOHLEN-
DIOXIDKONZENTRATION AUF DAS KLIMA

Jill Jäger

unter Mitarbeit von

G. Halbritter und G. Neumann-Hauf

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Es wurde eine Literaturanalyse zum Kohlenstoffkreislauf, zur Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre und zu den möglichen Auswirkungen erhöhter Kohlendioxidkonzentrationen auf das Klima erstellt. Neben einer Übersicht über den Wissensstand werden auch die noch offenen Fragen und die sich daraus ergebenden Forschungsarbeiten diskutiert.

In den letzten Jahrzehnten wurde ein permanenter Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration um etwa 1-2 ppm pro Jahr festgestellt; im Jahr 1958 betrug sie noch 315 ppm, 1978 wurden bereits 336 ppm gemessen. Eine grobe Schätzung ergibt, daß die CO_2 -Zunahme in der Atmosphäre mengenmäßig etwa der Hälfte der Kohlenstoffmenge entspricht, die durch den Einsatz von fossilen Brennstoffen an die Atmosphäre abgegeben wird. Es sind zwei mögliche Senken für das freigesetzte CO_2 bekannt: das Meer und die Pflanzenwelt. Die Rolle der Biosphäre ist dabei noch sehr unklar. Sie dient sowohl als Quelle als auch als Senke. Die meisten Modelle für den Kohlenstoffkreislauf sind eindimensional und nur beschränkt aussagefähig. Die Grenzen für das Aufstellen realistischerer Modelle liegen vor allen Dingen im Verständnis des CO_2 -Kreislaufs und dem Mangel an ausreichenden Daten. Rechnungen mit Klimamodellen haben gezeigt, daß ein höherer CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre zu einer Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre führt. Die Erwärmung ist dadurch bedingt, daß CO_2 langwellige Strahlung gut absorbiert bzw. emittiert. Relativ sicher ist dabei die Aussage, daß eine Verdoppelung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre zu einer durchschnittlichen Erwärmung der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche von 4 W m^{-2} führt. Unsicherer ist die Abschätzung, welche Veränderung der Oberflächentemperatur diese Erwärmungsrate ergibt. Die Aussagen hierzu schwanken zwischen 1,5 und 4,5 K. Die Auswirkungen des erhöhten CO_2 -Gehalts schwanken je nach geographischer Breite und Jahreszeit. Andere meteorologische Größen (Regen, Windgeschwindigkeit usw.) würden sich ebenfalls ändern. Es wird derzeit als unwahrscheinlich angesehen, daß andere bei der Kohleverbrennung freiwerdende Stoffe die Auswirkungen des CO_2 auf das Klima kompensieren könnten.

Abstract

THE CARBON CYCLE, ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE BUILDUP AND POSSIBLE IMPACTS OF AN INCREASED CARBON DIOXIDE CONCENTRATION ON THE CLIMATE

This report contains a review of literature on the subjects of the carbon cycle, the increase of the atmospheric carbon dioxide concentration and the possible impacts of an increased carbon dioxide concentration on the climate. In addition to this survey, the report discusses the questions that are still open and the resulting research needs.

During the last twenty years a continual increase of the atmospheric carbon dioxide concentration by about 1-2 ppm per year has been observed. In 1958 the concentration was 315 ppm and this increased to 336 ppm in 1978. A rough estimate shows that the increase of the atmospheric carbon dioxide concentration is about half of the amount of carbon dioxide added to the atmosphere by the combustion of fossil fuels. Two possible sinks for the CO₂ released into the atmosphere are known: the ocean and the biota. The role of the biota is, however, unclear, since it can act both as a sink and as a source. Most models of the carbon cycle are one-dimensional and cannot be used for accurate predictions. The limitations on modeling are not in computer hardware but in understanding the carbon cycle and in data inadequacies. Calculations with climate models have shown that an increased atmospheric CO₂ concentration leads to a warming of the earth's surface and lower atmosphere. The warming is a result of the fact that CO₂ is a good absorber/emitter of long-wave radiation. Calculations show that a doubling of the atmospheric CO₂-concentration would lead to a net heating of the lower atmosphere and earth's surface by a global average of about 4 Wm⁻² and there is relatively high confidence that this estimate is correct to within $\pm 25\%$. Greater uncertainties arise in estimating the change in surface temperature resulting from this change in heating rate. It is estimated that the global average annual surface temperature would change between 1.5 and 4.5 K. There are, however, latitudinal and seasonal variations of the impact of increased CO₂ concentration. Other meteorological variables (e.g. precipitation, wind speed etc.) would also be changed. It appears that the impacts of the other products of fossil fuel combustion are unlikely to counteract the impacts of CO₂ on the climate.

Inhaltsverzeichnis:

	<u>Seite</u>
Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	0-1
1. Einleitung	1
2. Die beobachtete Zunahme der CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre	2
3. Der Kohlenstoffkreislauf	7
4. CO ₂ -Emission aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre	18
5. CO ₂ -Emission aus biotischen Quellen in die Atmosphäre	21
6. Prognosen zur zukünftigen CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre	24
7. Die Auswirkungen einer höheren CO ₂ -Konzentration auf das Klima	27
7.1 Verfügbare Modelle zur Untersuchung des Einflusses einer erhöhten atmosphärischen CO ₂ -Konzentration auf das Klima	27
7.1.1 Strahlungsmodelle	27
7.1.2 Strahlungs-Konvektions-Modelle	28
7.1.3 Energiebilanz-Modelle	29
7.1.4 Zweidimensionale statistisch-dynamische Modelle	30
7.1.5 Allgemeine Zirkulationsmodelle	31
7.2 Der "Treibhauseffekt" und mögliche Rückkopplungen	34
7.3 Durch die geographische Breite und die Jahreszeitenbedingte Schwankungen	36
7.4 Untersuchungen mit allgemeinen Zirkulationsmodellen	40
7.5 Die Rolle der Meere	42
7.6 Transientes Verhalten der Atmosphäre bei Zunahme der CO ₂ -Konzentration	43

	<u>Seite</u>
7.7 Die Frage des Signal-zu-Rauschverhältnisses	45
7.8 Szenarien für das Klima der Vergangenheit	47
7.9 Auswirkungen der Zunahme der CO ₂ -Konzentration auf die Schnee- und Eisbedeckung	50
8. Die Auswirkungen anderer bei der Kohleumwandlung entstehender Produkte	52
Literatur	58

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

1. Seit 1958 wird die Menge des Kohlendioxids (CO_2) in der Atmosphäre durch genaue Messungen ermittelt, und es besteht kein Zweifel darüber, daß die Konzentration zunimmt. Es wird angenommen, daß die Zunahme teilweise oder ganz auf die CO_2 -Abgabe in die Atmosphäre durch Verbrennen fossiler Brennstoffe zurückzuführen ist. In jüngster Zeit wird auch behauptet, daß die Freisetzung von CO_2 infolge des Abholzens von Wäldern, der Neugewinnung von Anbauflächen und der Intensivierung der Landwirtschaft, insbesondere in den Tropen, zu der beobachteten CO_2 -Zunahme beigetragen hat.
2. Die mittlere jährliche CO_2 -Konzentration, gemessen auf dem Mauna Loa, Hawaii, stieg von etwas über 315 ppm 1958 auf fast 336 ppm im Jahre 1978. In den vergangenen 20 Jahren gelangten durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe und in geringerem Ausmaß durch die Zementproduktion und das Abfakeln von Erdgas pro Jahr zusätzlich 1 - 2 ppm CO_2 in die Atmosphäre. Unter der Annahme, daß diese die einzigen künstlichen CO_2 -Quellen sind, beträgt die CO_2 -Zunahme in der Atmosphäre nach einer groben Schätzung jährlich etwa die Hälfte der Kohlenstoffmenge, die durch den Einsatz an fossilen Brennstoffen an die Atmosphäre abgegeben wird.
3. Um verlässliche Voraussagen über künftige CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre machen zu können, müssen die natürlichen und anthropogenen Quellen und Senken des CO_2 bekannt sein. Weltweit gesehen sind die Kohlenstoffspeicher (Atmosphäre, Meer, Pflanzen- und Tierwelt und Lithosphäre) und die Übergänge zwischen ihnen die Bestandteile des Kohlenstoffkreislaufs.
4. Zur Voraussage der CO_2 -Konzentration werden numerische Modelle des Kohlenstoffkreislaufs benutzt. Das am häufigsten verwendete Modell ist das Box-Modell, in dem die vier Kohlenstoffreservoirs betrachtet werden und der Kohlenstofftransport zwischen ihnen berechnet wird.
5. Nach dem derzeitigen Wissensstand über den Kohlenstoffkreislauf gibt es zwei mögliche Senken für das durch Verbrennen fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre abgegebene CO_2 : das Meer und die Pflanzen- und Tierwelt des Festlands. Die Speicherkapazität der Weltmeere für Kohlenstoff ist

außergewöhnlich hoch, jedoch vollzieht sich der Transport von der Atmosphäre in die Tiefsee langsam. Die Pflanzen- und Tierwelt des Festlands kann entweder als Quelle oder als Senke für Kohlenstoff wirken. Das Abholzen von Wäldern, die Neugewinnung von Anbauflächen und die Intensivierung der Landwirtschaft führen zur Freisetzung von CO_2 , wohingegen der höhere CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre das Pflanzenwachstum anregen könnte. Dadurch würde sich die Biomasse vergrößern, und es würde wiederum eine Senke für CO_2 entstehen.

6. Die meisten Modelle für den Kohlenstoffkreislauf, die zur Voraussage künftiger CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre benutzt werden, sind ein-dimensional. In wirklichkeitsnäheren Modellen müßten Ozean und Biosphäre ausführlicher betrachtet werden. Es zeigt sich, daß die Grenzen für das Aufstellen von Modellen nicht bei der Computer-Hardware liegen, sondern im Verständnis des Systems und in der Unzulänglichkeit der Daten.

7. Es gibt jedoch Möglichkeiten, künftige CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre vorauszusagen. Beobachtungen deuten darauf hin, daß etwa 50 % des CO_2 , das bei der Verbrennung von fossilem Brennstoff in den vergangenen 20 Jahren freigesetzt wurde, in der Atmosphäre verblieben sind. Da es unwahrscheinlich ist, daß sich die biochemischen Bedingungen in den nächsten 20 - 30 Jahren wesentlich ändern, dürften Voraussagen über diesen Zeitraum möglich sein. Die vorhandenen Modelle stimmen in ihrer Prognose für diesen Zeitraum überein, jedoch nehmen die Unsicherheiten danach rasch zu. Die Rolle der Biosphäre ist am unklarsten; dagegen besteht recht gute Übereinstimmung über die Rolle des Meeres.

8. Neue Untersuchungen zur CO_2 -Produktion aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe weisen darauf hin, daß die Kohlenstoffmenge, die in den nächsten 50 bis 100 Jahren zu Auswirkungen führen würde, nur von einer kleinen Anzahl von Ländern gewonnen werden könnte. Außer einem Land wären dies alles fortgeschrittene Industrieländer. Das führt zu der Schlußfolgerung, daß ein sehr umfassender Kohlehandel die Voraussetzung für ein weltweites CO_2 -Problem wäre.

9. Neuere Arbeiten lassen vermuten, daß die Wälder in den Tropen und in den gemäßigten Zonen Kohlenstoff speichern; zumindest könnte das in den

vergangenen Jahrzehnten der Fall gewesen sein. Offensichtlich besteht große Unklarheit über die biotischen Quellen und Senken für Kohlenstoff, jedoch zeigen theoretische Studien und Beobachtungen der Meere sowie der Pflanzen- und Tierwelt, daß die Pflanzen- und Tierwelt derzeit keine Nettoquelle darstellt, die so viel CO_2 liefert wie die Verbrennung fossiler Brennstoffe.

10. Die meisten Voraussagen gehen von einem ständigen Zuwachs der CO_2 -Menge in der Atmosphäre aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Abholzung von Wäldern aus. In zahlreichen Untersuchungen wird darauf hingewiesen, daß bei einer jährlichen Zunahme des Einsatzes fossiler Brennstoffe von 3 % oder mehr sich die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre innerhalb der nächsten 100 Jahre gegenüber dem vorindustriellen Wert verdoppeln wird.

11. Viele mit Klimamodellen unterschiedlicher Kompliziertheit durchgeführte Studien haben gezeigt, daß ein höherer CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre zu einer Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre führt. Diese Erwärmung ist dadurch bedingt, daß CO_2 langwellige Strahlung gut absorbiert bzw. emittiert.

12. Berechnungen ergeben, daß eine Verdoppelung der Konzentration des CO_2 in der Atmosphäre global zu einer Nettoerwärmung der unteren Atmosphäre, der Meere und des Festlands von durchschnittlich ca. 4 Wm^{-2} führt, und man ist relativ sicher, daß dieser Schätzwert auf $\pm 25 \%$ genau ist. Größere Unsicherheiten ergeben sich bei der Abschätzung der Veränderung der Oberflächentemperatur infolge dieser Veränderung der Erwärmungsrate. Unter Berücksichtigung der bekannten Rückkopplungseffekte wurde geschätzt, daß sich bei einer Verdoppelung der CO_2 -Konzentration die globale mittlere Jahrestemperatur der Erdoberfläche um 1,5 - 4,5 K ändert; 2,4 K ist der wahrscheinliche Wert.

13. Die Auswirkungen des erhöhten CO_2 -Gehalts schwanken je nach geographischer Breite und Jahreszeit; dies ist auf die Abhängigkeit der durch Strahlung bedingten Erwärmungsprozesse von der Temperatur und der Feuchtigkeit zurückzuführen. Die mit Klimamodellen erzielten Ergebnisse zeigen,

daß bei einer Verdoppelung des CO_2 -Gehalts die Jahresmittelwerte der Erdoberflächentemperatur in der Hemisphäre um 3,3 K zunehmen. Die Oberflächentemperatur erhöht sich in niederen Breiten pro Jahr um etwas über 3 K und um mehr als 5 K in hohen Breiten. Die Ergebnisse zeigen für die niederen Breiten praktisch keine jahreszeitlich bedingte Veränderlichkeit der Temperaturerhöhung, jedoch nimmt die Temperatur in höheren Breiten im Frühjahr bei 65° n. Br. und im Frühjahr und im Sommer bei 85° n. Br. stärker zu. Die stärkere Zunahme im Frühjahr/Sommer ist auf den Eis-Albedo-Rückkopplungseffekt zurückzuführen.

14. Um die Auswirkungen des größeren CO_2 -Gehalts richtig abschätzen zu können, muß man nicht nur wissen, wie sich die mittlere, globale Temperatur ändert, sondern auch, wie sich die anderen meteorologischen Größen (Regen, Temperatur, Windgeschwindigkeit usw.) zu verschiedenen Zeiten des Jahres und in bestimmten Regionen ändern. Bemühungen zur Beantwortung dieser Fragen werden vor allem durch den Einsatz allgemeiner Zirkulationsmodelle der Atmosphäre bzw. des Systems Atmosphäre-Ozean unternommen.

15. Die allgemeinen Zirkulationsmodelle können zur Zeit wegen einer Reihe von Mängeln die regionale Verteilung der Variablen nicht nachbilden. Diese Mängel betreffen die ungenügende Behandlung von Wolken, Niederschlägen und orographischen Effekten. Deshalb gelten die bestehenden Modelle als nicht zuverlässig in ihren Voraussagen für regionale Klimaveränderungen als Folge einer erhöhten CO_2 -Konzentration. Die Voraussagen der durch CO_2 bedingten Klimaveränderungen, die mit verschiedenen Modellen erfolgten, stimmen überein. Die der tatsächlichen Entwicklung wahrscheinlich am nächsten kommende Schätzung besagt, daß bei einer Verdoppelung der CO_2 -Konzentration und dem ausreichend langen Verbleib dieser CO_2 -Menge in der Atmosphäre und in den mittleren Schichten des Ozeans, so daß das thermische Gleichgewicht in etwa erreicht wird, sich die globale Temperatur um etwa 3 K ändert und gleichzeitig größere Veränderungen des regionalen Klimas stattfinden.

16. In den meisten Untersuchungen mit Klimamodellen wurde die Reaktion des Gleichgewichtsklimas auf eine CO_2 -Konzentrationsänderung untersucht, die einer Stufenfunktion folgt. In Wirklichkeit erhöht sich die CO_2 -Konzentration von Jahr zu Jahr, und es muß das Transientenverhalten des Klimas bei

zeitabhängiger CO_2 -Zunahme untersucht werden. In mehreren Studien wurden die zeitlichen Verzögerungen des Klimaverhaltens bei aufgezwungenen Veränderungen untersucht. Aus den meisten Studien geht hervor, daß die global gemittelte Oberflächentemperatur ihren Gleichgewichtswert einige oder viele Jahre nach Verdoppelung der CO_2 -Konzentration erreichen würde. Darüber hinaus haben neuere Modellstudien gezeigt, daß die Entwicklung von einem stationären Zustand zum nächsten anders erfolgt, als in den Gleichgewichtsmodellen vorausgesagt. Die Frage der zeitlichen Verzögerungen und des Transientenverhaltens muß als Forschungsthema hohe Priorität erhalten.

17. Künftige Arbeiten auf dem Gebiet der Klimamodelle müssen sich mit der Verbesserung allgemeiner Zirkulationsmodelle befassen, damit regionale Klima-anomalien zuverlässig vorhergesagt werden können. Darüber hinaus ist der Einsatz einfacherer Modelle für die Durchführung von Sensitivitätsuntersuchungen und für die Bestimmung der Parametrisierung in komplexeren Modellen wünschenswert.

18. Ein anderer methodischer Ansatz zur Untersuchung der Auswirkungen steigender CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre bezüglich regionaler Klimaveränderungen besteht in der historischen Analyse von Klimaentwicklungen. Es wurden speziell Zeiträume untersucht, in denen die Erde wärmer war als sie heute ist. Wahrscheinlich wird die Kombination von historischen Beobachtungsergebnissen zusammen mit Modelluntersuchungen zu einem besseren Verständnis des Klimaverhaltens bei Störungen führen.

19. Die Auswirkungen einer Erwärmung der Eisschollen in Grönland und in der Antarktis sind vermutlich komplex und wirken sich über viel längere als die für Schnee und Packeis betrachteten Zeiträume aus. Das Abschmelzen der Eisschollen würde den Meeresspiegel auf der Erde anheben, jedoch nimmt man an, daß sich dieser Vorgang über einen Zeitraum von hunderten bis tausenden von Jahren abspielt. Eine mögliche Ausnahme ist die Eisscholle in der westlichen Antarktis. Eine wichtige, aber strittige Frage ist die Möglichkeit des vollkommenen Verschwindens des arktischen Eises. Dies wäre für das Klima nicht nur in der Arktis, sondern auch in mittleren und niederen Breiten von größter Bedeutung.

20. Es gibt zahlreiche Unklarheiten bezüglich der Auswirkungen anderer Produkte aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, jedoch zeigt sich, daß sie den Auswirkungen von CO_2 auf das Klima vermutlich nicht nur entgegenwirken, sondern eventuell additiv auftreten können.

1. Einleitung

Seit 1958 werden genaue Messungen der in der Atmosphäre vorkommenden Kohlenstoffmengen durchgeführt, und es besteht kein Zweifel darüber, daß die Konzentration zunimmt. Man nimmt an, daß diese Zunahme teilweise oder insgesamt auf die Abgabe von Kohlendioxid (CO_2) an die Atmosphäre durch Verbrennen fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl und Gas) zustandekommt. In jüngster Zeit wird auch behauptet, daß das durch Abholzen von Wäldern, Neugewinnung von Anbauflächen und Intensivierung der Landwirtschaft insbesondere in den tropischen Ländern freigesetzte CO_2 ebenfalls zu der beobachteten CO_2 -Zunahme beiträgt. Anlaß zur Sorge besteht aufgrund der Möglichkeit, daß eine bedeutende Erhöhung der CO_2 -Konzentration zu irreversiblen und unerwünschten Klimaveränderungen führt. Deshalb muß geklärt werden, ob diese Zunahme anhalten wird. Voraussetzung dafür ist, daß man die Ursache der gegenwärtig beobachteten Zunahme versteht. Genauer gesagt, es müssen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie hoch war bisher die CO_2 -Zuwachsrates in der Atmosphäre durch Verbrennen fossiler Brennstoffe?
- Wie hoch war bisher die CO_2 -Zuwachsrates durch das Abholzen von Wäldern und die Neugewinnung von Anbauflächen sowie die Intensivierung der Landwirtschaft? Wurde durch andere biologische Vorgänge gleichzeitig CO_2 aus der Atmosphäre beseitigt (beispielsweise stärkeres Wachstum in den mittleren Breiten)?
- Wieviel der Gesamt- (oder Netto-) Zunahme an CO_2 aufgrund der genannten Prozesse ist in der Atmosphäre geblieben? Was geschieht mit dem durch Verbrennen fossiler Brennstoffe, Abholzen von Wäldern, Neugewinnung von Anbauflächen sowie Intensivierung der Landwirtschaft entstehenden CO_2 , soweit es nicht in der Atmosphäre verbleibt?
- Aufgrund unserer Kenntnisse über die bisherigen CO_2 -Quellen und -Senken ist zu fragen, wie hoch bei unterschiedlichen Szenarien für die Verbrennung fossiler Brennstoffe und das Abholzen von Wäldern in Zukunft die CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre sein wird?
- Welche Veränderungen des Klimas und der Umwelt sind wahrscheinlich mit der Zunahme von CO_2 in der Atmosphäre verbunden?

2. Die beobachtete Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre

Abb. 1 zeigt die mittlere CO₂-Konzentration pro Monat auf dem Mauna Loa, Hawaii, vom Beginn des Meßprogramms 1958 bis Ende 1978 (Keeling et al., 1976; Slade, 1979). Die Konzentrationen werden durch Kreise angegeben, die durch eine durchgezogene Linie verbunden sind; eine gestrichelte Linie weist an zwei Stellen auf das Fehlen von Werten hin. Die mittlere Jahreskonzentration wird durch die waagerechte, gestrichelte Linie angegeben. Die Zahlen unter der Abbildung geben die jeweilige Änderung der mittleren Konzentration von einem Jahr zum anderen an. Wenn Daten für einen oder mehrere Monate fehlen, ist die Änderung gegenüber dem Vorjahr in Klammern gesetzt.

Aus der Abbildung sind zwei Tatbestände ersichtlich; und zwar die jahreszeitlichen Schwankungen mit einer Abnahme der CO₂-Konzentration während der Wachstumsperiode in der nördlichen Hemisphäre, und die langfristige Zunahme der CO₂-Konzentration. Genauere Untersuchungen haben gezeigt, daß die jahreszeitliche Schwankung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hauptsächlich durch jahreszeitliche Veränderungen der Pflanzenwelt auf dem Festland erklärt werden kann (Machta, 1979). Die auf dem Mauna Loa gemessene mittlere CO₂-Jahreskonzentration erhöhte sich von etwas über 315 ppm (1958) auf fast 336 ppm (1978). Diese Zunahme wird durch andernorts durchgeführte Messungen bestätigt und ist eindeutig weltweit zu verzeichnen (z.B. Keeling und Bacastow, 1977).

Man nimmt an, daß diese Zunahme vorwiegend auf das Verbrennen fossiler Brennstoffe zurückgeht. Durch die Zementherstellung und das Abfackeln von Erdgas wird ebenfalls CO₂ an die Atmosphäre abgegeben, jedoch sind die Mengen klein im Vergleich zu der Freisetzung durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe. Die Jahreswerte der CO₂-Emission aus diesen Quellen, die Rotty (1973, 1977) für den Zeitraum von 1860 - 1976 global errechnet hat, gehen aus Abb. 2 hervor. Es gibt demnach eine deutliche exponentielle Zunahme der CO₂-Produktion. Die beiden Weltkriege und die große Wirtschaftskrise der 30er Jahre ausgenommen, ist mit einer Zuwachsrate von 4,3 % pro Jahr eine ausgezeichnete Anpassung an die Werte erreicht.

In den vergangenen 20 Jahren kamen pro Jahr 1 - 2 ppm CO₂ durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe und in weitaus geringerem Maße durch die Ze-

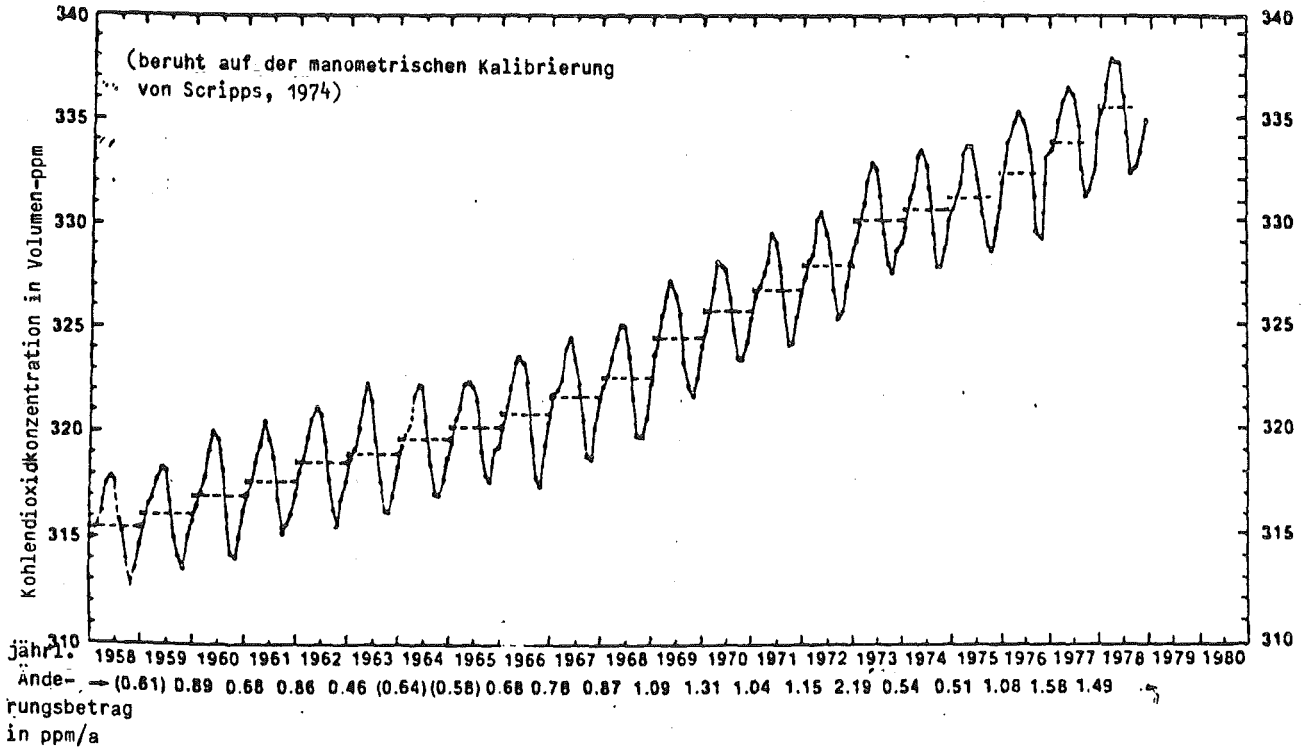


Abb. 1: CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, gemessen am Observatorium von Mauna Loa, Hawaii. Die mittleren monatlichen Konzentrationen sind als Kreise angegeben, die durch eine durchgezogene Linie miteinander verbunden sind. Eine gestrichelte Linie zwischen den Punkten bedeutet, daß keine Daten vorliegen. Die waagerechte, gestrichelte Linie entspricht den mittleren Jahreskonzentrationen. Die Zahlen unter der Abbildung geben die Höhe der Änderungen der Jahreskonzentration an. Wenn sie in Klammern gesetzt sind, fehlen die Werte für einen oder mehrere Monate des Jahres, für das der Mittelwert bestimmt wurde.

Quelle: Keeling et. al. (1976), ergänzt von Machta.

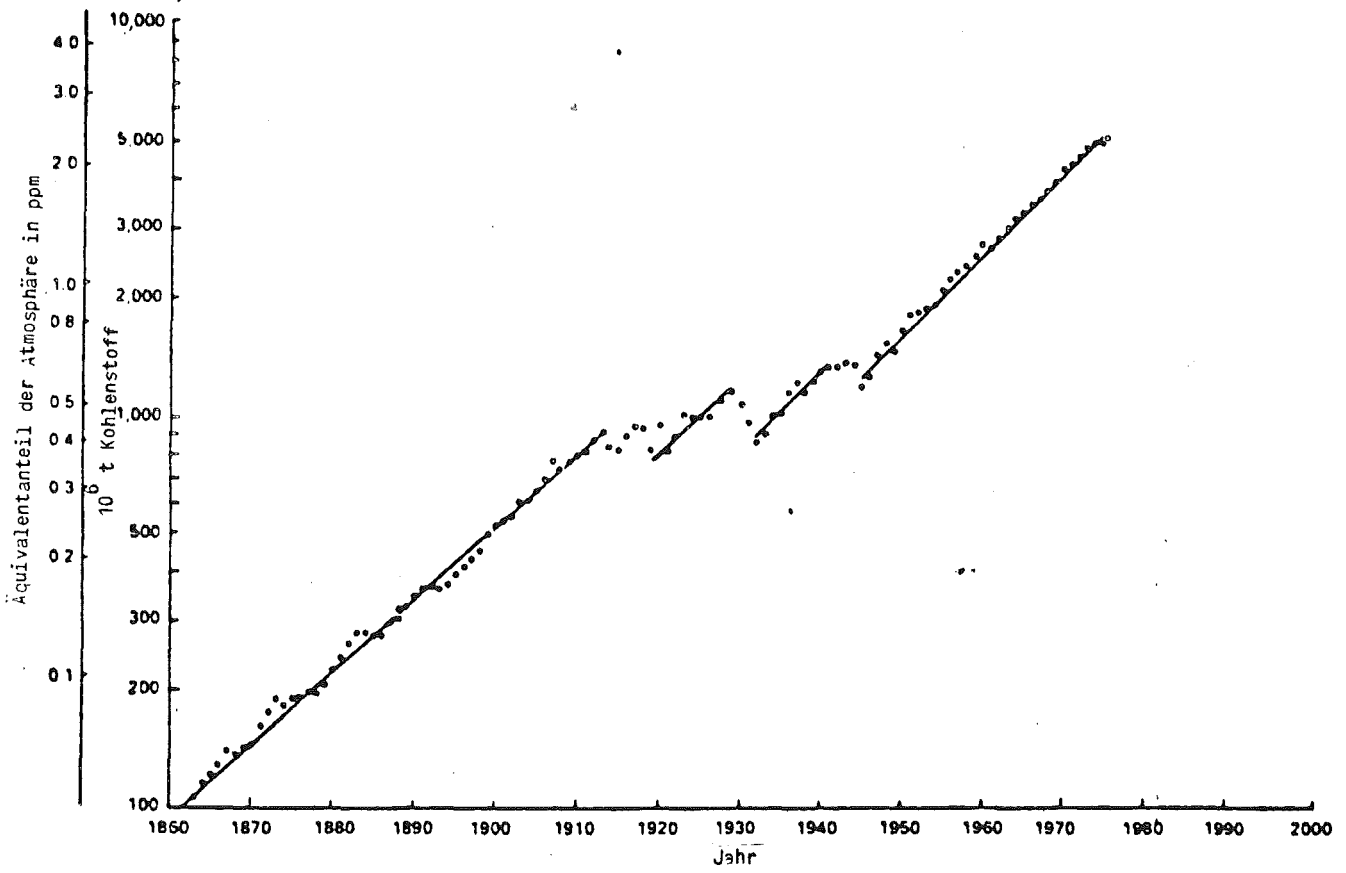


Abb. 2: CO₂-Produktion aus fossilen Brennstoffen und Zement
Quelle: Rotty (1979)

mentproduktion und das Abfackeln von Erdgas hinzu. Die jährliche CO_2 -Zunahme in der Atmosphäre ist grob geschätzt etwa halb so groß wie die durch den Einsatz fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre freigesetzte jährliche CO_2 -Menge. Nimmt man an, daß die Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie Zementherstellung und das Abfackeln von Erdgas die einzigen Quellen für CO_2 sind, dann kann man den prozentualen CO_2 -Anteil, der jedes Jahr in der Luft verbleibt und gewöhnlich als air-borne fraction bezeichnet wird, aus dem Verbrauch fossiler Brennstoffe errechnen. Dieser Anteil variiert sehr stark zwischen 25 und mehr als 100 %. Machta (1979) hat darauf hingewiesen, daß sich die 'air-borne fraction' von Jahr zu Jahr nicht so stark verändern würde, wenn die jährliche CO_2 -Zunahme in der Atmosphäre von mehr Stationen als nur der Station auf dem Mauna Loa berechnet werden würde. Auch ergibt sich aus Untersuchungen, daß Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean in den Tropen die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre ebenfalls beeinflussen, und auf diese Weise wiederum die 'airborne fraction' (z.B. Bacastow, 1976). Der langfristige Wert des jährlich in der Atmosphäre verbleibenden CO_2 zu dem freigesetzten CO_2 , berechnet aus Mittelwerten der auf dem Mauna Loa und am Südpol gemachten Beobachtungen, betrug nach Bacastow und Keeling (1979) von 1959 bis 1974 ca. 56 %. Die Autoren weisen darauf hin, daß dieser CO_2 -Anteil ungenau ist, insbesondere wegen systematischer Fehler von ca. 15 % bei den Werten für den fossilen Brennstoffeinsatz.

Für die Zeit bevor genaue Beobachtungen der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre durchgeführt wurden, d.h. vor 1957, gibt es keine zuverlässigen Werte. Die CO_2 -Konzentration in der vorindustriellen Zeit wird auf 265 - 290 ppm (Bolin, 1979) bzw. auf 285 - 305 ppm (Machta, 1979) geschätzt. Für die Mitte des 19. Jahrhunderts wird allgemein ein Wert von 290 - 295 ppm angenommen.

Die genannten Zahlen lassen erkennen, daß ungefähr 50 bis 60 % des pro Jahr durch Verbrennen fossiler Brennstoffe freigesetzten CO_2 in der Atmosphäre verbleiben. Für Voraussagen über künftige CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre gilt, daß nach groben Schätzungen auch in Zukunft pro Jahr etwa 50 % des von fossilen Brennstoffen freigesetzten CO_2 in der Atmosphäre verbleiben. Diese Aussage kann und wurde aus verschiedenen Gründen angegriffen. Zunächst muß man wissen, wohin die 40 bis 50 % CO_2 gehen, die nicht in der Atmosphäre bleiben. Mögliche Senken sind die Meere sowie die Pflanzen- und Tierwelt;

zweitens kann nicht davon ausgegangen werden, daß die Verbrennung fossiler Brennstoffe (sowie Zementproduktion und Abfackeln von Erdgas) die einzige anthropogene Quelle für CO_2 in der Atmosphäre ist. Wie in den folgenden Abschnitten noch ausführlicher dargestellt wird, wurde auf weitere vom Menschen geschaffene Quellen für CO_2 in der Atmosphäre hingewiesen (z.B. Woodwell, 1978): das Abholzen von Wäldern, insbesondere in den Tropen, die Neugewinnung von Anbauflächen und die Intensivierung der Landwirtschaft. Nimmt man als Extremfall an, daß durch diese letztgenannten Quellen genausoviel CO_2 in die Atmosphäre abgegeben wird wie durch Verbrennung fossiler Brennstoffe, dann wäre die tatsächliche 'airborne fraction' nur halb so groß wie bei Außerachtlassung biotischer Quellen. Um also zuverlässige Voraussagen über die künftigen Konzentrationen von CO_2 in der Atmosphäre machen zu können, muß man die natürlichen und anthropogenen Quellen und Senken für CO_2 kennen. Weltweit gesehen sind die Speicher für Kohlenstoff (Atmosphäre, Meere, Pflanzen- und Tierwelt und Lithosphäre) sowie die Übergänge zwischen ihnen die Bestandteile des "Kohlenstoffkreislaufs".

3. Der Kohlenstoffkreislauf

Unsere derzeitigen Kenntnisse aller Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs wurden von Bolin et al., (1979) umfassend dargestellt. Abb. 3, die auf seiner Untersuchung beruht, zeigt die wesentlichen Bestandteile des Kohlenstoffkreislaufs. Die vier Speicher für Kohlenstoff sind die Atmosphäre, das Meer, die Pflanzen- und Tierwelt sowie die Lithosphäre. Die Größe der Speicher und die Flüsse zwischen ihnen sind ungewiß. Einige Flüsse sind nicht so gut bekannt, daß sie in die schematische Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs aufgenommen werden können.

Im Jahre 1980 enthält die Atmosphäre ca. 710×10^{15} g Kohlenstoff im Vergleich zu den für 1860 geschätzten 610×10^{15} g Kohlenstoff. Das Meer kann in drei Schichten unterteilt werden: die durchmischte Schicht an der Oberfläche mit ca. 680×10^{15} g C; die mittlere Schicht mit ca. 8200×10^{15} g C und die unterste Schicht mit ca. $26\,000 \times 10^{15}$ g C. Zwischen der Tiefsee und den übrigen Ozeanschichten findet nur ein sehr langsamer Austausch statt, deshalb wird dort Wasser gefunden, das bis zu 1000 Jahre alt ist. Die Schätzungen der Kohlenstoffmenge in lebender Materie auf dem Festland sind unterschiedlich. Machta und Elliot (1980) geben einen Kohlenstoffgehalt in lebender Materie von 590×10^{15} g C an; siehe Abb. 3. Bolin (1979) meint, daß ca. 800×10^{15} g C als lebende, organische Materie auf dem Festland gespeichert werden. Desgleichen schwanken die Schätzungen der Gesamtkohlenstoffmenge im Boden zwischen 1000×10^{15} g C und 3000×10^{15} g C. Die Unsicherheit ist in erster Linie auf die unterschiedlichen Werte zurückzuführen, die für den in Form von Torf gespeicherten Kohlenstoff angenommen werden. Da jedoch Kohlenstoff in diesem Speicher tausende von Jahren gebunden ist, ist die Unsicherheit nicht so gravierend, wenn Störungen durch menschliche Aktivitäten in der Größenordnung von einigen 100 Jahren oder weniger betrachtet werden. Die Kohlenstoffmenge in abbaubaren fossilen Brennstoffen (90 % in Kohle) wird im allgemeinen mit 5000×10^{15} g C angegeben (Bolin, 1979; Munn und Machta, 1979), auch diese Schätzungen schwanken.

Zur Vorhersage der CO_2 -Konzentration werden Rechenmodelle des Kohlenstoffkreislaufs benutzt. Eines der üblichsten Modelle ist das Box-Modell, das die Kohlenstoffspeicher und die Übergänge des Kohlenstoffs zwischen ihnen be-

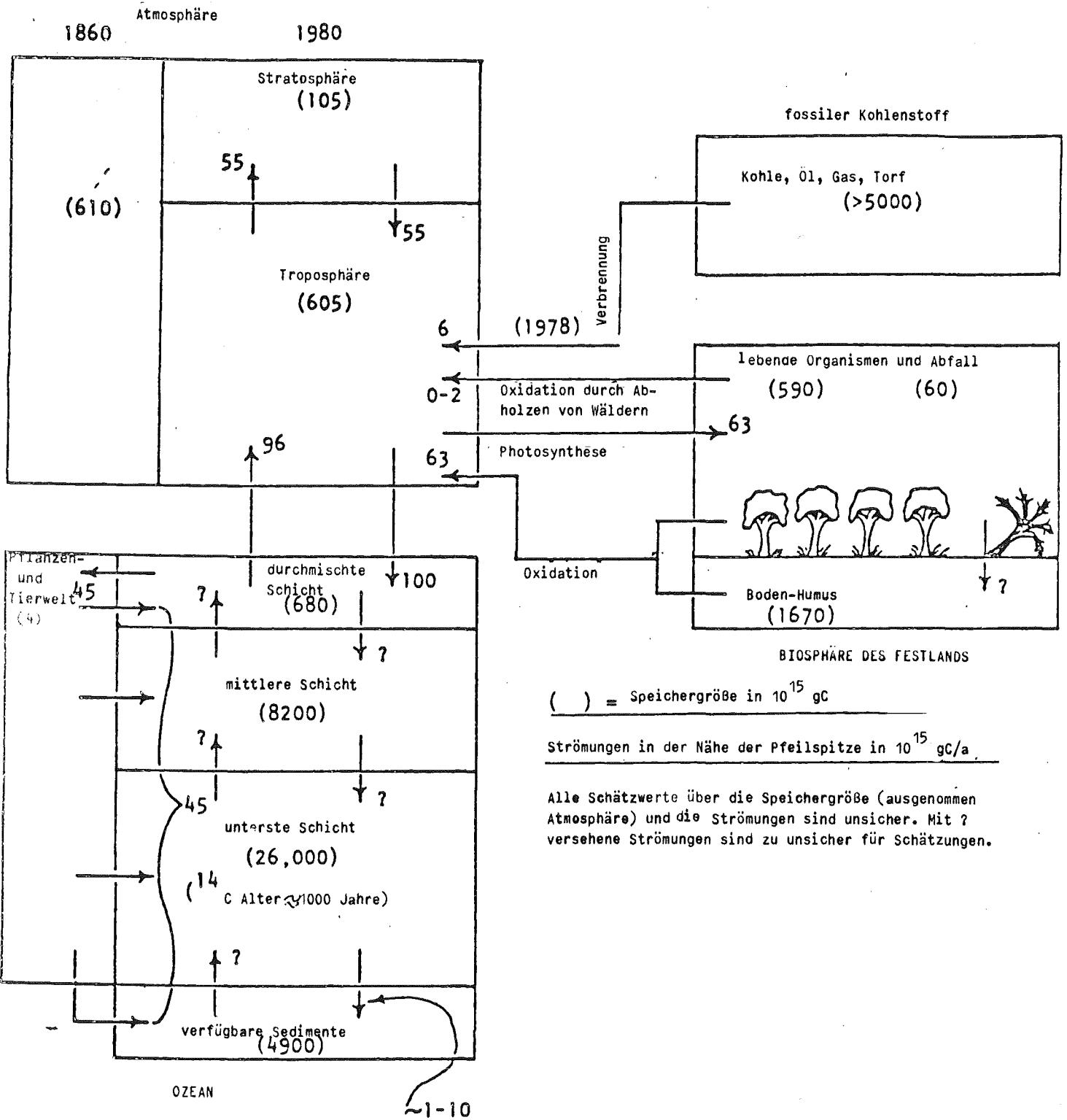


Abb. 3: Globaler Kohlenstoffkreislauf
 Quelle: Machta und Elliot (1980) nach Bolin et al. (1979)

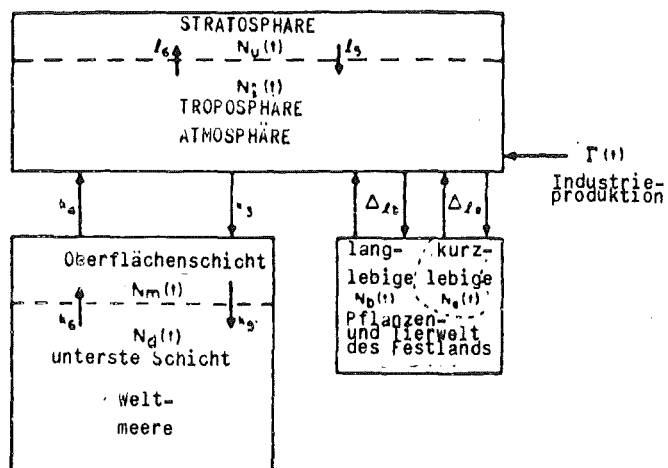


Abb. 4: 6-Speicher-Modell des Kohlenstoffkreislaufs. Die Kohlenstoff-masse in jedem Speicher ist gegeben durch $N_j(t)$, und die Koeffizienten des Übergangs zwischen den Speichern sind gegeben durch l_j und k_j .
Quelle: Bacastow und Keeling (1973)

trachtet (z.B. Keeling und Bacastow, 1977). Ein aus sechs Speichern bestehendes Modell zeigt Abb. 4. In diesem Beispiel sind die Atmosphäre, die Meere sowie die Pflanzen- und Tierwelt des Festlands jeweils in zwei Bereiche unterteilt. Die Stratosphäre und die Pflanzen- und Tierwelt mit kurzem Kreislauf tauschen den Kohlenstoff extrem rasch mit der Atmosphäre aus. In beiden Fällen wird der gesamte Kohlenstoff im Speicher in weniger als 2,5 Jahren einmal ausgetauscht. Deshalb haben diese Speicher eine geringe Auswirkung auf die Speicherung des anthropogenen CO_2 , und das Modell kann im allgemeinen auf vier Speicher reduziert werden, wobei lediglich die Meere unterteilt werden. Es gibt verschiedene Arten, die Modelle zu testen und herauszufinden, ob sie den Kohlenstoffkreislauf wirklichkeitsgetreu nachbilden (Broecker, 1977). Es sollte beispielsweise möglich sein, mit einem Modell die zwischen 1878 und 1958 beobachtete Zunahme des CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre zu reproduzieren. Ebenfalls sollte es möglich sein, die seit 1963 beobachtete Abnahme des durch Bombentests produzierten Kohlenstoffs (C-14) zu simulieren.

Nach der Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs in Abb. 4 kommen für das durch Verbrennen fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre freigesetzte CO_2 zwei Senken in Frage: die Meere und die Pflanzenwelt des Festlands. Die Speicherkapazität der Weltmeere für Kohlenstoff ist enorm, jedoch erfolgt der Übergang von der Atmosphäre in die Tiefsee langsam. Die physikalisch-chemischen Prozesse des Übergangs von Kohlenstoff aus der Atmosphäre an die Meeresoberfläche sind recht gut bekannt. Die CO_2 -Aufnahme-Rate des Ozeans hängt von 3 Prozessen ab. Der erste davon ist die Aufnahmekapazität von Meerwasser für überschüssiges CO_2 im chemischen Gleichgewicht. Das heißt, für eine gegebene Zunahme an atmosphärischem CO_2 ist zu untersuchen, um wieviel der CO_2 -Gehalt von einem Kubikmeter Meereswasser im chemischen Gleichgewicht mit der Atmosphäre zunimmt. Die zweite Komponente ist die Transfargeschwindigkeit für CO_2 von der Atmosphäre in die Oberflächenschicht, die bestimmt, wie schnell der Gehalt an im Oberflächenwasser gelöstem anorganischem Kohlenstoff auf Änderungen im atmosphärischen CO_2 -Gehalt reagiert. Die dritte Komponente ist die Rate der vertikalen Durchmischung des Meeres, da die Menge des durch das Meer aufgenommenen CO_2 auch von der Geschwindigkeit abhängt, mit der sich das CO_2 mit der Tiefsee vermischt. Bei den Komponenten 2 und 3 ist die Kinetik wesentlich. Sie bestimmt, wie rasch ein Gleichgewicht mit der Atmosphäre angenähert wird. Jede dieser Komponenten weist geographische und saisonale Schwankungen auf.

Die Aufnahmekapazität von Meerwasser für überschüssiges atmosphärisches CO_2 ist eine thermodynamische Größe und hängt von der chemischen Zusammensetzung des Meeres, der Löslichkeit von gasförmigem CO_2 in Meerwasser und den Dissoziationskonstanten von Kohlen- und Borsäure ab. Sie kann durch den Pufferfaktor ausgedrückt werden, der manchmal auch mit Revelle-Faktor bezeichnet wird (Broecker et al., 1979). Um in Meerwasser einen Anstieg von 1 % in der Gleichgewichtskonzentration von gelöstem anorganischem Kohlenstoff zu erhalten, muß der Partialdruck von CO_2 in der Atmosphäre um R % ansteigen. Dabei ist R der Revelle-Faktor. Für Oberflächenwasser ist der Wert von R gut korreliert mit der Wassertemperatur. Der Wertebereich von R reicht von 8 für das wärmste Oberflächenwasser bis 15 für das kälteste Oberflächenwasser. In Modellrechnungen wird als Durchschnittswert gewöhnlich 10 verwendet (Broecker et al., 1979, Oeschger et al., 1975).

Die Pflanzenwelt des Festlands kann entweder als Quelle oder Senke für Kohlenstoff wirken. Hauptspeicher sind die Wälder, insbesondere die tropischen Wälder und die Wälder der gemäßigten und kalt gemäßigten (borealen) Zone der nördlichen Hemisphäre. Das Abholzen von Wäldern wurde als Quelle für CO_2 in der Atmosphäre genannt (z.B. Woodwell, 1978). Ebenso wird durch Neugewinnung von Anbauflächen und Intensivierung der Landwirtschaft CO_2 freigesetzt. Wenn zuvor unbebautes Land kultiviert wird, werden die Mikroorganismen durch das Pflügen mit mehr Sauerstoff versorgt und es kann weniger Humus gebildet werden, so daß mehr Kohlenstoff frei wird. In mehreren Studien wurde versucht, die Freisetzung von organischem Bodenkohlenstoff in die Atmosphäre quantitativ zu erfassen. Bohn (1978) schätzte, daß in den letzten 100 Jahren ca. 150 Gt Kohlenstoff aus dem Boden als CO_2 in die Atmosphäre gelangte. Nach Schlesinger (1977) wurden im gleichen Zeitraum nur 36 Gt Kohlenstoff aus Böden freigesetzt.

Die Zunahme von CO_2 in der Atmosphäre kann die Pflanzen zum verstärkten Wachstum anregen, wodurch sich deren Biomasse vergrößert und dadurch als eine Senke wirken. Dieser Prozeß wird " CO_2 -Düngung" genannt. Er wird in Gewächshäusern wirksam, wo das Wachstum durch Erhöhung des CO_2 -Gehalts in der Luft angeregt wird. Außerhalb der Gewächshäuser, wo Wasser- und Nährstoffzufuhr zuweilen begrenzt sind, wird angenommen, daß eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre um 10 % zu einer 0 - 3 % größeren Biomasse führt. Dieser Düngungseffekt wird in Modellen des Kohlenstoffkreislaufs berücksichtigt (z.B. Oeschger et al., 1975; Keeling, 1973).

Bacastow und Keeling (1979) haben eine Reihe von Sensitivitätsuntersuchungen mit dem in Abb. 4 gezeigten 6-Speicher-Modell durchgeführt. Zuerst wurde die Reaktion des Modells für vier verschiedene Einsatzstrategien fossiler Brennstoffe untersucht, wobei die fossilen Brennstoffe jeweils unterschiedlich schnell verbrannt wurden. Die Brennstoffeinsätze gehen aus Abb. 5 hervor. In jedem Fall erreicht die CO_2 -Produktion einen Spitzenwert und fällt dann ab. Je höher der Spitzenwert, desto schneller erfolgt aufgrund der angenommenen Brennstoffeinsätze der anschließende Abfall der Produktion. Abb. 6 zeigt die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre, wie sie das 6-Speicher-Modell für die Kurven der CO_2 -Produktion der Abb. 5 voraussagt. Das CO_2 steigt bis zu einem Spitzenwert zwischen den Jahren 2050 und 2150 und nimmt dann langsam ab. Das Erreichen des Spitzenwerts verzögert sich, wenn sich die CO_2 -Produktion über einen längeren Zeitraum erstreckt. Der Spitzenwert ist bei langsamer Produktion nur wenig niedriger. Für die extremen Einsatzkurven ändert sich die maximale Produktionsrate um 327 %, die resultierende maximale CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre aber um lediglich 15 % (Bacastow und Keeling, 1979). In beiden Fällen entspricht der CO_2 -Einsatz einem schnellen Impuls im Vergleich zu der langen Dauer des CO_2 -Übergangs in das Oberflächenwasser der Meere. Die langsame Abnahme des CO_2 in der Atmosphäre ist ebenfalls eine Folge des langsamen Übergangs in das Meer.

In einer zweiten Reihe von Simulationen mit Hilfe des 6-Speicher-Modells wurde der Einfluß der bezüglich der Pflanzenwelt des Festlands gemachten Annahmen untersucht. Die Ergebnisse gehen aus Abb. 7 hervor. Bei der Simulation, welche die unterste Kurve ergab, ließ man die Biomasse durch CO_2 -Düngung ohne Einschränkung wachsen. Der Kohlenstoff der Biomasse verdreifachte sich nahezu, und das CO_2 in der Atmosphäre ging innerhalb von 300 Jahren etwa auf den vorindustriellen Wert zurück. In anderen Simulationen wurde eine willkürliche Abnahme des Wachstums der Biomasse angenommen. Die obere Kurve ergibt sich aus einer linearen Abnahme des Wachstums der Biomasse im Zeitraum von 2000 bis 2025. Das durch die Biomasse gebildete Kohlenstoffreservoir erhöht sich in diesem Beispiel im Vergleich zu dem angenommenen vorindustriellen Wert um 6 %. Bacastow und Keeling (1979) folgerten daraus, daß - abgesehen von der Verringerung um die von der Biomasse aufgenommene Menge - die CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre den mit dem oben diskutierten Grundmodell erzielten Ergebnissen entsprechen, solange sich die Größe der Biomasse nicht mehr als verdoppelt. Größere Zunahmen der Biomasse führen zu einer raschen Beseitigung des

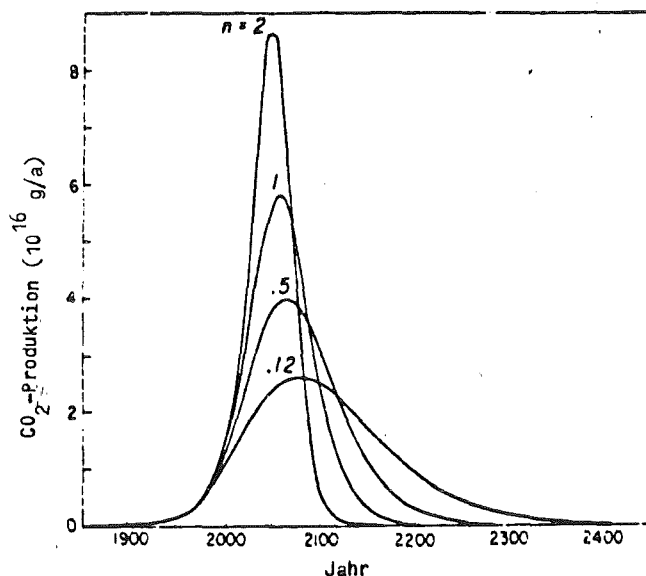


Abb. 5: CO₂-Produktion für verschiedene, hypothetische Verläufe des fossilen Brennstoffverbrauchs. Der 8,2fache Wert der CO₂-Menge der Atmosphäre im vorindustriellen Zeitalter wird als Höchstwert für die CO₂-Produktion festgesetzt.

Quelle: Bacastow und Keeling (1979)⁺)

⁺) Bacastow und Keeling (1979) verwendeten zur Simulation der künftigen CO₂-Produktion bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe eine modifizierte logistische Funktion. Diese Funktion beschreibt den Effekt, daß vor Erschöpfung der fossilen Brennstoffvorräte die Brennstoffproduktion ein Maximum erreichen wird, dem wegen zunehmender Schwierigkeiten verschiedener Art eine Abnahme folgt. Die logistische Funktion hat die Form

$$\frac{dN}{dt} = r N \left(1 - \frac{N}{N_{\infty}} \right)^n$$

Dabei sind N die gesamte CO₂-Produktion bis zum Jahr t, N_∞ der langfristig erreichte Endwert, r ein konstanter Wachstumsfaktor und n ein zu wählender Parameter, der die Beschreibung verschiedener Formen der Verbrennung erlaubt. Die Auswirkung verschiedener Annahmen für n ist in Abb. 5 dargestellt.

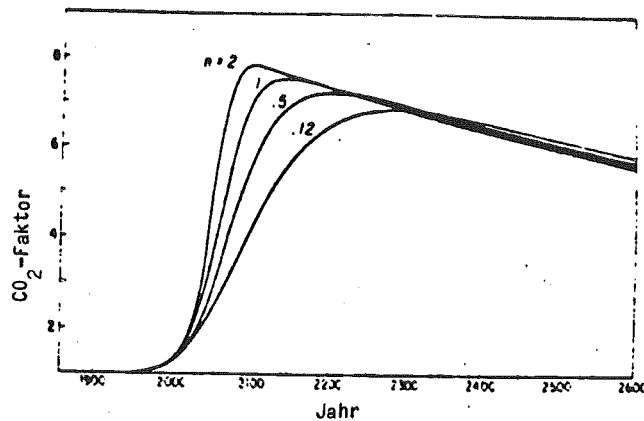


Abb. 6: Vorausgesagte Zunahme des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre unter Zu-
grundelegung der CO₂-Produktionsverläufe in Abb. 5. Der CO₂-Fak-
tor ist das Verhältnis der CO₂-Menge in der Atmosphäre zur Menge,
die sich in der vorindustriellen Zeit in der Atmosphäre befand.

Quelle: Bacastow und Keeling (1979)

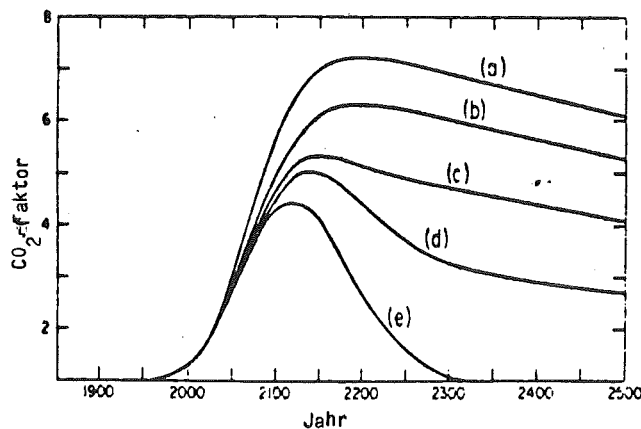


Abb. 7: Auswirkung des Pflanzenwachstums auf die vorausgesagte Zunahme
des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre: (a) Standardbeispiel, ent-
spricht der Kurve $n = 0,5$ in Abb. 6. Der Wachstumsfaktor für die
Pflanzen wurde zwischen 2000 und 2025 linear gegen Null abnehmend
gesetzt. Die größte Zunahme der Pflanzenwelt beträgt 6 % gegen-
über dem für die vorindustrielle Zeit geltenden Wert. (b) Der
Wachstumsfaktor für die Pflanzenwelt wird zwischen 2000 und 2150
linear gegen Null abnehmend gesetzt. Die größte Zunahme der Pflan-
zenwelt beträgt 42 %. (c) Der Wachstumsfaktor für die Pflanzen-
welt wird zwischen 2000 und 2250 linear gegen Null abnehmend ge-
setzt. Die größte Zunahme der Pflanzenwelt beträgt 98 %. (d) Der
Wachstumsfaktor für die Pflanzenwelt wird zwischen 2000 und 2350
linear gegen Null abnehmend gesetzt. Die größte Zunahme der Pflan-
zenwelt beträgt 165 %. (e) Die Pflanzenwelt wächst ohne Unterbre-
chung. Der Kohlenstoffspeicher der Pflanzenwelt vergrößert sich
weiter, bis sich der gesamte Einsatz aus fossilem Brennstoff in
der Pflanzenwelt befindet. Die größte Zunahme der Pflanzenwelt be-
trägt 308 %.

Quelle: Bacastow und Keeling (1979)

durch fossile Brennstoffe gebildeten CO_2 aus der Atmosphäre, jedoch sind derart große Zunahmen in Wirklichkeit unrealistisch, insbesondere im Hinblick auf den erhöhten Bedarf des Menschen an Nahrungsmitteln und Land.

Ein zweiter Modelltyp wurde von Oeschger et al. (1975) entwickelt, in dem das Meer durch eine 75 m tiefe, vom Wind durchmischte und mit der Tiefsee gekoppelte Schicht dargestellt wird, in welcher der Transport durch vertikale turbulente Diffusion stattfindet. Die vertikale Diffusion wird so simuliert, daß die bekannte Verteilung des Radio-Kohlenstoffs vom Modell exakt nachgebildet wird. Dieses "Box-Diffusionsmodell" ist daher physikalisch etwas plausibler als ein Box-Modell, in dem es keinen stetigen Gradienten für CO_2 oder Radio-Kohlenstoff gibt. Das Box-Diffusionsmodell ist jedoch immer noch unrealistisch, da horizontale und vertikale Massenbewegungen für den CO_2 -Transport wahrscheinlich genauso wichtig sind wie die vertikale Diffusion, diese Bewegungen jedoch nicht in diesem Modell berücksichtigt werden (Bacastow und Keeling, 1979).

Bacastow und Keeling (1979) haben die Ergebnisse des Box-Diffusionsmodells und des Box-Modells verglichen, beide an die Gleichgewichtswerte für Radio-Kohlenstoff und an die CO_2 -Zunahme in der Atmosphäre von 1959 bis 1974 angepaßt und finden, daß beide Modelle für die nächsten 1500 Jahre die gleichen Voraussagen liefern.

Die meisten Modelle des Kohlenstoffkreislaufs, die für die Voraussage künftiger CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre benutzt werden, sind eindimensional. Machta und Elliot (1980) haben darauf hingewiesen, daß realistischere Modelle die Meere und die Biosphäre ausführlicher untersuchen sollten. Dieselben Verfasser bemerken außerdem, daß "die Grenzen für die Aufstellung von Modellen heute nicht bei der Rechner-Hardware liegen, sondern beim Begreifen des Systems und in der Unzulänglichkeit der Daten".

Die meisten Modelle berücksichtigen den Unterschied zwischen warmen und kalten Meereszonen bisher nicht. Broecker et al. (1980) haben jedoch ein Modell entwickelt, in dem der Ozean in drei Kategorien eingeteilt ist: äquatorial ($< 15^\circ$ Breite), gemäßigt (15° bis 45° Breite) und polar ($> 45^\circ$ Breite). Die äquatorialen und gemäßigten Zonen bedecken zusammen 73 % der Ozean-

fläche. Das Modell berücksichtigt in der äquatorialen Zone aufsteigende und in der benachbarten gemäßigten Zone absinkende Wassermassen. Vertikale turbulente Durchmischung wird in beiden Zonen angenommen. In den polaren Ozeanen werden drei Prozesse betrachtet: (1) das Eindringen von CO_2 aus fossilen Brennstoffen in die stark geschichtete Wassermasse, (2) der Transport in mittlere Tiefen und (3) die Tiefenwasserbildung in der Tiefsee. Broecker et al. (1980) stellen fest, daß wahrscheinlich alle drei Prozesse von Bedeutung für die gegenwärtige Aufnahme von CO_2 durch den Ozean sind. Die Autoren untersuchten, ob die Verwendung eines regionalen Ozeanmodelles anstelle eines Box-Diffusions-Modelles die Größe der CO_2 -Aufnahme durch den Ozean wesentlich verändert. Sie folgerten, daß für Zeiträume bis zu mehreren Jahrzehnten das Box-Diffusions-Modell die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean ausgezeichnet beschreibt.

Der Kohlenstoffkreislauf der Erde ist sehr kompliziert. Es gibt eine Reihe von Kohlenstoffspeichern und von chemischen, physikalischen sowie biologischen Prozessen, die diese Speicher miteinander verbinden. Man braucht Rechenmodelle für den Kohlenstoffkreislauf, um die künftigen CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre voraussagen zu können. Der bei der Erstellung von Modellen für den Kohlenstoffkreislauf erreichte Entwicklungsstand wurde von einer Arbeitsgruppe beim IIASA Workshop on Carbon Dioxide, Climate and Society diskutiert (Williams, 1978). Diese Gruppe weist darauf hin, daß die Modelle für den Kohlenstoffkreislauf zwar mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet sind (mehr Unsicherheiten als vor 10 Jahren), daß es aber dennoch Möglichkeiten für eine Vorhersage künftiger CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre gibt. Die Höhe der CO_2 -Produktion durch fossile Brennstoffe ist für die Vergangenheit recht gut bekannt, und die Beobachtungen der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre während der vergangenen 20 Jahre zeigen, daß ca. 50 % des CO_2 aus fossilen Brennstoffen in der Atmosphäre geblieben sind. Da es unwahrscheinlich ist, daß sich die biogeochemischen Bedingungen innerhalb der nächsten 20 bis 30 Jahre wesentlich verändern, dürften Vorhersagen für diesen Zeitraum anhand von Extrapolationen möglich sein. Dies ist möglich, wenn eine exponentielle Wachstumsrate beim Einsatz fossiler Brennstoffe angenommen werden kann. Die bestehenden Modelle stimmen für diesen Zeitraum in ihren Aussagen überein. Für den Zeitraum nach den nächsten 30 Jahren nehmen jedoch die Unsicherheiten bei den Vorhersagen rasch zu.

Wie bereits gesagt, ist die Rolle der Biosphäre der unsicherste Faktor. Die Arbeitsgruppe war der Ansicht, daß bezüglich der Rolle der Meere recht gute Übereinstimmung besteht, d.h. darüber, wieviel CO₂ die Meere der Atmosphäre entnehmen oder nicht entnehmen können. Man kam zu dem Schluß, daß Waldbrände sowie eine Reihe von Veränderungen der Landnutzung keine signifikanten CO₂-Quellen darstellen, daß jedoch das Abholzen tropischer Wälder eine signifikante Quelle sein könnte. Es wurde betont, daß die vorhandenen Angaben über das beobachtete Abholzen tropischer Wälder für die Abschätzung der globalen CO₂-Produktion äußerst schwierig zu verwerten sind. Das zeigt sich in der unterschiedlichen Größenordnung der Schätzungen, wie sie in den jüngsten Veröffentlichungen zum Ausdruck kommen. Da immer mehr Übereinstimmung darüber besteht, daß weltweit wohl mehr Wälder abgeholzt als aufgeforstet werden, wurde geschlossen, daß das Freisetzen von CO₂ beim Abholzen möglicherweise durch Wiederaufforstungsprogramme in den Bereichen teilweise kompensiert worden ist, in denen während der vergangenen Jahrzehnte abgeholzt wurde. Das wurde in späteren Studien bestätigt, von denen in Abschnitt 5 berichtet wird.

4. CO₂-Emission aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre

Die Jahreswerte für die weltweite Emission von CO₂ aus dem Verbrennen fossiler Brennstoffe und in viel geringerem Ausmaß aus der Zementproduktion und dem Abfackeln von Erdgas gehen aus Abb. 2 hervor. Eine Wachstumsrate der Kohlenstoffproduktion von 4,3 % pro Jahr ergibt eine ausgezeichnete Anpassung an diese Werte. Hinsichtlich der Voraussagen künftiger Raten für den Einsatz fossiler Brennstoffe tauchen zwei Fragen auf: Wird der Einsatz fossiler Brennstoffe weiterhin exponentiell wachsen? Wie lange werden die fossilen Brennstoffe ausreichen?

In zahlreichen Untersuchungen, von denen auf einige in Abschnitt 6 Bezug genommen wird, werden Voraussagen über den künftigen Einsatz fossiler Brennstoffe und die daraus sich ergebende Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre gemacht. Diese Untersuchungen machen im allgemeinen Voraussagen über den künftigen Energiebedarf sowie Annahmen darüber, wieviel dieses Bedarfs mit Hilfe fossiler Brennstoffe gedeckt wird. Ausubel (1980) ist dieses Problem anders angegangen und hat untersucht, wieviel fossiler Brennstoff verbrannt werden müßte, um zu einem bestimmten Zeitpunkt eine bestimmte CO₂-Konzentration zu liefern.

Als Beispiel für die erste Art des Vorgehens führt Ausubel die Untersuchung von Rotty (1978) an, der Voraussagen über die CO₂-Produktion im Jahre 2025 aufgrund der voraussichtlichen Bevölkerungswachstumsraten und einer Verbesserung des Lebensstandards in den Entwicklungsländern machte. Die CO₂-Produktion wurde für 2025 auf insgesamt das 4,5 fache des Wertes von 1974 geschätzt, und es wurde angegeben, daß im Jahre 2025 die CO₂-Produktion der Entwicklungsländer 40 % des Gesamtwertes der CO₂-Produktion erreicht, im Vergleich zu 13 % im Jahre 1974. Damit wird in der Untersuchung von Rotty den Entwicklungsländern eine beträchtliche Verantwortung für die CO₂-Zunahme aufgebürdet. Demgegenüber findet Ausubel (1980), daß der Kohlenstoff, der innerhalb der nächsten 50 - 100 Jahre größere Auswirkungen haben könnte, von wenigen Ländern gewonnen würde. Mit Ausnahme eines Landes wären dies nur Länder mit hochentwickelter Industrie. Das führt zu dem Schluß, daß CO₂ nur dann ein weltweites Problem wird, wenn ein weltweiter Handel mit fossilen Brennstoffen stattfinden würde.

Ausubel nimmt als Arbeitshypothese an, daß eine kumulative Produktion von 1500 Gigatonnen Kohlenstoff bis zum Jahre 2050 erforderlich wäre, damit CO_2 zu einem ernstem Problem würde. Ausubel analysiert dann den Beitrag des Kohlenstoffs aufgrund der Zerstörung der Pflanzenwelt durch den Menschen. Nach groben Schätzungen wurden zwischen 1860 und 1970 durch Abholzen von Wäldern 75 Gigatonnen Kohlenstoff in die Atmosphäre abgegeben. Der Anteil der Industrieländer und der Entwicklungsländer an dieser Abgabe war dabei fast gleich groß. Der Beitrag der Pflanzenwelt ist somit gering im Vergleich zu der angenommenen hypothetischen kumulativen Produktion von 1500 Gt bis zum Jahre 2050. Ausubel findet darüber hinaus, daß die maximal überhaupt mögliche Ausbeutung nur 10 bis 20 % der aus 1500 Gigatonnen Kohlenstoff resultierenden CO_2 -Menge liefern würde, falls ein umfassendes Verbrennen von Wäldern und Torf zugelassen werden würde.

Soll also der in der Arbeitshypothese zugrundegelegte Grenzwert von 1500 Gt Kohlenstoff im Jahre 2050 erreicht werden, dann müßte diese Menge in erster Linie von fossilen Brennstoffen kommen. Bolin (1979) schätzte, daß eine kumulative Gesamtmenge von ca. 140 Gt Kohlenstoff durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre bisher abgegeben wurde. Für 80 % dieser Menge werden die industrialisierten Länder verantwortlich gemacht. Ausubel (1980) stellte fest, daß die früheren Beiträge durch Verbrennen fossiler Brennstoffe (ca. 140 Gt) zusammen mit dem Abbau aller Reserven an fossilen Brennstoffen (ca. 540 Gt; dabei gelten als Reserven die bekannten Brennstofflagerstätten, die heute wirtschaftlich abbaubar wären) und der biotische Beitrag (ca. 240 Gt) lediglich etwa 2/3 des Wertes von 1500 Gt C ergeben würden, der als Arbeitshypothese angenommen wurde. Zweitens stellte Ausubel (1980) fest, daß die Summe aller Öl- und Erdgasreserven und Ressourcen weniger als 450 Gt ausmacht, und das läßt darauf schließen, daß Öl und Erdgas das CO_2 -Problem wahrscheinlich nicht wesentlich vergrößern. Es wird gezeigt, daß CO_2 hauptsächlich durch eine langfristige und umfassende Nutzbarmachung der Kohlevorkommen durch wenige Länder zum Problem werden könnte. Ausubel nennt zwei Gründe für die Vermutung, daß eine so umfassende Nutzbarmachung von Kohle sehr schwierig wäre. Erstens wäre der Abbau der Kohle nicht leicht. Die zweite Schwierigkeit liegt in der Notwendigkeit, Kohle weltweit zu handeln, da die Kohlevorkommen und -ressourcen auf der Welt sehr ungleich verteilt sind. Die USA, die UDSSR und China besitzen schätzungsweise ca. 87 % der Gesamtvorkommen.

Deshalb meint Ausubel (1980) im Gegensatz zu der beispielsweise von Rotty (1978) vertretenen Ansicht, daß die Entwicklungsländer wohl nicht wesentlich zum CO_2 -Problem beitragen, sofern kein enormer Handel mit Kohle aus den USA, der UDSSR und China in Gang gesetzt wird. Beschränkungen des internationalen Handels mit Kohle und der technischen Durchführbarkeit eines umfassenden Abbaus von Kohle könnten nach Ausubel verhindern, daß das CO_2 im nächsten Jahrhundert bedrohliche Werte erreicht.

Von Rotty und Marland (1980) wurden vor kurzem die Restriktionen für die Verwendung von fossilen Brennstoffen diskutiert. Dabei wurden drei Typen möglicher Restriktionen in Betracht gezogen: Ressourcen-Restriktionen, Brennstoffbedarfsrestriktionen und Umwelt-Restriktionen. Eine Analyse der Situation während der nächsten fünfzig Jahre zeigt, daß die Beschränktheit der Ressourcen fossiler Brennstoffe den Verbrauch solcher Brennstoffe nicht ernstlich einschränken wird. Rotty und Marland finden auch, daß zumindest im ersten Teil der 50-Jahr-Periode das CO_2 -Problem keine wirkliche Restriktion darstellen wird. Einschränkungen des Brennstoffbedarfs scheinen jedoch von Bedeutung zu sein. Die Autoren unterstreichen, daß jetzt allgemein angenommen wird, daß der globale Energiebedarf nicht weiterhin mit der in der Vergangenheit beobachteten Wachstumsrate von 5,3 % jährlich zunehmen wird. Ebenso ist anzunehmen, daß die CO_2 -Produktion aus fossilen Brennstoffen nicht mehr mit 4,3 % pro Jahr, wie in der Vergangenheit, steigt. Würde diese Produktionsrate auch künftig gelten, dann wird geschätzt, daß die atmosphärische CO_2 -Konzentration bis zum Jahre 2030 den Wert von 600 ppm erreicht. Rotty und Marland weisen auf die Möglichkeit hin, daß aufgrund sozialer und ökonomischer Faktoren der Brennstoffbedarf langsamer zunehmen könnte. Sie folgern, daß Restriktionen für den Brennstoffbedarf den Verbrauch fossiler Brennstoffe auf einem Niveau halten, welches in den nächsten 50 Jahren eine atmosphärische CO_2 -Konzentration von unter 450 ppm ergibt.

5. CO₂-Emission aus biotischen Quellen in die Atmosphäre

In Abschnitt 2 wurde gezeigt, daß die jährlich beobachtete Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre 48 bis 56 % der CO₂-Jahresproduktion aus fossilen Brennstoffen beträgt. Ozeanographische Studien ergaben, daß das Meer 35 bis 40 % des CO₂ aus fossilen Brennstoffen aufnehmen kann (z.B. Oeschger et al., 1975) und es schien so, als sei der CO₂-Haushalt bis auf wenige Prozent ausgeglichen. Dabei wurde angenommen, daß die Pflanzen- und Tierwelt auf dem Festland das restliche CO₂ aus fossilen Brennstoffen aufnimmt. Die Ökologen stellen jedoch seit einiger Zeit diese Ansicht in Frage und behaupten, daß CO₂ durch Abholzen von Wäldern, Neugewinnung von Anbauflächen und Intensivierung der Landwirtschaft in großen zusätzlichen Mengen an die Atmosphäre abgegeben wird (z.B. Woodwell, 1978). Wenn die CO₂-Abgabe durch Abholzen von Wäldern usw. dieselbe Größenordnung erreicht wie die CO₂-Abgabe bei der Verbrennung fossiler Stoffe, dann müssen die Mechanismen entsprechend wirksamer sein, die eine Beseitigung des CO₂ aus der Atmosphäre bewirken. Ozeanographische Studien zeigen jedoch, daß eine wesentlich höhere CO₂-Aufnahme durch das Meer nicht vereinbar ist mit den wohlbekanntesten Erkenntnissen der Kohlenstoffchemie und mit den vertikalen Vermischungsvorgängen in den Meeren (z.B. Siegenthaler und Oeschger, 1978; Broecker et al., 1979).

Das Abholzen von Wäldern in den Tropen, die Neugewinnung von Anbauflächen und die Intensivierung der Landwirtschaft sind eine Folge demographischer, politischer und wirtschaftlicher Zwänge. Schätzungen über die Geschwindigkeit, mit der geschlossene Waldgebiete verlorengehen, reichen von 10 bis 20 Mio. Hektar pro Jahr. Fast alle diese Gebiete liegen in den feuchten tropischen Klimazonen. Die Kenntnisse über die Größe dieser Wälder oder die Geschwindigkeit, mit der sie abgeholzt werden, sind unvollständig, da nur etwa die Hälfte der Waldgebiete der Welt ausführlich registriert und davon wiederum nur ein Teil mehr als einmal erfaßt wurde.

Hampicke (1979) berechnet, daß die Nettoabgabe von Kohlenstoff durch Abholzen von Wäldern in den Tropen und durch die Bodenzerstörung im Jahre 1977 den Wert von $1,7 - 3,9 \cdot 10^{15}$ g C erreichte. Bolin (1979) berechnet, daß die jährliche Abgabe, hauptsächlich durch das Abholzen von tropischen Wäldern, $1 - 5 \cdot 10^{15}$ g C beträgt. Woodwell et al., (1978) trug mehrere Schät-

zungen über die jährliche globale Abgabe von Kohlenstoff aus der Pflanzen- und Tierwelt zusammen. Diese Schätzungen variieren stark zwischen $1 \cdot 10^{15}$ g C und $18 \cdot 10^{15}$ g C; der Bereich $4 - 8 \cdot 10^{15}$ g C hat die größte Wahrscheinlichkeit. Baumgartner (1979) meint, daß sich der Nettoeffekt der Veränderungen der Bedeckung der Erde mit Wald in einer Abgabe von $3,3 \cdot 10^{15}$ g C pro Jahr äußert. Es scheint Übereinstimmung darüber zu bestehen, daß die Pflanzen- und Tierwelt heute eine Quelle für CO_2 in der Atmosphäre darstellt. In vielen Fällen wird die Abgabe aus dieser Quelle auf dieselbe Größenordnung geschätzt wie die CO_2 -Abgabe an die Atmosphäre aus fossilen Brennstoffen.

Da ozeanographische Studien auch weiterhin vermuten lassen, daß die Meere nicht große Mengen biotischen CO_2 und CO_2 aus fossilen Brennstoffen aufnehmen können, müssen mögliche andere CO_2 -Senken in Betracht gezogen werden. Hampicke (1979) hat mögliche Senken für CO_2 in der Biosphäre des Festlands untersucht und schätzt, daß der jährliche Entzug durch natürliche Anreicherung im Boden, Ableitung durch Flüsse, Zunahme der Biomasse beim Wiederaufforsten von Wäldern in den gemäßigten Zonen und Düngung etwa $0,5 - 2,8 \cdot 10^{15}$ g C beträgt. Hampicke findet deshalb, daß es unter ökologischen Gesichtspunkten schwierig ist, den Austausch von Kohlenstoff zwischen den Ökosystemen des Festlands und der Atmosphäre als ausgeglichen zu betrachten und es scheint wahrscheinlich, daß die Abgabe von CO_2 an die Atmosphäre durch das Eingreifen des Menschen größer ist als die Menge des aus der Atmosphäre abgezogenen CO_2 .

Die meisten Übersichten über die Rolle des Abholzens von Wäldern im Kohlenstoffhaushalt konzentrieren sich wegen ihrer großen Biomasse auf tropische Wälder (53 % der gesamten Biomasse in Form von Wäldern) und der fortschreitenden Verringerung von Fläche und Volumen tropischer Wälder. Das zweitgrößte biotische Kohlenstoffreservoir sind die Wälder in der gemäßigten Zone. Die meisten Wälder liegen zwischen 30° n. Br. und 60° n. Br.. Dort fand in der Vergangenheit die größte Zerstörung statt - vor 50 bis 200 Jahren in Nordamerika und vor 2000 bis 5000 Jahren im Fernen Osten (Armentano und Hett, 1980). Ein vor kurzem abgehaltener Workshop kam zu dem Ergebnis, daß der Waldbestand der meisten nutzholzliefernden Gebiete der gemäßigten nördlichen Zone erkennen läßt, daß diese Wälder in den vergangenen Jahrzehnten jährlich als Senke für ca. 10^9 t Kohlenstoff gedient haben (Armentano und

Hett, 1980). Ein anderer Workshop untersuchte die Rolle der organischen Böden im Kohlenstoffkreislauf und kam zu dem Schluß, daß organische Böden, die entwässert werden, geringe Mengen Kohlenstoff abgeben, während eine kleinere Menge in nichtentwässerten Böden gespeichert wird. Es wird auch behauptet (siehe Machta und Elliot, 1980), daß Süßwasserseen sowie Flüsse möglicherweise eine zusätzliche Menge Kohlenstoff von etwa 5 % der Abgabe aus fossilem Brennstoff speichern.

Einige neuere Studien deuten darauf hin, daß tropische Wälder eine Senke für atmosphärisches CO₂ darstellen können. Detwiler und Hall (1980) untersuchten die tropische Landwirtschaft dort näher, wo Anbaufläche durch Abholzen und Verbrennen von Wald gewonnen wird. Sie zeigen, daß dabei ein Teil des Kohlenstoffes gespeichert bleibt 1. in den nach der Rodung zurückbleibenden Baumstümpfen, 2. in der bei der Verbrennung zurückbleibenden Holzkohle und 3. in der bei der Verbrennung produzierten und anderswo niederfallenden Flugasche. Seiler und Crutzen (1980) vermuten, daß bei dieser Rodungsart nur 15 - 30 % des tatsächlich vorhandenen Kohlenstoffes verbrennen.

Es gibt demnach in letzter Zeit Hinweise dafür, daß die tropischen Wälder und die Wälder der gemäßigten Zone möglicherweise Kohlenstoff speichern, zumindest während der vergangenen Jahrzehnte gespeichert haben. Vor einiger Zeit durchgeführte Analysen der Schwankungen der auf dem Mauna Loa aufgezeichneten CO₂-Werte weisen darauf hin, daß sich in den Laubwäldern der Kohlenstoffgehalt möglicherweise erhöht (Machta und Elliot, 1980). Offensichtlich ist die Ungewißheit bezüglich der biotischen Kohlenstoffquellen und -senken groß. Theoretische Untersuchungen sowie Beobachtungen der Meere und der Pflanzen- und Tierwelt sprechen jedoch dafür, daß die Pflanzen- und Tierwelt derzeit keine so große Netto-Quelle für CO₂ darstellt wie die durch Verbrennung fossiler Brennstoffe existierende.

6. Prognosen zur zukünftigen CO₂-Konzentration in der Atmosphäre

Es bestehen recht große Unsicherheiten bezüglich der Rolle der Pflanzen- und Tierwelt des Festlands im Kohlenstoffkreislauf und bezüglich der künftigen Zuwachsraten des anthropogenen CO₂. Trotzdem gibt es deutliche Anzeichen dafür, daß sich die Höhe des fossilen Brennstoffverbrauchs und die Zerstörung der terrestrischen Pflanzen- und Tierwelt nicht sehr schnell ändern. Sie werden jedoch mit wachsender Weltbevölkerung weiterhin zunehmen. Da Einzelheiten über den Kohlenstoffkreislauf nicht bekannt sind, könnte man annehmen, daß sich zumindest innerhalb der nächsten 20 bis 30 Jahre die relativen Beiträge dieser Prozesse zur Erhöhung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre gegenüber den vergangenen Jahrzehnten im wesentlichen wohl nicht ändern werden. Bolin (1979) glaubt, daß bis etwa zum Ende dieses Jahrhunderts die Zunahme des CO₂ in der Atmosphäre nahezu 50 % der freigesetzten Menge CO₂ aus fossilem Brennstoff betragen wird. Deshalb würde eine weitere jährliche Steigerung bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe um 4 % zu einer Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf 380 Volumen-ppm am Ende dieses Jahrhunderts führen, während eine Steigerung des Einsatzes fossiler Brennstoffe um 2 % eine Konzentration von ca. 365 Volumen-ppm ergeben würde.

Zimen (1979) meint, daß Voraussagen für einen Zeitraum von 30 bis 50 Jahren gemacht werden können, wenn die derzeitigen Modelle für den Kohlenstoffkreislauf in etwa stimmen. Unter der Annahme, daß die Pflanzen- und Tierwelt auf die CO₂-Zunahme in der Atmosphäre durch stärkere Kohlenstoff-Absorption reagiert, daß aber auch das Abholzen von Wäldern weiterhin proportional dem künftigen Gesamtenergieverbrauch ist, berechnet Zimen, daß wir auch künftig fossile Brennstoffe verbrennen können, solange der Vorrat reicht, ohne daß sich der für das vorindustrielle Zeitalter geltende Wert der CO₂-Konzentration verdoppelt, falls der Einsatz fossiler Brennstoffe um weniger als 1 % pro Jahr zunimmt. Bei einer jährlichen Zunahme von 3 % berechnet Zimen, daß in ca. 40 Jahren 150 % des Werts des vorindustriellen Zeitalters erreicht sind und bis zum Jahre 2040 eine Verdoppelung eintritt.

Unter der Annahme, daß die Biomasse in ihrem Kohlenstoffgehalt um maximal 10 % mehr als ihr ursprünglicher Kohlenstoffanteil zunimmt, haben Niehaus und Williams (1979) mit einem Kohlenstoffmodell die Auswirkungen verschiedener hypothetischer Energiestrategien berechnet. Sie finden, daß unter der Annahme, daß der weltweite kommerzielle Energieeinsatz im nächsten Jahrhundert ein Maximum von 30 TW erreichen wird (gegenüber 8 TW heute) und daß nach dem Jahre 2000 nicht-fossile Energieträger bei der Versorgung überwiegen, die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre aufgrund der Simulation im Jahre 2050 den Wert 400 Volumen-ppm erreicht. Zu diesem Zeitpunkt sind die CO_2 -Emissionen aus fossilem Brennstoff sehr gering. Wenn dagegen der Energieeinsatz des Höchstwert von 50 TW erreichen soll und nur fossile Brennstoffe benutzt werden, erreicht die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre im Modell bis zum Jahre 2050 ca. 800 Volumen-ppm, und zu diesem Zeitpunkt sind dann die jährlichen Emissionen aus fossilem Brennstoff etwa siebenmal höher als heute.

Da aus mehreren neueren Prognosen des künftigen Energiebedarfs deutlich wurde, daß synthetische Brennstoffe bei der künftigen Energieversorgung eine wesentliche Rolle spielen könnten, wurde die Sorge darüber geäußert, daß eine starke Abhängigkeit von synthetischen Brennstoffen auf der Basis von fossilem Kohlenstoff das CO_2 -Problem noch verschlimmern könnte. Diese Sorge wurde insbesondere deshalb laut, weil die CO_2 -Abgabe aus synthetischen Brennstoffen pro Energieeinheit größer ist als die Abgabe aus konventionellen, fossilen Brennstoffen. Die synthetischen Öle setzen pro Energieeinheit etwa die doppelte CO_2 -Menge frei im Vergleich zum konventionellen Öl (Rotty, 1979). Von Rotty (1979) durchgeführte Berechnungen zeigen jedoch, daß es nicht so wichtig ist, welcher fossile Brennstoff (konventionell oder nichtkonventionell) zur Energieversorgung eingesetzt wird, weil die relativen Beiträge der einzelnen Brennstoffe sich nicht so schnell verändern können, daß sich ein wesentlicher Unterschied in der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre ergibt. Die atmosphärische CO_2 -Konzentration wird jedoch stark von der Entscheidung über eine umfassende Nutzbarmachung fossiler Brennstoffe (konventionell und nicht-konventionell) oder nichtfossiler Energielieferanten (Sonne und Kernenergie) beeinflusst.

Aufgrund von Unklarheiten bezüglich des Kohlenstoffkreislaufs und der Rolle der Eingriffe durch den Menschen, insbesondere in die Pflanzen- und Tierwelt des Festlands, ist es nicht möglich, verlässliche Voraussagen über die künftige CO_2 -Konzentration der Atmosphäre entsprechend unterschiedlichen Szenarien der Energieversorgung zu machen. Mit Hilfe von auf Beobachtungen beruhenden Annahmen bezüglich des Kohlenstoffkreislaufs ist es aber dennoch möglich, stichhaltige Vergleiche zwischen unterschiedlichen Energieversorgungsstrategien hinsichtlich der Größenordnung ihrer Auswirkung auf die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre anzustellen. In diesem Abschnitt wurden einige der vielen Voraussagen über künftige CO_2 -Werte in der Atmosphäre beschrieben, die auf einfachen Untersuchungen oder Modellen des Kohlenstoffkreislaufs beruhen. Weitere Voraussagen werden beispielsweise von Baes et al. (1976), NAS (1977), Williams (1978), Elliot und Machta (1979) und Bach et al. (1979) beschrieben. Die meisten Voraussagen beruhen auf einer stetigen Zunahme der CO_2 -Menge in der Atmosphäre durch Verbrennen fossiler Brennstoffe und Abholzen von Wäldern. Viele Voraussagen prognostizieren eine Verdoppelung der vorindustriellen CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre innerhalb der nächsten 100 Jahre.

Neuere Untersuchungen deuten jedoch an, daß eine Verdoppelung der CO_2 -Konzentration nicht so schnell eintreten könnte. Rotty und Marland (1980) führen an, daß Einschränkungen des Verbrauchs fossiler Brennstoffe die atmosphärische CO_2 -Konzentration in den folgenden 50 Jahren unter 450 ppm halten werden. Auf der Basis der zwei von IIASA (1981) entwickelten Energie-Szenarien würde sich bis zum Jahre 2030 eine CO_2 -Konzentration von 430 ppm bzw. 550 ppm ergeben.

7. Die Auswirkungen einer höheren CO₂-Konzentration auf das Klima

7.1 Verfügbare Modelle zur Untersuchung des Einflusses einer erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentration auf das Klima

Zur Abschätzung der Auswirkung einer erhöhten CO₂-Konzentration auf das Klima wurden bisher mehrere Modelle eingesetzt. Einige Modelle sind sehr vereinfachte Darstellungen des Klimasystems, in denen nur global gemittelte Werte betrachtet werden. Andere Modelle simulieren die dreidimensionale atmosphärische Zirkulation. Jedes der verfügbaren Modelle hat jedoch Nachteile. Mit den einfachen Modellen kann schnell und mit geringen Kosten eine große Zahl von Sensitivitätsexperimenten durchgeführt werden. Die einfachen Modelle erfassen aber nur wenige Rückkopplungen im Klimasystem. Komplexe Modelle erfassen die Rückkopplungen genauer. Diese Modelle sind jedoch in der Anwendung teurer, so daß eine große Zahl von Simulationen der langfristigen Klimaentwicklung nicht möglich ist.

7.1.1 Strahlungsmodelle

Die einfachsten Klimamodelle, die zur Untersuchung des Einflusses eines erhöhten atmosphärischen CO₂-Gehaltes herangezogen werden, sind eindimensionale Strahlungsbilanzmodelle (z.B. Manabe und Möller, 1961). In diesen Modellen wird nur die vertikale Dimension betrachtet. Die Berechnung basiert auf der Annahme, daß in einer Atmosphärensäule ein Strahlungsgleichgewicht zwischen der pro Jahr absorbierten solaren Strahlung und der abgestrahlten langwelligen Strahlung herrscht. Ein Modell dieses Types wurde von Ramanathan et al. (1979) verwendet, um zu zeigen, daß eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration zu einer global gemittelten jährlichen Zunahme des erdwärts gerichteten Nettostrahlungsflusses an der Tropopause von 4 Wm^{-2} führt. Die daraus folgende Zunahme der Oberflächentemperatur wird durch Faktoren beeinflusst, die gewöhnlich in einem solchen Klimamodell nicht berücksichtigt werden. Bei der Verwendung von Strahlungsmodellen zur Berechnung der Vertikalstruktur der Atmosphäre ergeben sich im allgemeinen Temperaturen, die zu niedrig sind, weil der vertikale Wärmefluß durch atmosphärische Bewegungen in den Modellen vernachlässigt wird. Der im folgenden beschriebene Modelltyp befaßt sich speziell mit dieser Problematik.

7.1.2 Strahlungs-Konvektions-Modelle

Gegenüber den einfachen Strahlungsmodellen schließen die Strahlungs-Konvektions-Modelle Effekte des konvektiven Wärmetransportes ein. Die Größe des konvektiven Wärmetransports wird bestimmt durch das Verhältnis des vorliegenden Temperaturgradienten zu dem adiabatischen (etwa 6,5 K/km). Viele Variationen derartiger eindimensionaler Strahlungs-Konvektions-Modelle wurden entwickelt und zur Abschätzung der Auswirkungen einer CO₂-Zunahme angewendet. Die erste und bekannteste Anwendung dieses Modelltypes auf das CO₂-Problem wurde von Manabe und Wetherald (1967) durchgeführt. In diesem Modell wurde eine durchschnittliche Bewölkung angenommen und die Höhe der Wolkenobergrenze sowie die relative Feuchte konstant gehalten. Wegen des starken Einflusses von Wolken und Feuchtigkeit auf die Flüsse der solaren und infraroten Strahlung zeigte sich, daß das Modell von Manabe und Wetherald sehr sensitiv auf die Behandlung dieser Faktoren reagiert.

Augustsson und Ramanathan (1977) verwendeten die verbesserte Version eines Strahlungs-Konvektions-Modells, in dem die relative Feuchte eine Variable ist und anstelle der Höhe der Wolkenobergrenze die Temperatur an der Wolkenobergrenze konstant gehalten wird. Sie fanden, daß die durch eine CO₂-Zunahme bewirkte Erwärmung der Erdoberfläche von den Annahmen für Feuchte und Bewölkung abhängt.

Eine neuere Weiterentwicklung dieses Modelltyps erfolgte durch Hunt und Wells (1979). Dabei wurde eine durchmischte Ozeanoberflächenschicht von 300 m Tiefe mit einem Strahlungs-Konvektions-Modell gekoppelt, in dem der Temperaturgradient niemals größer als der feucht-adiabatische Temperaturgradient werden kann. Die Oberflächenflüsse der fühlbaren und latenten Wärme wurden mit einer einfachen aerodynamischen Formel bestimmt. Dieses Modell zeigte, daß die thermische Trägheit des angekoppelten Ozeans zu einer zeitlich verzögerten Reaktion der Oberflächentemperatur des Ozeans führt.

7.1.3 Energiebilanz-Modelle

In diesem Modelltyp wird die Variation der Energiebilanz an der Erdoberfläche bzw. der Grenzfläche zwischen Atmosphäre und Ozean betrachtet. Die Modelle verwenden im allgemeinen empirische Zusammenhänge. Die vertikale Temperaturverteilung in der Atmosphäre ist fest vorgeschrieben. Die Modelle verwenden grundsätzlich den folgenden Ansatz für die Wärmebilanz des Systems Erde-Atmosphäre:

$$Q (1 - \alpha_p) - I = C + B$$

Dabei sind Q die den oberen Rand der Erdatmosphäre erreichende Solarstrahlung, α_p die planetare Albedo, I die langwellige Abstrahlung, C die Wärmeverteilung durch horizontale Bewegungen in Atmosphäre und Ozean und B die Wärmeverluste oder -gewinne im System. Für mittlere jährliche Verhältnisse wird der Wert von B als Null angenommen. Beobachtungsdaten zeigen, daß C als Funktion der Erdoberflächentemperatur angesetzt werden kann. Aus der obigen Wärmebilanzgleichung und der Gleichung für C kann die mittlere jährliche Temperatur für jeden Breitengrad berechnet werden. Die berechnete Temperaturverteilung stimmt gut mit der beobachteten überein. Auf dieser Basis ist es möglich, zu bestimmen, wie Änderungen in der Wärmebilanz (z.B. bewirkt durch Addition von CO_2 zur Atmosphäre) die Temperatur der Erdoberfläche beeinflussen.

Das erste Energiebilanz-Modell, das zur Abschätzung der Oberflächentemperaturänderung infolge eines zunehmenden atmosphärischen CO_2 -Gehalts verwendet wurde, war dasjenige von Sellers (1973, 1974). Sellers entwickelte ein zweidimensionales Modell (für Längen- und Breitengrade), welches die Rückkopplung zwischen Eisalbedo und Oberflächentemperatur und konstante Bewölkung und relative Feuchte enthält.

Die neueste Anwendung eines Energiebilanz-Modells auf das CO_2 -Problem erfolgte durch Ramanathan et al. (1979). Sein Modell berechnet zonale Oberflächentemperaturen für die nördliche Hemisphäre als Funktion der Jahreszeit oder des Monats. Die Verteilung des Bedeckungsgrades als Funktion

des Breitengrades wurde zeitunabhängig und gleich der jährlichen mittleren Verteilung angenommen. Eine verwandte Studie von Lian (1978) deutet an, daß die Verwendung von jahreszeitlich verschiedenen Werten für den Bedeckungsgrad anstelle von Jahresmittelwerten keine unterschiedlichen zeitabhängigen Oberflächentemperaturen ergibt.

Von Ohring und Adler (1978) wurde eine Variante des Energiebilanz-Modells entwickelt. Das numerische, zonal gemittelte Modell simuliert das jährliche mittlere Klima der nördlichen Hemisphäre. Das Modell sagt für eine Verdopplung des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes Änderungen der Temperatur an der Erdoberfläche und in 500 mb, sowie Änderungen des Windes in 250 mb und 750 mb jeweils als Funktion des Breitengrades voraus. Prozesse, bei denen die Solarstrahlung eine Rolle spielt, sind die Absorption von Strahlung durch Wasserdampf, Ozon, Luftmoleküle, Wolken und an der Erdoberfläche, sowie die Reflexion an Luftmolekülen und Wolken und an der Erdoberfläche. Prozesse mit langwelliger Strahlung betreffen Absorption und Emission durch Wasserdampf, CO_2 und Wolken. Andere Wärmeübertragungsprozesse wie Konvektion, Verdampfung, Kondensation und Meeresströmungen werden im Modell parametrisiert. Zonal gemittelte, dynamische Modelle unterscheiden sich von den einfachen Energiebilanz-Modellen durch eine verfeinerte Behandlung der dynamischen Effekte und mehr Freiheitsgraden in der Vertikalen. Bei den Energiebilanz-Modellen sind alle physikalischen Prozesse auf die Oberflächentemperatur bezogen. Einer der anerkannten Nachteile des Modells von Ohring und Adler (1978) ist, daß die Bewölkung festgelegt und nicht vorhergesagt wird.

7.1.4 Zweidimensionale statistisch-dynamische Modelle

Ein im Lawrence Livermore Laboratorium, Kalifornien entwickeltes Modell (McCracken und Luther, 1974; Potter et al., 1979) wurde gleichfalls angewendet, um die Auswirkungen einer atmosphärischen CO_2 -Zunahme zu bestimmen. Das Modell ist zonal gemittelt und berücksichtigt die vertikale und meridionale Dimension. In diesem Modell werden die Grundgleichungen der atmosphärischen Zirkulationsmodelle angewendet, um zonal gemittelte

Felder von Druck, Temperatur, Windgeschwindigkeit und Feuchte zu berechnen. Der turbulente Transport latenter und fühlbarer Wärme sowie von Impuls wird mit Hilfe statistischer Überlegungen formuliert. In der Vertikalen enthält das Modell neun Druckschichten. In der Horizontalen wird ein Breitengradraster mit 10^0 Schrittweite verwendet. Die Oberfläche besteht in jedem Breitengradband aus Anteilen von Land (unterschiedliche Oberfläche und Höhe) und Meer. Es werden Flüsse fühlbarer und latenter Wärme an der Oberfläche berechnet. Die Berechnung des Bedeckungsgrades erfolgt unter Verwendung einer von Breitengrad und Höhe abhängigen Funktion für die relative Feuchte, welche auf beobachteten Daten basiert. Für die Meere werden fest vorgegebene Werte für den Nord-Süd Wärmetransport verwendet.

7.1.5 Allgemeine Zirkulationsmodelle

In allgemeinen Zirkulationsmodellen wird das dreidimensionale Verhalten der Atmosphäre durch die Berechnung der zeitabhängigen Lösung der dynamischen Gleichungen für die großräumigen Bewegungen der Atmosphäre simuliert. Die wichtigen Strahlungs- und Wasserdampf-Temperatur-Rückkopplungen sind explizit in allgemeinen Zirkulationsmodellen enthalten. Prozesse wie Reibung, Konvektion, Wolkenbildung und andere Phänomene, deren charakteristischer Längenscale kleiner als der Gitterabstand ist, sind im Modell auf mehr statistische oder empirische Art enthalten. Allgemeine Zirkulationsmodelle werden meistens als genauer angesehen als die einfacheren Klimamodelle. Auch sie sind jedoch noch verbesserungsbedürftig. In den frühesten Modellversionen wurde bei der Simulation der atmosphärischen Zirkulation die Annahme gemacht, daß während der Simulation die Temperatur der Meeresoberfläche konstant auf einem zuvor bestimmten Wert bleibt. Diese Annahme ist jedoch nicht sinnvoll für Untersuchungen, in denen die Auswirkungen der Verdopplung der CO_2 -Konzentration bestimmt werden sollen. Sowohl auf der Basis von einfachen Modellen als auch auf der Basis von allgemeinen Zirkulationsmodellen ergibt sich bei der Zunahme von CO_2 eine Zunahme der Temperatur der Erdoberfläche. Diese Zunahme ist räumlich jedoch nicht gleichförmig verteilt, so daß sich die horizontalen Temperaturgradienten in der Atmosphäre verändern. Die Verstärkung oder Abschwächung

von Temperaturgradienten hat Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation zur Folge und ist Anlaß für Veränderungen der ozeanischen Zirkulation. Gleichzeitig ist zu erwarten, daß die Meere Wärme aus der Atmosphäre absorbieren. Alle diese Fakten deuten auf die Notwendigkeit hin, daß zur Bestimmung des Einflusses der Zunahme der CO_2 -Konzentration die atmosphärische und die ozeanische Zirkulation als gekoppeltes System simuliert werden muß. Ein Modell, welches die atmosphärische und gesamte ozeanische Zirkulation enthält, wurde für solche Simulationen noch nicht verwendet. Es wurden jedoch verschiedene Näherungen durchgeführt.

Gates und Cook (1979) und Mitchell (1979) verwendeten ein atmosphärisches allgemeines Zirkulationsmodell mit konstanter Temperatur der Meeresoberfläche, um den Einfluß einer Verdopplung der CO_2 -Konzentration zu untersuchen. In diesem Fall wurde zwar zugelassen, daß der Ozean Wärme aus der Atmosphäre aufnimmt, die Temperatur der Ozeanoberfläche blieb aber konstant. Das heißt, die Ozeane stellen eine unendlich große Senke für die aus der Atmosphäre absorbierte Energie dar. Die Reaktion der Atmosphäre auf eine CO_2 -Verdopplung ist daher kleiner als im Falle eines interaktiven Ozeans, bei dem eine Erhöhung der Oberflächentemperatur zugelassen ist. Diese geringere Reaktion könnte den Zustand des Klimasystems kurz nach der Verdopplung der CO_2 -Konzentration repräsentieren, solange die thermische Trägheit des Ozeans hauptsächlich die Reaktion bestimmt (einige Dekaden).

Manabe und Wetherald (1975) verwendeten die Version eines allgemeinen Zirkulationsmodells, bei dem die Atmosphäre in neun Schichten unterteilt war. In dieser Version wurde die Verteilung von Land und Meer vereinfacht, auf die Weise wie in Abb. 8 dargestellt, angenommen. Das Modell nimmt eine konstante Bewölkung an, und der Ozean wird als "Sumpf" ohne Wärmekapazität behandelt. Bei diesem Typ eines Ozeanmodells wird die Temperatur der Ozeanoberfläche aus der Bedingung, daß zu jeder Zeit ein thermisches Gleichgewicht zwischen Ozean und Atmosphäre besteht, bestimmt. Der "Sumpf"-Ozean stellt eine Quelle für Wasserdampf dar. Bildung und Abschmelzen von Meereis ist ebenfalls möglich. Die Rückkopplung von Wasserdampf und Eisalbedo verstärkt die Reaktion der Oberflächentemperatur der Erde auf eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration im Modell.

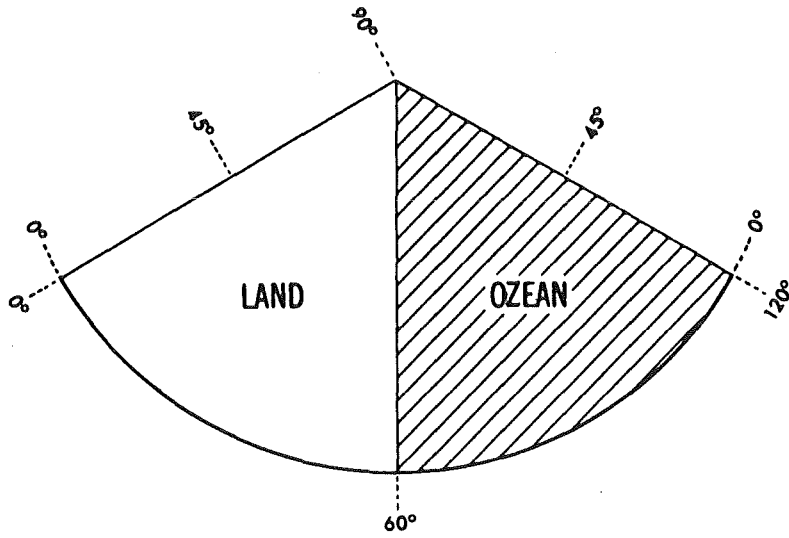


Abb. 8: Modellhafte Verteilung von Land- und Meeresfläche

Manabe und Stouffer (1979) untersuchten kürzlich die Kopplung zwischen Atmosphäre und Ozean. Sie verwendeten ein allgemeines Zirkulationsmodell (Spektralversion) mit konstanter Bewölkung und saisonal verschiedenen Werten für die Sonneneinstrahlung. Damit gekoppelt war eine stationäre durchmischte Ozeanoberflächenschicht von 68 m Tiefe. Die Gleichgewichtstemperatur der Meeresoberfläche wurde bei der Simulation nach etwa 10 Jahren erreicht.

7.2 Der "Treibhauseffekt" und mögliche Rückkopplungen

Zahlreiche Untersuchungen mit Klimamodellen unterschiedlicher Komplexiertheit haben gezeigt, daß die CO_2 -Zunahme in der Atmosphäre zu einer Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre führt. Diese Erwärmung geht darauf zurück, daß CO_2 langwellige Strahlung gut absorbiert bzw. emittiert. Die Erwärmung der Erdoberfläche ist daher auf die zunehmende, nach unten gerichtete Emission langwelliger Strahlung aus dem CO_2 der unteren Atmosphäre zurückzuführen. Dieser Effekt wird oft "Treibhauseffekt" genannt, obwohl die Analogie nicht hundertprozentig gegeben ist. Die Erwärmung der unteren Atmosphäre ist eine Folge der stärkeren Absorption langwelliger Strahlen durch die Erdoberfläche und durch die Wolken sowie der stärkeren, nach unten gerichteten Emission langwelliger Strahlung aus CO_2 in der oberen Atmosphäre.

Berechnungen zeigen, daß eine Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zu einer Nettoerwärmung der unteren Atmosphäre, der Ozeane und des Festlands von durchschnittlich ca. 4 Wm^{-2} führt (Ramanathan et al., 1979; NAS, 1979). Dieser Nettowert wurde mit relativ großer Sicherheit auf $\pm 25\%$ genau geschätzt (NAS, 1979). Größere Unsicherheiten ergeben sich indessen aus den Schätzungen hinsichtlich der Veränderung der globalen mittleren Temperatur der Erdoberfläche ΔT , die auf eine Änderung der Erwärmungsrate um ΔQ zurückzuführen ist. Der Grund dafür ist, daß eine Reihe von Rückkopplungsprozessen ΔQ erhöhen oder verringern können. Diese Veränderung kann wie folgt als Gleichung ausgedrückt werden

$$\Delta T = \Delta Q / \lambda$$

λ wird Rückkopplungsparameter genannt ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). In NAS (1979) werden die auf ΔQ einwirkenden Rückkopplungsprozesse diskutiert. Im einfachsten Fall wird angenommen, daß die Erde im Grunde ein "schwarzer Körper" ist und daß eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration einen Temperaturanstieg von 1K bewirkt (d.h. $\lambda = 4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Die stärkste Rückkopplung ergibt sich aus der Tatsache, daß die höhere Oberflächentemperatur zu einem höheren Wasserdampfanteil in der Atmosphäre führt. Die Zunahme der absoluten Feuchtigkeit vergrößert die Absorption langwelliger Strahlung und erhöht damit die Wirkung des CO_2 (positive Rückkopplung). Vom Wasserdampf wird auch mehr Sonnenstrahlung absorbiert, mit dem Ergebnis, daß bei einer Verdopplung der CO_2 -Konzentration die Temperaturerhöhung 2K betragen würde (d.h. $\lambda = 2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Diese Rückkopplung zwischen Temperatur und Feuchtigkeit schließt andere Rückkopplungen, wie sie zum Beispiel durch Bewölkung entstehen, nicht mit ein. Zum Beispiel könnte eine Zunahme der relativen Feuchte zu stärkerer Bewölkung und dadurch zu einer Beeinflussung der Reflexion und Absorption von Strahlung führen. Die Rückkopplungseffekte zwischen Temperatur, Feuchtigkeit und Wolken sind jedoch noch nicht gut verstanden und eine Zunahme der Bewölkung kann positive und negative Rückkopplungen haben, wobei über den Nettoeffekt noch Unklarheit herrscht.

Ein weiterer Rückkopplungsprozeß ist die Rückkopplung durch Schnee und Eis. In diesem Fall bewirkt eine höhere Temperatur der Erdoberfläche das Schmelzen von Schnee oder Eis, so daß das Reflexionsvermögen der Erdoberfläche verringert wird (Albedo-Effekt), und die Absorption der Sonnenstrahlung erhöht wird, wodurch weitere Erwärmung eintritt (positive Rückkopplung). Schätzungen über diese Rückkopplung besagen, daß sich λ um 0,1 - 0,9 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ verringert (Lian und Cess, 1977; NAS, 1979).

Unter Berücksichtigung der obigen Rückkopplungseffekte schätzte die NAS (1979), daß $\lambda = 1,7 \pm 0,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ beträgt und daß deshalb für die doppelte CO_2 -Menge ΔT zwischen 1,6 und 4,5 K liegt, wobei 2,4 K ein wahrscheinlicher Wert ist. In den folgenden Abschnitten wird jedoch gezeigt, daß die Erwärmung global nicht gleichförmig verteilt ist und daß Änderungen sowohl in der globalen atmosphärischen Zirkulation als auch in anderen Klimaelementen, wie der Niederschlagsverteilung, erwartet werden können.

7.3 Durch die geographische Breite und die Jahreszeiten bedingte Schwankungen

Ramanathan et al., (1979) haben darauf hingewiesen, daß die Erwärmungsvorgänge durch Strahlung infolge der CO_2 -Zunahme ungewöhnlich stark von der Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilung in der Atmosphäre abhängen, die wiederum abhängig sind von der Jahreszeit und der geographischen Breite. Die durch die geographische Breite und die Jahreszeit bedingten Veränderungen der Auswirkungen der CO_2 -Zunahme in der Atmosphäre wurden von Ramanathan et al. (1979) untersucht. Sie verwendeten ein Strahlungsmodell sowie ein Klimamodell für den Energieausgleich. Die mit dem Strahlungsmodell gewonnenen Ergebnisse zeigten, daß bei Verdoppelung des CO_2 -Gehalts im Winter die Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre (wie oben mit ΔQ bezeichnet) von $4,6 \text{ Wm}^{-2}$ am Äquator auf $2,2 \text{ Wm}^{-2}$ bei 80° n. Br. zurückging. Das deutet darauf hin, daß zwischen den verschiedenen geographischen Breiten große Unterschiede bestehen. Außerdem fand man, daß nördlich von 20° n. Br. die Erwärmung im Sommer stärker ist als im Winter und daß die Differenz zwischen Erwärmung im Sommer und im Winter mit höherem geographischen Breitengrad zunimmt. Diese Auswirkungen werden in Abb. 9 deutlich gemacht, die auch zeigt, daß die Erwärmungsraten in der nördlichen Hemisphäre in hohen Breiten größer sind als in der südlichen Hemisphäre. Ramanathan et al. (1979) stellten fest, daß alle diese Unterschiede in der Erwärmungsrate von Temperaturdifferenzen abhängen.

Abb. 10 zeigt die Erwärmung durch Strahlung infolge einer Verdoppelung des CO_2 -Gehalts im Winter, getrennt für die Erdoberfläche und die Troposphäre. Die übrigen Jahreszeiten weisen nach Ramanathan et al. (1979) die gleiche Verteilung auf. Der Grund für den Unterschied zwischen tropischen und polaren Breiten ist auf den Einfluß von Wasserdampf zurückzuführen, der in der Atmosphäre der Tropen reichlich und zu den Polen hin weniger reichlich vorhanden ist.

Die errechneten Erwärmungsraten wurden in ein Klimamodell zur Bestimmung von Energiebilanzen eingearbeitet, um die entsprechenden Veränderungen der Erdoberflächentemperatur für Breitengrade und Jahreszeiten zu ermitteln.

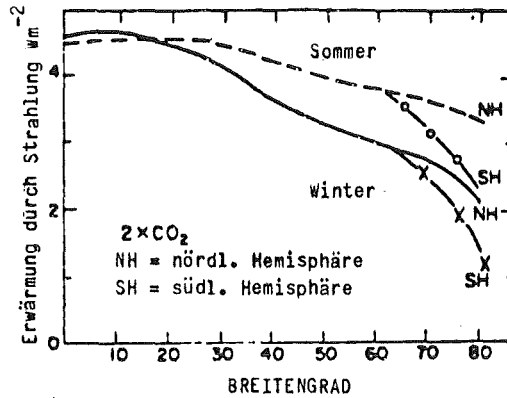


Abb. 9: Erwärmung des Systems Erdoberfläche-Troposphäre durch Absorption von Strahlung infolge einer Verdoppelung des CO_2 -Gehalts. Der derzeitige Wert für das CO_2 -Mischungsverhältnis wird mit 320 Volumen-ppm angenommen.

Quelle: Ramanathan et al. (1979)

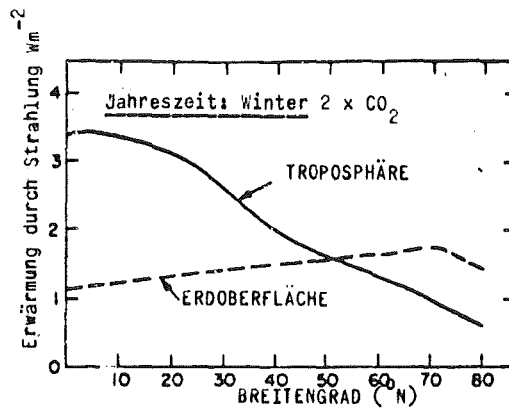


Abb. 10: Gliederung der gesamten Erwärmung des Systems Erdoberfläche-Troposphäre durch Verdoppelung des CO_2 -Gehalts nach Erwärmung der Erdoberfläche und Erwärmung der Troposphäre.

Quelle: Ramanathan et al. (1979)

Bei Verdoppelung des CO_2 -Gehalts ergab sich eine Zunahme des Jahresmittels der Temperatur der Erdoberfläche in der Hemisphäre von 3,3 K. Das Jahresmittel der Temperatur der Erdoberfläche stieg um etwas über 3 K in den niedrigen Breitengraden an und nahm um mehr als 5,5 K in den höheren Breitengraden zu. Abb. 11 zeigt, daß in den niedrigen Breitengraden praktisch kein jahreszeitlicher Unterschied der Temperaturerhöhung besteht, daß jedoch die Temperatur in den höheren Breitengraden im Frühjahr bei 65° n. Br. und im Frühjahr und Sommer bei 85° n. Br. stärker zunimmt. Ramanathan et al. fanden, daß die Verstärkung im Frühjahr und Sommer ausschließlich auf die Rückkopplung des Eis-Albedo-Effekts zurückzuführen ist. Sie weisen darauf hin, daß der Eis-Albedo-Effekt neben dem im Winter verstärkt vorhandenen Eis und Schnee auch solare Strahlung erfordert und damit in den Wintermonaten nicht wirksam sein kann. Wenngleich die Autoren angeben, daß das Modell viele zeitabhängige Prozesse nicht beinhaltet, weisen die Ergebnisse dennoch darauf hin, daß die Temperaturerhöhung insbesondere im Frühjahr und Sommer verstärkt eintreten könnte.

Es wird von Bedeutung sein, inwieweit die in Abb. 11 dargestellte breitengradabhängige Erwärmung der Erdoberfläche infolge des höheren CO_2 -Gehalts nachgewiesen werden kann. Aufgrund von Abb. 11 ist die Veränderung am besten im Frühjahr und im Sommer in höheren Breitengraden zu beobachten. Ramanathan et al. berechneten, daß eine Zunahme der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre um den Faktor 1,33 in der nördlichen Hemisphäre zu einer Zunahme der mittleren Temperatur der Erdoberfläche um 1,45 K führt, jedoch wurde für den Monat Juni bei 85° n. Br. eine Zunahme um 6,5 K errechnet.

Grassl (1981) hat vor kurzem Ergebnisse von Sensitivitätsuntersuchungen mit einem zonal mittelnden Energie-Bilanz-Modell vorgelegt. Das verwendete Modell baut auf dem von Paltridge (1975) entwickelten Modell auf. Es enthält vier Unbekannte: die Oberflächentemperatur, den Bedeckungsgrad, die meridionalen Wärmeflüsse im Ozean und in der Atmosphäre sowie den vertikalen Wärmefluß. Die maximale Entropieerzeugung durch meridionale Wärmeflüsse wird bei der Lösung des Gleichungssystems und der Bestimmung der Unbekannten als Restriktion verwendet. Mit dem Modell wurde die aus einer Verdoppelung des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre resultierende Änderung der Oberflächen-

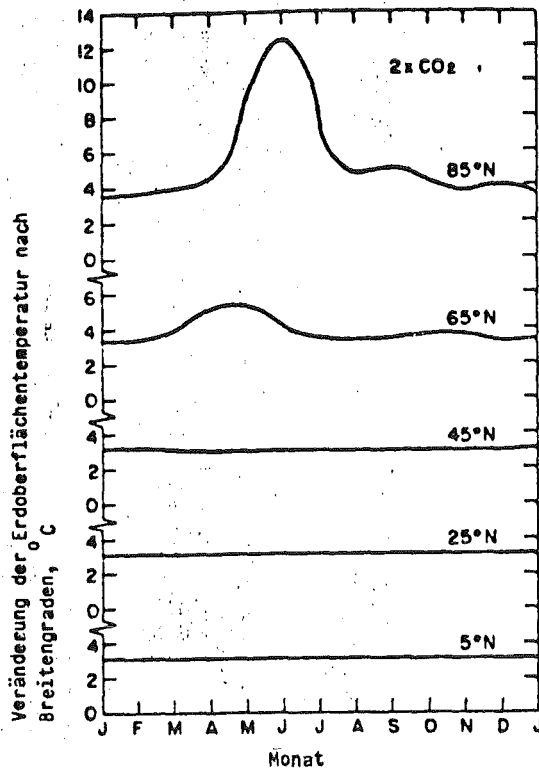


Abb. 11: Zunahme der zonalen Oberflächentemperatur durch Verdoppelung des CO₂-Gehalts in Abhängigkeit vom Monat für verschiedene Breitengrade

Quelle: Ramanathan et al. (1979)

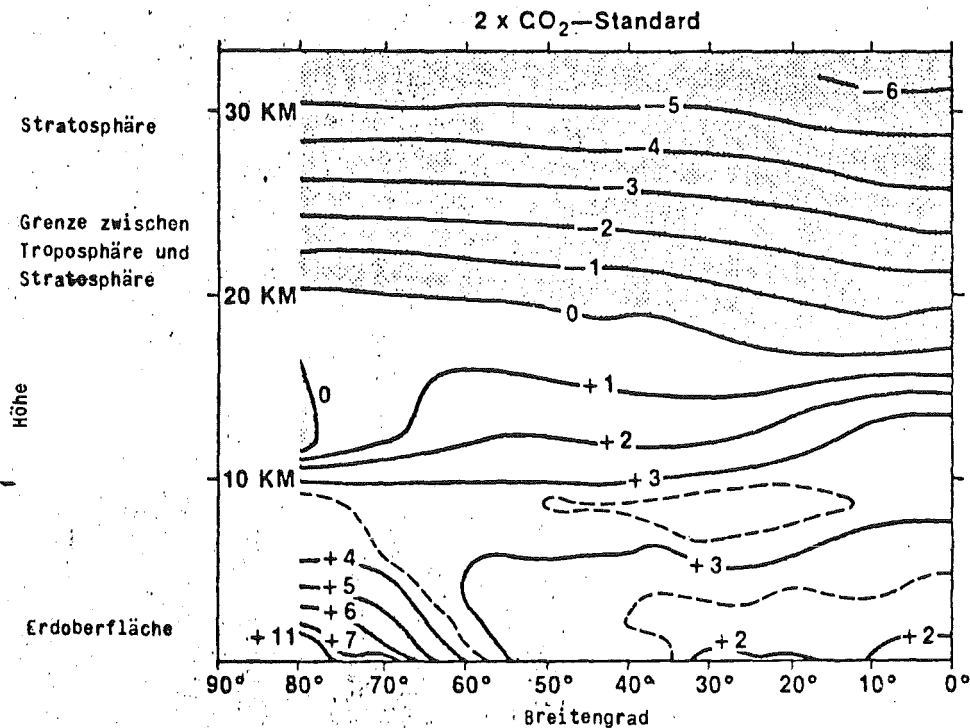


Abb. 12: Die über die Längengrade gemittelten Temperaturdifferenzen zwischen einer Simulation mit einem allgemeinen Zirkulationsmodell und den derzeitigen Werten des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre und einer Simulation mit dem doppelten CO₂-Gehalt

Quelle: Manabe und Wetherald (1975)

temperatur, des Bedeckungsgrades und der meridionalen atmosphärischen Wärmeflüsse berechnet. Dabei ergab sich eine Zunahme der global gemittelten Oberflächentemperatur um 1,06 K. Diese Zunahme ist wesentlich kleiner als die mit anderen Energie-Bilanz-Modellen errechnete. Bemerkenswert ist, daß die Temperatur in den polaren Gebieten nur wenig anstieg, obwohl das Modell die Eis-Albedo Rückkopplung berücksichtigt. Grassl (1981) folgert, daß diese Unterschiede sich aus einer Zunahme der Bewölkung und einer Abnahme des meridionalen Wärmeflusses ergeben. Er hebt hervor, daß die meisten anderen Modelle eine feste Bewölkung und parametrisierte Wärmeflüsse verwenden.

7.4 Untersuchungen mit allgemeinen Zirkulationsmodellen

Selbstverständlich kann nicht erwartet werden, daß das Klima auf eine erhöhte CO_2 -Konzentration räumlich oder zeitlich einheitlich reagiert. Für eine realistische Bestimmung der Auswirkungen einer Zunahme des CO_2 -Gehalts ist es zweifellos unabdingbar, neben den möglichen Veränderungen der mittleren Temperatur auf der Erde auch die Veränderungen einer Reihe anderer meteorologischer Variablen (Regen, Temperatur, Windgeschwindigkeit usw.) zu verschiedenen Zeiten des Jahres und in bestimmten Regionen zu kennen. Die Bemühungen, diese Fragen zu beantworten, konzentrieren sich vor allem auf den Einsatz allgemeiner Zirkulationsmodelle für die Atmosphäre oder das Gesamtsystem Atmosphäre-Ozean. Diese Modelle simulieren das dreidimensionale zeitabhängige System numerisch.

Die erste Studie mit einem allgemeinen Zirkulationsmodell wurde von Manabe und Wetherald (1975) durchgeführt. Das numerische Modell wurde mit einer CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre von 300 ppm bei der ersten Simulation und von 600 ppm bei der zweiten Simulation angesetzt. Abb. 12 zeigt die Unterschiede der nach geographischen Breiten gemittelten Temperaturen, die aus den beiden Simulationen folgen. Die Zunahme der globalen, mittleren Erdoberflächentemperatur beträgt 2,9 K. Das stimmt mit den Schätzungen aufgrund einfacherer Modelle überein, die eine Zunahme von 1,5 - 3 K bei einer Verdoppelung der CO_2 -Konzentration angeben (Schneider, 1975). In der

Polarzone ist die Temperaturerhöhung jedoch mit einer Erhöhung bis zu 10 K wesentlich stärker. Der Niederschlag nimmt global um 7 % zu.

Das Modell wies jedoch mehrere Mängel auf (die beispielsweise von Smagorinsky (1977) und von den Autoren selbst diskutiert wurden). Man hatte eine idealisierte Verteilung der Ozeane und Kontinente angenommen und weder eine Wärmespeicherung durch die Kontinente oder Ozeane noch einen Wärmetransport im Meer berücksichtigt. Das Meer wurde im Grunde als "Sumpf" behandelt, aus dem Wasser lediglich frei verdampft. Darüberhinaus war der Bedeckungsgrad in beiden Simulationen auf die in der Gegenwart beobachteten Werte fixiert.

In jüngster Zeit wurden vier weitere Simulationsreihen mit Hilfe eines allgemeinen Zirkulationsmodells durchgeführt. Die NAS (1979) hat die Ergebnisse dieser Modellrechnungen geprüft und kam zu dem Schluß, daß eine Verdoppelung der CO_2 -Konzentration aufgrund dieser Ergebnisse zu einer globalen, mittleren Zunahme der Temperatur der Erdoberfläche zwischen 1,5 K und 4,5 K führen würde, wobei der wahrscheinlichste Wert in der Nähe von 3 K läge. Da jedoch die Rückkopplung durch den Eis-Albedo-Effekt in der nördlichen Hemisphäre größer ist als in der südlichen (wegen der größeren Landflächen in der nördlichen Hemisphäre und der Tatsache, daß sich die Albedo in der Antarktis nicht verändert), wird in der nördlichen Hemisphäre mit einer größeren Temperaturänderung gerechnet. Sämtliche Modelle sagten für die höheren Breiten eine größere Zunahme der Erdoberflächentemperatur voraus; die Veränderung der polaren oder subpolaren Jahresmittelwerte war mit 4 - 8 K am größten.

Die NAS (1979) wies darauf hin, daß die allgemeinen Zirkulationsmodelle zeitlich gemittelte Durchschnittswerte der meteorologischen Größen, beispielsweise Temperatur und Niederschlag, liefern und daß diese Mittelwerte recht gut mit denen übereinstimmen, die beobachtet werden, wenn man weltweit oder für geographische Breiten gefundene Mittelwerte in Betracht zieht. Die regionalen Verteilungen werden jedoch nicht so gut nachgebildet, da die Modelle eine Reihe größerer Mängel aufweisen, z.B. ungenügende Berücksichtigung der Wolken, der Niederschläge und orographischer Effekte.

Deshalb gelangt die NAS (1979) zu dem folgenden Schluß:

"Aus diesem Grund glauben wir nicht, daß die vorhandenen Modelle in ihren Voraussagen über regionale klimatische Veränderungen aufgrund einer Veränderung der CO₂-Konzentration überhaupt zuverlässig sind.

Wir schließen daraus, daß die Voraussagen der durch CO₂ bedingten klimatischen Veränderungen mit Hilfe der verschiedenen untersuchten Modelle im Grunde übereinstimmen und sich gegenseitig bestätigen. Die Unterschiede in den Ergebnissen der einzelnen Modelle sind relativ gering; sie sind bedingt durch unterschiedliche Modellmerkmale und durch vereinfachende Annahmen. Wir können natürlich nie sicher sein, ob nicht einige unzureichend geschätzte oder ganz übersehende Effekte unsere Schlußfolgerungen ungültig machen. Wir können nur sagen, daß es uns nicht gelungen ist, solche Effekte zu finden. Falls sich die CO₂-Konzentration der Atmosphäre wirklich verdoppelt und lange genug auf dieser Höhe bleibt, so daß die Atmosphäre und die mittleren Schichten des Ozeans in etwa ein thermisches Gleichgewicht erreichen, dann können wir bestenfalls schätzen, daß sich die globale Temperatur um ca. 3⁰ C ändern wird und daß diese Änderungen von bedeutenden Veränderungen der Klimaabläufe in den einzelnen Regionen begleitet sein werden".

7.5 Die Rolle der Meere

Die bisher zur Untersuchung der Auswirkungen der CO₂-Zunahme benutzten Modelle haben entweder die Meere nicht eigens behandelt oder das Meer und seine Wechselwirkungen mit der Atmosphäre stark vereinfacht dargestellt. Weder im "Sumpfmmodell" noch bei der Behandlung der durchmischten Schicht gibt es einen horizontalen Wärmetransport im Meer. Die derzeitigen Beobachtungen lassen aber erkennen, daß die Meere in bestimmten geographischen Breiten bis zu 50 % der polwärts gerichteten Wärmeströme des Systems Atmosphäre-Ozean transportieren (Oort und von der Haar, 1976). Deshalb könnte die Vernachlässigung dieses Transports in Klimamodellen bedeuten, daß die Ergebnisse der CO₂-Sensitivitätstests nicht der Wirklichkeit entsprechen.

Wurde das Meer in Modelluntersuchungen über die Auswirkungen von CO_2 berücksichtigt, dann wurde nur die durchmischte Schicht (etwa die oberen 100 m) in Betracht gezogen. Die durchmischte Schicht unterliegt einem jährlichen Zyklus von Wärmespeicherung und -freigabe in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Über einen längeren Zeitraum, beispielsweise Jahrzehnte, müssen die Wechselwirkungen und der Wärmeaustausch mit den tieferen Meeresschichten berücksichtigt werden. Die NAS (1979) weist darauf hin, daß über längere Zeiträume hinweg das effektive Wärmeabsorptionsvermögen des Meeres fast eine Größenordnung über dem der durchmischten Schicht allein liegt. Hinsichtlich der CO_2 -Effekte gilt also: Wenn die Meere ein größeres Wärmeabsorptionsvermögen besitzen als die durchmischte Schicht allein, dann gilt bezüglich der Auswirkungen von CO_2 , daß die globale Änderung der Gleichgewichtstemperatur der Erdoberfläche als Reaktion auf beispielsweise die Verdoppelung des CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre mit einer Verzögerung erreicht wird. Die NAS (1979) folgert, daß diese Verzögerung in der Größenordnung von einigen Jahrzehnten liegen könnte. Die Auswirkungen dieser Verzögerung werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

Washington und Ramanathan (1980) haben weitere, für die Folgen des CO_2 -Gehalts wichtige Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean diskutiert. Eines ihrer Argumente lautet, daß, wenn eine wärmere und feuchtere Atmosphäre als Folge eines höheren CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre sich einstellt, damit gerechnet werden könnte, daß wärmeres Wasser mit weniger Salzgehalt (geringere Dichte) an der Oberfläche auftritt. Dadurch würde sich weniger kaltes Wasser in den mittleren Schichten und am Meeresgrund bilden. Washington und Ramanathan (1980) sind der Ansicht, daß zur Simulation von CO_2 -Auswirkungen wahrscheinlich der gesamte Ozean zu berücksichtigen ist und nicht nur die Oberflächenschicht.

7.6 Transientes Verhalten der Atmosphäre bei Zunahme der CO_2 -Konzentration

Die bis jetzt besprochenen Untersuchungen mit Klimamodellen haben alle die Reaktion des Gleichgewichtsklimas auf eine Änderung der CO_2 -Konzentration entsprechend einer Stufenfunktion behandelt. Das CO_2 in einer Modellatmo-

sphäre wurde beispielsweise verdoppelt, und die Differenz zwischen den Gleichgewichtszuständen des Modells (mit und ohne Verdoppelung der CO_2 -Konzentration) wurde untersucht. In Wirklichkeit nimmt die CO_2 -Konzentration jedes Jahr zu, und die transiente Reaktion des Klimas auf die zeitabhängige CO_2 -Zunahme muß untersucht werden.

Durch mehrere Untersuchungen wurde in jüngster Zeit die Zeitverzögerung bei der Reaktion des Klimas auf erzwungene Veränderungen erforscht. Hasse (1979) meinte beispielsweise, daß die Auswirkung der Wärmekapazität der tieferen Ozeanschichten die Annäherung des Klimas an den neuen Gleichgewichtszustand bei einer erheblichen CO_2 -Zunahme um viele Jahrzehnte verzögern könnte. Thompson und Schneider (1979) schätzten, daß die gemittelte globale Veränderung der Temperatur der Erdoberfläche um 5 - 20 Jahre hinter der mit einem "Sumpfmmodell" berechneten Veränderung zurückbleibt. Die NAS (1979) stellte ebenfalls fest, daß eine Verzögerung um mehrere Jahrzehnte eintreten könnte, weil sich durch den Austausch zwischen Wasser der oberen Schicht und der Tiefsee (Wasservorräte in den größeren Meerestiefen) die Wärmekapazität des Meeres erhöhen würde. Diese und andere Untersuchungen wurden vor kurzem von Schneider und Thompson ausführlicher geprüft (1980). In den meisten Untersuchungen wird ausgesagt, daß die global gemittelte Temperatur der Erdoberfläche mehrere (oder viele) Jahre nach Verdoppelung der CO_2 -Konzentration ihren Gleichgewichtswert erreichen würde.

Schneider und Thompson (1980) erweiterten die Arbeiten auf diesem Gebiet und untersuchten die Annäherung der über die Breitengrade gemittelten Temperatur an den Gleichgewichtswert. Sie benutzten dabei eine Reihe von einfachen Energiebilanzmodellen und fanden, daß die Annäherung von der globalen mittleren Annäherung abweicht. Deshalb durchlaufen die horizontalen Temperaturgradienten und damit die Zirkulation in der Atmosphäre, eine andere zeitliche Entwicklung als der global gemittelte Wert. Schneider und Thompson (1980) sind der Ansicht, daß sich regionale Klimaanomalien zeitlich ganz anders entwickeln können als in den Modellexperimenten mit dem Gleichgewichtsklima angegeben. Eine Reihe von Voraussagen läßt beispielsweise vermuten, daß sich die CO_2 -Konzentration bis zum Jahre 2000 um etwa 20 % erhöht haben wird. Es ist vielleicht einfach nicht genug, im Gleich-

gewichtszustand 1/5 der Reaktion eines Modells auf die Verdoppelung von CO_2 als Wert zu nehmen und zu erwarten, daß es sich dabei in etwa um die im Jahre 2000 auftretende Reaktion des Klimas handelt. Erstens wäre mit einer zeitlichen Verzögerung der Reaktion auf die CO_2 -Zunahme zu rechnen und zweitens handelt es sich um ein transientes Verhalten, das sich anders entwickelt als durch Gleichgewichtsmodelle vorausgesagt. Schneider und Thompson (1980) kommen zu dem Schluß, daß eine bessere Berücksichtigung der zeitlichen und räumlichen Veränderung der Wärmeträgheit ein Punkt mit sehr hoher Priorität für Forschungsarbeiten über die Auswirkungen höherer CO_2 -Werte sein wird.

7.7 Die Frage des Signal-zu-Rauschverhältnisses

Das natürliche Klima ist von Natur aus veränderlich. Das ergibt sich deutlich aus der Tatsache, daß ein Winter nicht das genaue Abbild des vorangegangenen Winters darstellt oder daß sich die mittlere Jahrestemperatur an den Wetterstationen von Jahrzehnt zu Jahrzehnt ändert. Nach Mitchell (1979) hat diese Veränderlichkeit zwei Folgen bezüglich der Auswirkung der CO_2 -Zunahme. Erstens wird die natürliche Veränderlichkeit des Klimas wahrscheinlich auch in Zukunft andauern, während sich der CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre gleichzeitig erhöht, und die klimatischen Veränderungen, die eigentlich auf die CO_2 -Zunahme zurückgehen, werden möglicherweise überdeckt werden. Zweitens würden die vielen natürlichen und anthropogenen Ursachen der Veränderlichkeit des Klimas in Zukunft mit dem höheren CO_2 -Anteil konkurrieren, um künftige Klimaänderungen hervorzurufen.

Die von Mitchell (1979) stammende Abb. 13 läßt erkennen, daß die globalen Änderungen der mittleren Temperatur in den letzten 100 Jahren zwischen - 0,5 K und + 0,5 K betragen und dafür natürliche Ursachen verantwortlich waren. Die Zeichnung läßt auch erkennen, daß die Auswirkungen eines CO_2 -Anstieges nach dem Jahre 2000 vor dem Hintergrund der natürlichen Veränderlichkeit sichtbar sein werden. Abb. 11 zeigte, daß aufgrund der Ergebnisse einfacher Modelle die stärkste Reaktion der Temperatur auf CO_2 in den höheren Breiten im Frühjahr oder Sommer zu erwarten ist. Ramanathan und Madden (1980) prüften aber die von den meteorologischen Stationen in der

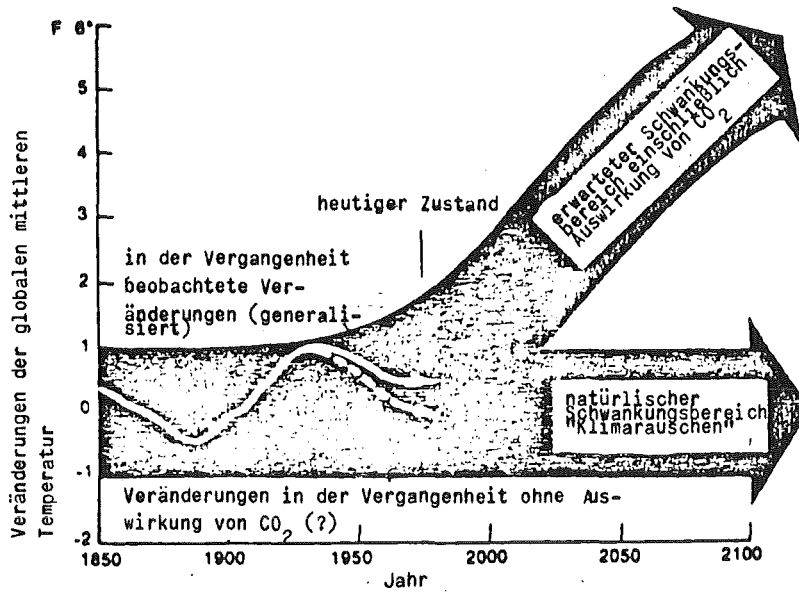


Abb. 13: Bereich der globalen mittleren Temperatur von 1850 bis 2100, mit und ohne vorhergesagtem CO₂-Effekt
Quelle: Mitchell (1979)

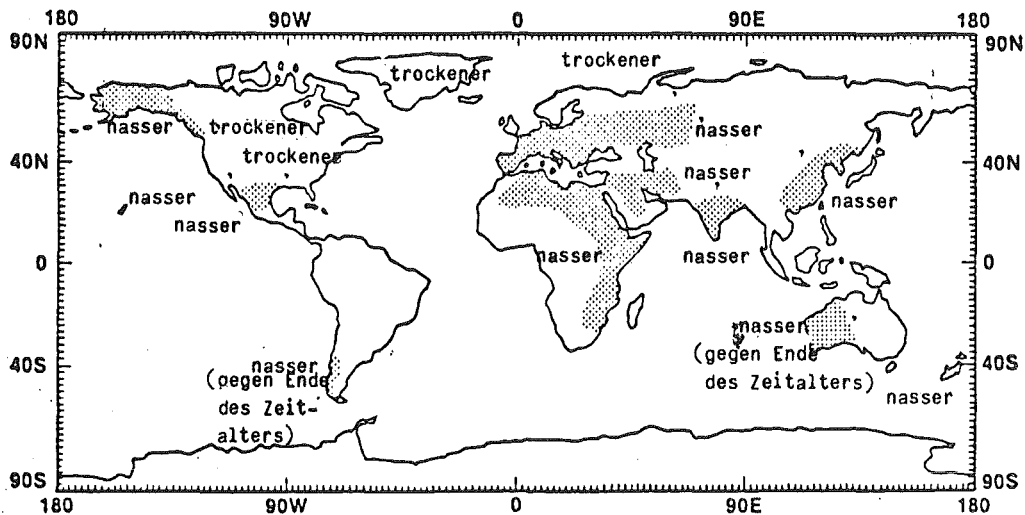


Abb. 14: Darstellung der Anomalien der Regenfälle, die vorzugsweise im Sommer auftreten, während der Warmzeit in Postglazial (vor 4000 bis 5000 Jahren). Die Begriffe "nasser" und "trockener" beziehen sich auf die heutige Situation. Nicht markierte Bereiche bedeuten, daß Informationen fehlen.
Quelle: Kellogg (1978)

Nähe von 60° n. Br. über 73 Jahre aufgezeichneten Werte und fanden, daß es keinen Beweis für eine durch CO₂ bedingte Temperaturerhöhung gibt. Sie kommen zu dem Schluß, daß die größten vorausgesagten Veränderungen entweder übertrieben sind oder daß andere ausgleichende Faktoren wirksam sind.

7.8 Szenarien für das Klima der Vergangenheit

Da die Ergebnisse von Modellexperimenten zur Untersuchung der Auswirkungen eines steigenden CO₂-Anteils in der Atmosphäre mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet sind und es wichtig ist, die regionalen Klimaveränderungen, einschließlich Änderungen der Niederschlagsmenge und -verteilung vorauszusagen, wurde das Problem der Klimavorhersage auch auf andere Weise angegangen. Kellogg (1978) sieht eine Möglichkeit herauszufinden, wie die Erde mit einem wärmerem Klima aussehen mag, darin, klimatologische Befunde aus Zeiträumen zu untersuchen, in denen die Erde wärmer als heute war. In Abb. 14 werden von Kellogg die Bedingungen der Warmzeit im Postglazial rekonstruiert, einem Zeitraum vor 4000 bis 8000 Jahren, in dem es in der nördlichen Hemisphäre wärmer war als heute. Die Karte zeigt Niederschlagsmengen im Vergleich zu den heutigen Werten an Orten, für die Daten verfügbar sind. Kellogg weist beispielsweise darauf hin, daß sich Nordafrika im großen und ganzen besser für die Landwirtschaft eignete als heute, daß in Europa ein nasserer Klima herrschte, Skandinavien ein trockneres Klima hatte und daß Nordamerika von einem Gürtel aus Weideland durchzogen war, aus dem später Wald wurde. Kellogg warnt davor, diese Karte als getreue Darstellung des Zustands anzusehen, der eintreten könnte, wenn es auf der Erde wieder warm wird, denn die Ursachen der Erwärmung könnten ganz andere gewesen sein als die der potentiellen, vom Menschen verursachten Erwärmung. Die Ursachen für den Temperaturanstieg während der Warmzeit im Postglazial sind nicht bekannt. Weitere Probleme im Zusammenhang mit diesem Vorgehen wurden von Williams (1980) und Flohn (1980) genannt, die diese Arbeit erweitert haben.

In zwei neueren Untersuchungen wurde ähnlich vorgegangen. Dort wurden die im letzten Jahrhundert durchgeführten (mit Meßgeräten gemachten) Beobachtungen von Temperatur, Niederschlägen und Druck als Grundlage für die

Diskussion des Klimaverhaltens bei Erwärmung benutzt (Williams, 1980; Wigley et al., 1980). Williams (1980) befaßte sich mit regionalen Anomalien bei Regenfällen, der Temperatur und des Druckes in der nördlichen Hemisphäre, und zwar für verschiedene Jahreszeiten innerhalb der letzten 70 Jahre, in denen die Arktis warm war. Der Grund für die Auswahl warmer arktischer Jahreszeiten ergibt sich aus Modellstudien und Beobachtungen, aus denen hervorgeht, daß die Arktis Klimaänderungen gegenüber empfindlicher ist. Die warmen Jahreszeiten in der Arktis waren eindeutig nicht die Folge eines höheren CO_2 -Gehalts, sondern entstanden eher aus nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems und vielleicht anderen Arten äußerer Zwänge. Die von Williams (1980) publizierten Ergebnisse sind in Abb. 15 dargestellt und zeigen für die Zeit von 1900 bis 1969 den Unterschied der Oberflächentemperatur zwischen den zehn wärmsten arktischen Wintern und den übrigen Wintern. Die schraffierten Flächen bezeichnen Gebiete, in denen die zehn Winter zusammen im Mittel kühler waren als das langjährige Mittel. Die Wärme in der Arktis ist gekennzeichnet durch eine Anomalie von 3°C bei 90° ö. Br.

Weder in der Studie von Williams (1980) noch in der von Wigley et al. (1980) wird behauptet, daß die Verteilung von Temperatur- und Niederschlagsanomalien als Voraussage für die Veränderungen angesehen werden kann, die aufgrund der Verdoppelung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre zu erwarten sind. Die Studien dürften jedoch bei der Entwicklung von Szenarien potentieller Veränderungen nützlich sein. Ein Vorteil dieses Vorgehens liegt in der Verdeutlichung, daß große kohärente Anomalien eine grundlegende Reaktion auf eine Klimabeeinflussung darstellen und daß die einzelnen Jahreszeiten aufgrund unterschiedlicher klimatologischer Prozesse, die in jeder Jahreszeit vorherrschen, verschieden reagieren. Wahrscheinlich kann das Verhalten des Klimas bei Störungen, beispielsweise in Form einer Verdoppelung der CO_2 -Konzentration, durch Kombination solcher auf Beobachtungen basierenden Studien mit Modellstudien in Zukunft besser verstanden werden.

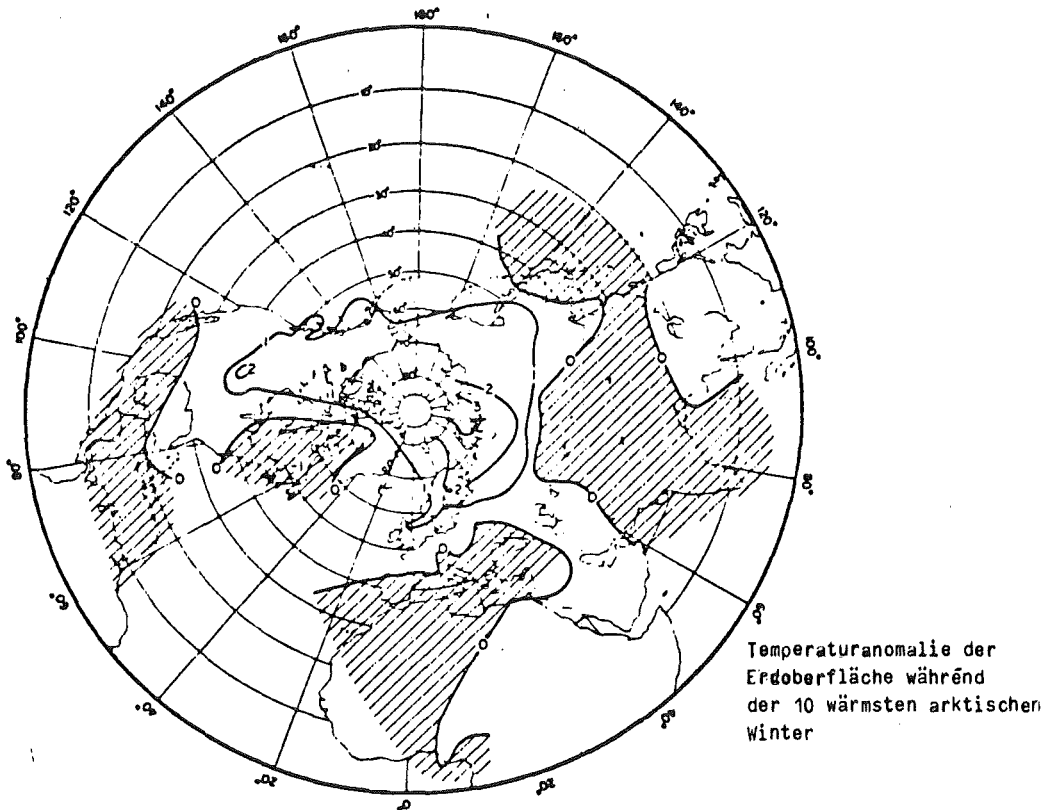


Abb. 15: Unterschiede in der Oberflächentemperatur zwischen dem Mittel der zehn wärmsten arktischen Winter und dem langjährigen Mittel der übrigen Winter im Zeitraum von 1900 bis 1969. Die schraffierten Flächen bezeichnen die negativen Anomalien.

Quelle: Williams (1980)

7.9 Auswirkungen der Zunahme der CO₂-Konzentration auf die Schnee- und Eisbedeckung

Eine der Klimakomponenten, die von der durch die CO₂-Zunahme ausgelösten Veränderung besonders stark beeinflußt werden könnte, ist die Bedeckung der Erdoberfläche mit Eis und Schnee. Barry (1978) hat betont, daß verschiedene Formen von Eis und Schnee jeweils anders auf eine Erwärmung reagieren. In den mittleren und niedrigen Breiten würde die Erwärmung beispielsweise die Häufigkeit des Schneefalls verringern (Regen wird häufiger) und die Dauer der Schneebedeckung des Bodens verkürzen. In höheren Breiten, wo der Schneefall durch den niedrigen Dampfgehalt der Luft infolge der niedrigen Temperaturen begrenzt ist, würde eine Erwärmung zu stärkerem Schneefall führen, die Dauer der Schneebedeckung aber wahrscheinlich wenig beeinflussen.

Die Auswirkungen einer Erwärmung auf das Grönland-Eis und in der Antarktis sind wahrscheinlich komplex und erstrecken sich über einen viel längeren als den für Schnee und Packeis betrachteten Zeitraum. Das Abschmelzen der Eisschollen würde zu einer Erhöhung des Meeresspiegels in der ganzen Welt führen, aber es wird allgemein angenommen, daß dieser Vorgang in einem mehrere Jahrhunderte bis Jahrtausende umfassenden Zeitraum stattfindet. Eine mögliche Ausnahme ist die Eisscholle der westlichen Antarktis. Hughes (1975) meint, diese Eisscholle sei instabil, und Mercer (1978) sieht eine Erwärmung in Zusammenhang mit dem CO₂ der Atmosphäre als mögliche Ursache eines künftigen Gletscherrückgangs. Hollin (1970) postuliert, daß ein starkes Auseinanderfließen der Eisbedeckung der westlichen Antarktis zu einer Erhöhung des Meeresspiegels um 10 bis 30 m in weniger als 100 Jahren führen würde. Barry (1978) hat jedoch darauf hingewiesen, daß die Oberflächenerwärmung bis an den Grund einer mehrere Meter dicken Eisscholle äußerst langsam fortschreitet und daß eine direkte Reaktion des Eises auf das wärmere Klima mit großer Verzögerung eintreten dürfte.

Eine wichtige, aber kontroverse Frage ist die Möglichkeit eines vollständigen Verschwindens des arktischen Packeises. Budyko (1969) weist darauf hin, daß eine Temperaturerhöhung um 4 K im Sommer relativ schnell zur Eisfreiheit des Nordpolmeeres führen könnte, und es gibt Beweise dafür, (z.B.

SMIC, 1971), daß dieser Vorgang irreversibel wäre, auch dann, wenn die Temperatur wieder auf die heutigen Werte zurückginge. Ein Verschwinden des Eises im Nordpolmeer könnte von größerer Bedeutung für das Klima sein, und zwar nicht nur für die Arktis, sondern auch für mittlere und niedere Breitengrade (Barry, 1978).

Es ist ohne Zweifel notwendig, die Eis- und Schneebedeckung als gekoppelte Komponente in die Klimamodelle einzubeziehen und die Modelle zu benutzen, um die Auswirkungen einer Verdoppelung des CO_2 -Gehalts auf das Gesamtsystem zu untersuchen. Erste Bemühungen zur Erstellung von Modellen dieser Art wurden von Parkinson und Kellogg (1979) und Manabe und Stouffer (1979) unternommen.

8. Die Auswirkungen anderer bei der Kohleumwandlung entstehender Produkte

Neben dem in die Atmosphäre abgegebenen Kohlendioxid werden durch Verbrennung fossiler Brennstoffe Abwärme, sonstige Gase und Partikel in die Atmosphäre emittiert. Auch sie können eine Auswirkung auf das Klima haben und die CO₂-bedingten Auswirkungen erhöhen bzw. ausgleichen. Die Abwärme aus Kraftwerken hat schon sichtbare, lokale Folgen (z.B. stärkere Bewölkung), und auch die lokalen und regionalen Folgen der Freisetzung von Abwärme aus Städten wurden festgestellt (z.B. Bhumralkar und Williams, 1980). Große Mengen von Abwärme könnten globale Auswirkungen auf das Klima haben (z.B. Williams et al., 1979).

Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe werden Makroteilchen direkt an die Atmosphäre abgegeben während sich gleichzeitig auch kleinere Partikel und Tröpfchen aus den gasförmigen Verbrennungsprodukten bilden. Die Auswirkungen der Aerosole auf die Strahlungsbilanz zwischen Erde und Atmosphäre sind äußerst komplex und von vielen Charakteristika der Aerosole und dem lokalen Auftreten der Aerosole abhängig.

Die Effekte von Teilchen oder Aerosolen auf die Strahlungsbilanz zwischen Atmosphäre und Erde hängen von einer Reihe von Faktoren ab, die von Munn und Machta (1979) aufgelistet wurden:

- die Größenverteilung von Teilchen
- die Form der Teilchen
- die Eigenschaften der Teilchen bezüglich Streuung, Reflexion und Strahlung
- die vertikale Verteilung der Teilchen
- die relative Feuchtigkeit
- die zeitliche Veränderung der obigen Faktoren.

Eine Zunahme des Aerosolgehaltes der Atmosphäre kann die folgenden Konsequenzen haben:

- Die Menge der in den Raum zurückgestreuten Solarstrahlung ändert sich.

- Mehr Solarstrahlung wird in der Atmosphäre absorbiert und weniger Strahlung erreicht die Erdoberfläche.
- Das Verhältnis von diffuser zu direkter Solarstrahlung nimmt zu. Es wurde experimentell gezeigt, daß dies zu einer Zunahme der Oberflächenalbedo und deshalb zu einer Abkühlung der Erdoberfläche führt.

Der Nettoeffekt von Aerosolen auf die Strahlungsbilanz zwischen Erde und Atmosphäre ist sehr schwierig abzuschätzen. Eiden (1979) hat zum Beispiel gezeigt, daß die Menge der gestreuten und absorbierten Strahlung von der Albedo der darunter liegenden Oberfläche und den Absorptionseigenschaften der Aerosole abhängt. Zusätzliche absorbierende Teilchen hätten eine Umverteilung der durch den Planeten absorbierten Sonnenenergie zur Folge, wobei die Atmosphäre mehr und die Erdoberfläche weniger absorbieren würde. Dabei ist natürlich unterstellt, daß sich Wolkenbedeckung und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre nicht ändern. Die Konsequenzen der Umverteilung der Absorption der Sonnenenergie sind noch unklar. Es wird jedoch erwartet, daß die Änderung des vertikalen Temperaturgradienten dynamische Effekte auslöst. Eiden (1979) hat ebenfalls darauf hingewiesen, daß eine Zunahme des Partikelgehaltes je nach geographischer Breite unterschiedliche Auswirkungen hat.

Grassl (1979) hat den Einfluß von Aerosolen auf die Gesamtalbedo von Erde und Atmosphäre in wolkenfreien und bewölkten Gebieten diskutiert. Er findet, daß eine Zunahme der Partikelzahl bei dünnen Wolken zu einer Zunahme der Wolkenalbedo und bei dicken Wolken zu einer Abnahme führt. Grassl folgert jedoch, daß eine Abschätzung der Veränderung der gesamten planetaren Albedo durch Zunahme des Partikelgehaltes zur Zeit nicht möglich ist. Als Gründe führt er den Datenmangel für den Brechungsindex von Aerosolen und die mittlere optische Dicke von Wolken an.

Obwohl viele theoretische Studien durchgeführt wurden, die darauf hindeuten, daß durch Aerosole verursachte Änderungen der planetarischen Albedo einen bedeutenden Einfluß auf das Klima haben könnten, gibt es kaum Beobachtungen, in denen eine Albedoveränderung durch tatsächlich vorhandene Aerosol-Schichten nachgewiesen werden konnte. Russell et al. (1979) berichten zum Beispiel von einem Fall, in dem die Gesamtalbedo von Erde und Atmo-

sphäre sich änderte und die Veränderung in einer Messung erfaßt werden konnte. Verursacht durch eine vorübergehend auftretende Aerosol-Schicht erhöhte sich die Albedo um etwa 0,01 (von 0,11 auf 0,12). Bei der Messung, die in San Francisco gemacht wurde, waren die Meßinstrumente in drei verschiedenen Höhen an einem Fernsehturm angebracht worden. Die Albedoänderung trat für etwa eine Stunde auf. Russell et al. heben hervor, daß das Ereignis sehr kurzlebig und in seiner Flächenausdehnung unbekannt war, so daß praktisch keine Schlußfolgerung hinsichtlich der Bedeutung für das Klima möglich ist. Die Analyse ist jedoch unter methodischen Gesichtspunkten nützlich. Die Autoren bemerken, daß Aerosol-Schichten mit einer optischen Dicke, wie sie in diesem Fall beobachtet wurde, in dicht bevölkerten Regionen der Erde ziemlich häufig vorkommen.

Frühere Studien führten zu dem Ergebnis, daß eine Erhöhung des Aerosolgehaltes die Rückstreuung der Solarstrahlung in den Raum vergrößern und zu einer Netto-Abkühlung des Systems führen würde. Kellogg (1977) weist andererseits auf Beweise dafür hin, daß die meisten anthropogenen Aerosole über dem Land auftreten, wo sie die Gesamtalbedo reduzieren und daher zu einer Systemerwärmung führen. Wie im Falle der durch CO₂ induzierten Klimaveränderungen, werden die regionalen Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation stärker spürbar sein, als die globalen Temperaturveränderungen.

Charlock und Sellers (1980b) zeigen, daß Strahlungs-Konvektions-Modelle dazu verwendet werden können, die Strahlungswechselwirkungen von Aerosolen, Wolken, Gasen und der Erdoberfläche zu untersuchen. Sie betonen jedoch, daß bei Anwendung der Modelle in der global und jährlich gemittelten Form die Modelle nicht imstande sind, den Effekt von Aerosolen auf die Oberflächentemperatur einer bestimmten Region in einer bestimmten Jahreszeit zu beschreiben. Charlock und Sellers (1980b) verwendeten ein eindimensionales Strahlungs-Konvektions-Modell, dem Wärmequellen und -senken hinzugefügt wurden, zur Beschreibung der Wärmespeicherung in der Erdoberfläche und der Atmosphäre sowie zur Beschreibung dynamischer Vorgänge im Ozean. Dieses Modell erlaubt die Berechnung der Auswirkungen von Aerosolen für ausgewählte Breitengradbänder und auf monatlicher Basis. Die Ergebnisse von Charlock und Sellers zeigen, daß, wenn einer Atmosphäre ohne Aero-

sole der heute beobachtete Aerosol-Gehalt hinzugefügt wird, sich die global gemittelte Oberflächentemperatur um 1,5 K reduziert. Kellogg (1981) hat vor kurzem jedoch das Argument vorgebracht, daß diese Ergebnisse irreführend wären, weil die Annahmen über die optischen Eigenschaften von Aerosolen nicht korrekt gewesen seien.

Zusätzlich zur Wechselwirkung mit dem Strahlungsfeld können Partikel Keime für die Kondensation und Eisbildung darstellen. Dabei spielen Partikel, die bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe gebildet werden, bei der Abfallverbrennung und beim Betrieb von Autos eine besondere Rolle. Durch Partikel wird die Bildung von Wassertröpfchen in Gang gesetzt oder das Gefrieren von Wassertröpfchen beschleunigt, wenn die Temperatur unter 0°C ist. Besonders die Teilchen, die am häufigsten bei der Verbrennung von Öl oder Kohle entstehen (Sulfate), sind wirksame Kondensationskeime.

Es konnte nachgewiesen werden, daß die Niederschlagsmenge über Städten bzw. auf der Leeseite von Städten größer ist, als im benachbarten ländlichen Gebiet. Die Zunahme kann jedoch nicht allein auf den höheren Gehalt der Atmosphäre an Kondensationskeimen zurückgeführt werden, denn auch die stärkeren Konvektionsvorgänge über städtischen Gebieten können zur Verstärkung der Niederschlagstätigkeit beitragen. Schaeffer (1975) untersuchte Messungen von Partikelkonzentrationen in stadtnahen Gebieten. Die beobachteten Effekte deuten darauf hin, daß die Luftverunreinigung durch Partikel sowohl die Wolkenverteilung über großen Gebieten der Erde als auch die Verteilung und Art von Niederschlägen modifiziert.

Twomey (1972) und Liou (1976) diskutieren als weitere Möglichkeit der Wechselwirkung von Partikeln und Wolken den Effekt, daß durch Hinzufügung von Partikeln die Reflexion von Wolken um 10 - 20 % reduziert wird. Charlack und Sellers (1980a) verwendeten ein eindimensionales Strahlung-Konvektions-Modell, um die Bedeutung von Veränderungen der Aerosolkonzentration für die Eigenschaften von Wolken und die Oberflächentemperatur zu untersuchen. Sie fanden, daß eine Verdoppelung der Aerosolkonzentration die globale Albedo für niedrige Wolken um etwa 0,045 vergrößert und die Oberflächentemperatur um 0,9 K reduziert. Es stellte sich außerdem heraus, daß bei Verdoppelung der Aerosolkonzentration und wolkenfreier Atmosphäre das Modell eine Verringerung der Oberflächentemperatur um 1,3 K berechnet.

Kellogg (1980) stellte vor kurzem den Einfluß anthropogener Aerosole auf die Strahlungsbilanz der unteren Atmosphäre in einem Übersichtsartikel dar. Demnach verbleiben Partikel gewöhnlich für 5 Tage in der Atmosphäre, wobei sie 1000 bis 2000 km abdriften können, bevor sie den Boden erreichen. Die Partikel sind hauptsächlich im Entstehungsgebiet und leeseitig des Entstehungsgebietes und daher über dem Festland zu finden. Global gesehen wird nur ein kleiner Teil der Erde beeinflusst. Kellogg folgert, daß anthropogene Aerosole kaum einen wesentlichen Einfluß auf die Strahlungsbilanz der Erde als Ganzes haben können. Aerosole verursachen in ihrem Entstehungsgebiet und in dessen Nähe wahrscheinlich eine Erwärmung der unteren Atmosphäre. Das heißt, das Klima kann regional beeinflusst werden. Schließlich folgert Kellogg, daß Aerosole über dem Ozean in wolkenfreien Gebieten eine kleine Abkühlung, in bewölkten Gebieten aber ebenfalls eine Erwärmung verursachen. Kellogg hebt hervor, daß der Einfluß von Aerosolen auf die Stabilität der unteren Atmosphäre im oder in der Nähe des Erzeugungsgebietes, d.h. regional, von größerer Bedeutung ist als der Einfluß auf die globale Wärmebilanz.

Darüberhinaus führen die durch Partikel veränderten Erwärmungsraten zu anderen, horizontalen und vertikalen Temperaturgradienten und sich daraus ergebenden dynamischen Effekten. Alle dynamischen und thermodynamischen Wechselwirkungen können letztlich nur mit Hilfe von Klimamodellen ermittelt werden, die genügend Einzelheiten beinhalten.

Ein weiteres Gas, daß durch Verbrennung fossiler Brennstoffe an die Atmosphäre abgegeben wird, ist Schwefeldioxid. Dieses Gas hat bereits örtlich als Bestandteil der verschmutzten Atmosphäre eine Auswirkung auf das lokale Klima. Georgii (1979) schätzt, daß bei Außerachtlassung des in der Gischt des Meeres befindlichen Sulfats 60 % des Schwefels in der Atmosphäre anthropogen sind. Bolin und Charlson (1976) berechneten, daß die Streuung der Strahlung durch Sulfataerosole, über die nördliche Hemisphäre verteilt, zu einer Abkühlung von 0,03 - 0,06 K führt. Ausführlichere Untersuchungen sind jedoch erforderlich, in denen Faktoren, wie z.B. Infrarotstrahlung, Bewölkung und Strahlungsabsorption durch sulfathaltige Partikel berücksichtigt werden.

Hahn (1979) berechnete, daß der Treibhauseffekt als Folge der N_2O -Zunahme in der Atmosphäre durch Verwendung von Düngemitteln und Verbrennung fossiler Brennstoffe bis zum Jahre 2000 etwa 40 - 50 % des Effekts ausmachen dürfte, der auf den höheren CO_2 -Gehalt zurückzuführen ist, während er bis zum Jahre 2050 bei etwa 20 - 30 % liegen dürfte. Die durch Verwendung von Düngemitteln und Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehenden Gase N_2O , CH_4 und NH_3 haben nachweislich Auswirkungen auf das Klima, die jedoch geringer sind als die für CO_2 und Wasserdampf berechneten.

Es bestehen noch viele Unklarheiten bezüglich der Auswirkungen der außer CO_2 bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehenden Produkte. Es ist jedoch wenig wahrscheinlich, daß sie die Auswirkungen, die das CO_2 auf das Klima hat, völlig kompensieren.

Literatur:

- ARMENTANO, T.V., and HETT, J. (Eds.), 1980: The role of temperate zone forests in the world carbon cycle - Problem definition and research needs. CONF - 7903105 UC-11, U.S. Department of Energy, Washington D.C.
- AUSUBEL, J.H., 1980: Climatic change and the carbon wealth of nations. WP-80-75. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- AUGUSTSSON, T., and RAMANATHAN, V., 1977: A radiative-convective model study of the CO₂ climate problem. J. Atmos. Sci., 34, 448-451.
- BACASTOW, R.B., 1976: Modulation of atmospheric carbon dioxide by the southern oscillation. Nature, 261, 116.
- BACASTOW, R.B., and KEELING, C.D., 1973: Atmospheric carbon dioxide and radiocarbon in the natural carbon cycle: II. Changes from A.D. 1700 to 2070 as deduced from a geochemical model. In, G.W. Woodwell and E.V. Pecan (Eds.), Carbon and the Biosphere, USAEC, Springfield, Virginia.
- BACASTOW, R.B., and KEELING, C.D., 1979: Models to predict future atmospheric CO₂ concentrations. In, W.P. Elliot and L. Machta (Eds.), Workshop on the Global Effects of Carbon Dioxide from Fossil Fuels. CONF-770385 UC-11, U.S. Department of Energy, Washington D.C.
- BACH, W., PANKRATH, J., KELLOGG, W.W. (Eds.), 1979: Man's Impact on Climate. Elsevier, Amsterdam.
- BAES, C.F., GOELLER, H.E., OLSON, J.S., and ROTT, R.M., 1976: The global carbon dioxide problem. ORNL-5194, Oak Ridge National Laboratory.
- BARRY, R.G., 1978: Cryospheric responses to a global temperature increase. In, J. Williams (Ed.), Carbon Dioxide, Climate and Society, Pergamon Press, Oxford.
- BAUMGARTNER, A., 1979: Climate variability and forestry. Proceedings of the World Climate Conference, WMO Publication No. 537, World Meteorological Organisation, Geneva.

- BHUMRALKAR, C.M., and WILLIAMS, J., 1980: Atmospheric Effects of Waste Heat Discharge. Marcel Dekker, New York (to be published).
- BOHN, H.L., 1978: On organic soil carbon and CO₂. Tellus, 30, 472-475.
- BOLIN, B., 1979: Global ecology and man. Proceedings of the World Climate Conference, WMO Publication No. 537, World Meteorological Organisation, Geneva.
- BOLIN, B., DEGENS, E.T., DUVIGNEAUD, P., and KEMPE, S., 1979: The global biochemical carbon cycle. In, B. Bolin et al. (Eds.) The Global Carbon Cycle, Wiley, New York.
- BOLIN, B., and CHARLSON, R.J., 1976: On the role of the tropospheric sulfur cycle in the shortwave climate of the earth. Ambio, 5, 47-54.
- BROECKER, W.S., 1977: The fate of fossil fuel CO₂: A research strategy. In, Report of the Scientific Workshop on Atmospheric Carbon Dioxide, WMO No. 474, World Meteorological Organisation, Geneva.
- BROECKER, W.S., TAKAHASHI, T., SIMPSON, H.J., and PENG, T.-H., 1979: Fate of fossil fuel carbon dioxide and the global carbon budget. Science, 206, 409-418.
- BROECKER, W.S., PENG, T.-H., and ENGH, R., 1980: Modeling the carbon system. CONF-8004110, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.
- BUDYKO, M.I., 1969: The effect of solar radiation variations on the climate of the earth. Tellus, 21, 611-619.
- CHARLOCK, T.P., and SELLERS, W.D., 1980a: Aerosol, cloud reflectivity and climate. J. Atmos. Sci., 37, 1136-1137.
- CHARLOCK, T.P., and SELLERS, W.D., 1980b: Aerosol effects on climate: Calculations with time-dependent and steady-state radiative-convective models. J. Atmos. Sci., 37, 1327-1341.
- DETWILER, R.P., and HALL, C.A.S., 1980: The development of an empirically-driven simulation model of carbon exchange between human-impacted tropical ecosystems and the atmosphere. CONF-800350, U.S. Department of Energy, Washington D.C.

- EIDEN, R., 1979: Possible changes of planetary albedo due to aerosol particles. In, W. Bach et al. (Eds.), *Man's Impact on Climate*, Elsevier, Amsterdam.
- ELLIOT, W.P., and MACHTA, L. (Eds.), 1979: *Workshop on the Global Effects of Carbon Dioxide from Fossil Fuels*. CONF-770385 UC-11, U.S. Department of Energy, Washington D.C.
- FLOHN, H., 1980: Possible climatic consequences of a man-made global warming. RR-80-30, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- GATES, M.S., and COOK, K.H., 1979: Preliminary analysis of Experiments on the climatic effects of increased CO₂ with the OSU atmospheric general circulation model. Climatic Research Institute, Oregon State University, Corvallis.
- GEORGII, H.-W., 1979: Large scale distribution of gaseous and particulate sulfur compounds and its impact on climate. In, W. Bach et al. (Eds.), *Man's Impact on Climate*, Elsevier, Amsterdam.
- GRASSL, H., 1979: Possible changes of planetary albedo due to aerosol particles. In, W. Bach et al. (Eds.), *Man's Impact on Climate*, Elsevier, Amsterdam.
- GRASSL, H., 1981: The climate at maximum entropy production by meridional atmospheric and oceanic heat fluxes. Q.J. Roy. Meteor. Soc., 107, 153-166.
- HAHN, J., 1979: Man-made perturbation of the nitrogen cycle and its possible impact on climate. In, W. Bach et al., (Eds.) *Man's Impact on Climate*, Elsevier, Amsterdam.
- HAMPICKE, U., 1979: Sources and sinks of carbon dioxide in terrestrial ecosystems. Submitted to *Environment International*.
- HASSELMAN, K., 1979: On the problem of multiple time scales in climate modeling. In, W. Bach et al. (Eds.), *Man's Impact on Climate*, Elsevier, Amsterdam.
- HOLLIN, J.T., 1970: Interglacial climates and Antarctic ice surges. Quat. Res., 2, 401-408.

- HUGHES, T., The West Antarctic ice sheet: Instability, disintegration and initiation of ice ages. Rev. Geophys. Space Phys., 13, 502-526.
- HUNT, B.G., and WELLS, N.C., 1979: An assessment of the possible future climatic impact of carbon dioxide increases based on a coupled one-dimensional atmospheric-oceanic model. J. Geophys. Res., 84, 787-791.
- IIASA, 1981: Energy in a finite world. Report by the Energy System Program Group of the International Institute for Applied Systems Analysis. Ballinger, Cambridge, Massachusetts.
- KEELING, C.D., 1973: The carbon dioxide cycle: Reservoir models to depict the exchange of atmospheric carbon dioxide with the oceans and land plants. In, S.I. Rasool (Ed.), Chemistry of the Lower Atmosphere, Plenum Press, New York.
- KEELING, C.D., and BACASTOW, R.B., 1977: Impact of industrial gases on climate. In, Energy and Climate, National Academy of Sciences, Washington D.C.
- KEELING, C.D., BACASTOW, R.B., BAINBRIDGE, A.E., EKDAHL, C.A., GUENTHER, P.R., and WATERMAN, L.S., 1976: Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Tellus, 28, 538-551.
- KELLOGG, W.W., 1977: Effects of human activities on global climate. Tech. Note No. 156, World Meteorological Organisation, Geneva.
- KELLOGG, W.W., 1978: Global influences of mankind on the climate. In, J. Gribbin (Ed.), Climatic Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- KELLOGG, W.W., 1980: Aerosols and climate. In, W. Bach et al. (Eds.), Interactions of Energy and Climate. D. Reidel, Dordrecht, Holland.
- KELLOGG, W.W., 1981: Comments on "Aerosol, cloud reflectivity and climate", J. Atmos. Sci., 38, 664-665.
- LIAN, M.S., 1978: Energy balance climate models and climate sensitivity. Ph. D. Thesis, State University of New York, Stony Brook.
- LIAN, M.S., and CESS, R.D., 1977: Energy balance climate models: A reappraisal of ice-albedo feedback. J. Atmos. Sci., 34, 1058-1062.

- LIU, K.-N., 1976: On the absorption, reflection, and transmission of solar radiation in cloudy atmospheres. J. Atmos. Sci., 33, 798-805.
- MACHTA, L., 1973: Prediction of CO₂ in the atmosphere. In, G.M. Woodwell and E.V. Pecan (Eds.), Carbon and the Biosphere, USAEC, Springfield, Virginia.
- MACHTA, L., 1979: Atmospheric measurements of carbon dioxide. In, W.P. Elliot and L. Machta (Eds.), Workshop on the Global Effects of Carbon Dioxide from Fossil Fuels. CONF-77 0385 UC-IT, U.S. Department of Energy, Washington D.C..
- MACHTA, L., and ELLIOT, W.P., 1980: Carbon cycle research. Carbon Dioxide Research Progress Report, DOE-EV-0071, U.S. Department of Energy, Washington D.C.
- MANABE, S., and MÖLLER, F., 1961: On the radiate equilibrium and heat balance of the atmosphere. Mon. Wea. Rev., 89, 503-532.
- MANABE, S., and WETHERALD, R.T., 1975: The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. J. Atmos. Sci., 32, 3-15.
- MANABE, S., and STOUFFER, R.J., 1979: A CO₂ climate sensitivity study with a mathematical model of the global climate. Nature, 282, 491-493.
- MacCRACKEN, M.C., and LUTHER, F.M., 1974: Climate studies using a zonal atmospheric model. In, W.L. Godson (Ed.), Proceedings of the International Conference on Structure, Composition and General Circulation of the Upper and Lower Atmosphere and Possible Anthropogenic Perturbations. Atmospheric Environment Service, Ontario, Canada.
- MERCER, J.H., 1968: Antarctic sea-level and Sangamon sea-level. Int. Assoc. Sci. Hydrol., 74, 217-225.
- MITCHELL, J.F.B., 1979: Preliminary report on the numerical study of the effect on climate of increasing atmospheric carbon dioxide. Met. O.20. Technical Note No. II/137, Meteorological Office, Bracknell.
- MITCHELL, J.M., 1979: Some considerations of climate variability in the context of future CO₂ effects on global-scale climate. In, W.P. Elliot and L. Machta (Eds.), Workshop on the Global Effects of Carbon Dioxide from Fossil Fuels. CONF-770385 UC-11, U.S. Department of Energy, Washington D.C.

- MUNN, R.E., and MACHTA, L., 1979: Human activities that affect climate. Proc. of the World Climate Conference, WMO Publication No. 537, World Meteorological Organisation, Geneva.
- NAS, 1977: Energy and Climate. National Academy of Sciences, Washington D.C.
- NAS, 1979: Carbon dioxide and climate: A scientific assessment. National Academy of Sciences, Washington D.C.
- NIEHAUS, F., and WILLIAMS, J., 1979: Studies of different energy strategies in terms of their effects on the atmospheric CO₂ concentration. J. Geophys. Res., 84, 3123-3129.
- OESCHGER, H., SIEGENTHALER, U., SCHOTTERER, U., and GUGELMAN, A., 1976: A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. Tellus, 27, 168-192.
- OHRING, G., and ADLER, S., 1978: Some experiments with a zonally-averaged climate model. J. Atmos. Sci., 35, 186-205.
- OORT, A.H., and VON DER HAAR, T.H., 1976: On the observed annual cycle in the ocean-atmosphere heat balance over the northern hemisphere. J. Phys. Oceanog., 6, 781-800.
- PALTRIDGE, G.W., 1975: Global dynamics and climate - a system of minimum entropy exchange. Q.J. Roy. Meteor. Soc., 101, 475-484.
- PARKINSON, C.L., and KELLOGG, W.W., 1979: Arctic sea ice decay simulated for a CO₂-induced temperature rise. Climatic Change, 2, 149-162.
- POTTER, G.L., ELLSAESSER, H.W., MacCRACKEN, M.C., and LUTHER, F.M., 1979: Performance of the Lawrence Livermore Laboratory Zonal Atmospheric Model. In, Report of the JOC Study Conference on Climate Models: Performance, Intercomparison and Sensivity Studies. WMO, Geneva.
- RAMANATHAN, V., LIAN, M.S., and CESS, R.D., 1979: Increased atmospheric CO₂: zonal and seasonal estimates of the effect on the radiation balance and surface temperature. J. Geophys. Res., 84, 4949-4958.
- RAMANATHAN, V., and MADDEN, R.A., 1980: Detecting climatic change due to increasing CO₂ in the atmosphere. Submitted to Science.

- ROTTY, R.M., 1973: Commentary on and extension of calculative procedure for CO₂ production. Tellus, 25, 508-517.
- ROTTY, R.M., 1977: Global carbon dioxide production from fossil and cement, A.D. 1950-A.D. 2000. In, N.R. Anderson and A. Malahoff (Eds.), The Fate of Fossil Fuel CO₂ in the Ocean. Plenum Press, New York.
- ROTTY, R.M., 1978: The atmospheric CO₂ consequences of heavy dependence on coal. In, J. Williams (Ed.), Carbon Dioxide, Climate and Society, Pergamon Press, Oxford.
- ROTTY, R.M., 1979: Energy demand and global climate change. In, W. Bach et al. (Eds.), Man's Impact on Climate, Elsevier, Amsterdam.
- ROTTY, R.M., 1979: Unpublished notes.
- ROTTY, R.M., and MARLAND, G., 1980: Constraints on fossil fuel use. In, W. Bach et al. (Eds.), Interactions of Energy and Climate. D. Reidel, Dordrecht, Holland.
- RUSSELL, P.B., LIVINGSTON, J.M., and UTHE, E.E., 1979: Aerosol-induced albedo change: Measurement and modeling of an incident. J. Atmos. Sci., 36, 1587-1608.
- SCHAEFFER, V.J., 1975: The inadvertent modification of the atmosphere by air pollution. In, S.F. Singer (Ed.), The Changing Global Environment. D. Reidel, Dordrecht, Holland.
- SCHLESINGER, W.H., 1977: Carbon balance in terrestrial detritus. Ann. Rev. Ecol. Syst., 8, 51-81.
- SCHNEIDER, S.H., 1975: On the carbon dioxide-climate confusion. J. Atmos. Sci., 32, 2060-2066.
- SCHNEIDER, S.H., and THOMPSON, S.L., 1980: Atmospheric CO₂ and climate: Impact of the transient response. Submitted to the J. Geophys. Res.
- SEILER, W., and CRUTZEN, P.J., 1980: Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. Climatic Change, 2, 207-247.

- SELLERS, W.D., 1973: A new global climate model. J. Appl. Meteor., 12, 241-254.
- SELLERS, W.D., 1974: A reassessment of the effect of CO₂ variations on a simple global climate model. J. Appl. Meteor., 13, 831-833.
- SIEGENTHALER, U., and OESCHGER, H., 1978: Predicting future atmospheric CO₂ levels. Science, 199, 388-395.
- SLADE, D.H., 1979: Summary of the carbon dioxide effects research and assessment program. U.S. Department of Energy, Washington D.C.
- SMAGORINSKY, J., 1977: Modeling and predictability. In, Energy and Climate. National Academy of Sciences, Washington, D.C..
- SMIC, 1971: Inadvertent climate modification. Report of the study of man's impact on climate. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- THOMPSON, S.L., and SCHNEIDER, S.H., 1979: A seasonal zonal energy balance climate model with an interactive lower layer. J. Geophys. Res., 84, 2401-2414.
- TWOMEY, S., 1972: The effect of cloud scattering on the absorption of solar radiation by atmospheric dust. J. Atmos. Sci., 29, 1156-1159.
- WASHINGTON, W.M., and RAMANATHAN, V., 1980: Climatic response due to increased CO₂: Status of model experiments and the possible role of the oceans. Carbon Dioxide and Climate Research Program Progress and Planning Meeting, April 1980, U.S. Department of Energy, Washington D.C.
- WIGLEY, T.M.L., JONES, P.D., and KELLY, P.M., 1980: Scenario for a warm high-CO₂ world. Nature, 283, 17-21.
- WILLIAMS, J. (Ed.), 1978: Carbon Dioxide, Climate and Society. Pergamon Press, Oxford.
- WILLIAMS, J., KRÖMER, G., and GILCHRIST, A., 1979: The impact of waste heat release on climate: Experiments with a general circulation model. J. Appl. Meteor., 18, 1501-1511.

WILLIAMS, J., 1980: Anomalies in temperature and rainfall as a guide to the formulation of climate scenarios. Climatic Change, 2, 249-266.

WOODWELL, G.M., 1978: The global carbon dioxide question. Sci. Amer, 238, 34-43.

WOODWELL, G.M., WHITTAKER, R.H., RAINERS, W.A., LIKENS, G.E., DELWICHE, C.C., and BOTKIN, C.B., 1978: The biota and the world carbon budget. Science, 199, 141-146.

ZIMEN, K.E., 1979: The carbon cycle, the missing sink, and future CO₂ levels in the atmosphere. In, W. Bach et al., Man's Impact on Climate, Elsevier, Amsterdam.