

KfK 3527
Januar 1985

Folgen eines verstärkten Kohleeinsatzes in der Bundesrepublik Deutschland

Studienleiter: R. Coenen
Abteilung für Angewandte Systemanalyse

Teilbericht:
Potentielle Klimaauswirkungen
durch den Einsatz fossiler
Energieträger

Autoren:
J. Jäger, G. Halbritter, Ch. Kupsch

Kernforschungszentrum Karlsruhe

K E R N F O R S C H U N G S Z E N T R U M K A R L S R U H E

Abteilung für Angewandte Systemanalyse

KfK 3527

FOLGEN EINES VERSTÄRKTEN KOHLEEINSATZES IN DER
BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

Studienleiter: R. Coenen

Teilbericht: Potentielle Klimaauswirkungen
 durch den Einsatz fossiler
 Energieträger

Autoren:

J. Jäger
G. Halbritter
Ch. Kupsch

1. Diese Studie wurde im Auftrag des BMFT erstellt.
2. Die Aufgabenstellung wurde von BMFT vorgegeben.
3. Der BMFT hat das Ergebnis der Studie nicht beeinflusst: Der Auftragnehmer trägt allein die Verantwortung.

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Die Kohlendioxidemissionen aus dem Einsatz fossiler Energieträger werden in einer Reihe neuerer Untersuchungen als Ursache potentieller globaler und regionaler Temperaturerhöhungen genannt. Bei einer Verdopplung der CO_2 -Konzentration auf den Wert von 600 ppm wird eine mittlere globale Temperaturerhöhung zwischen 1,5 und 4,5 K abgeschätzt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Aussagekraft von Rechnungen zum Eintrittszeitpunkt einer Verdopplung der CO_2 -Konzentrationen und zur Steigerung der Temperaturen untersucht.

Die durchgeführten Modellrechnungen zum Kohlenstoffkreislauf zeigen die Bedeutung des sog. biologischen Wachstumsfaktors für das Ergebnis der Rechnungen. So wird bei einem weiteren Wachstum der Biosphäre mit einem Wachstumsfaktor $\beta = 0,1$ - einem Wert, der eine gute Anpassung zwischen Modellrechnungen und beobachteter historischer CO_2 -Konzentrationsentwicklung ergibt - selbst bei einer hohen Zuwachsrate der Kohlenstoffemissionen aus dem Einsatz fossiler Energieträger von 2,5 %/a keine Verdopplung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre bis Mitte des nächsten Jahrhunderts zu erwarten sein. Bei Annahme eines geringeren, tendenziell auf Null absinkenden Wachstums der Biosphäre und eines Wachstums der Kohlenstoffemissionen aus dem Einsatz fossiler Brennstoffe von 2,5 %/a ergeben die Modellrechnungen eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration für den Zeitpunkt Mitte des nächsten Jahrhunderts. Bei Annahme mittlerer und niedriger Zuwachsraten für den Einsatz fossiler Energieträger bzw. der daraus resultierenden Kohlenstoffemissionen wird eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration für den Zeitraum bis Mitte des nächsten Jahrhunderts auch bei geringem Wachstum der Biosphäre nicht erreicht.

Die bisher für die Prognose von Klimaänderungen eingesetzten Klimamodelle sind mit einer Reihe von Mängeln behaftet. Diese Mängel betreffen insbesondere die ungenügende Behandlung von Wolken, Niederschlägen, orographischen Effekten und des Systems Ozean-Atmosphäre. Ein weiterer Mangel der Klimamodellrechnungen besteht darin, daß die zeitliche Entwicklung der Klimaänderungen nur sehr unzureichend prognostiziert werden kann, da die Vernachlässigung bzw. die stark vereinfachte Berücksichtigung der

Wechselwirkungen zwischen verschiedenen klimatischen Faktoren von großem Einfluß auf den zeitlichen Verlauf der prognostizierten Temperaturänderungen sind. Rechnungen mit verschiedenen Modellvarianten ergeben große Unterschiede in den zeitlichen Verzögerungen zwischen erhöhten CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre und Klimaauswirkungen.

Zusammenfassend ist aus den dargestellten Sachverhalten zu schließen, daß im Augenblick sowohl die Aussagen über die Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration aufgrund des Einsatzes fossiler Energieträger als auch die Aussagen über die Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf das Klima mit großen Unsicherheiten behaftet sind und daß politische Schlußfolgerungen, wie sie in neueren Studien der Environmental Protection Agency /EPA 1983/ und der Kernforschungsanlage Jülich /KFA 1983/ gezogen werden, wegen der noch erheblichen Wissenslücken nur schwer begründet werden können. Diese Einschätzung entspricht in etwa den Schlußfolgerungen einer neuen Studie der amerikanischen Akademie der Wissenschaften /CDAC 1983/. Da die potentiellen langfristigen Auswirkungen von Klimaveränderungen jedoch erheblich sein können, stellt eine Intensivierung der Forschung sowohl zum Kohlenstoffkreislauf als auch zu den Klimamodellen eine vordringliche Aufgabe dar.

Potential Impact on the Global Climate from the Use of Fossil Fuels

Summary

The carbon dioxide emissions due to the combustion of fossil fuels are discussed in a number of recent publications as the cause of potential global and regional temperature increases. For a doubling of the CO₂ concentration to 600 ppm, a mean global surface temperature increase of between 1.5 and 4.5 K is estimated. Within the present study the results of calculations of the time of doubling of the CO₂ concentration and of the temperature increase are investigated.

The carbon cycle model calculations carried out within this study show the importance of the so-called biological growth factor for the results of the calculations. A further growth of the biomass with a growth factor $\beta = 0.1$ - a value that gives good agreement between the model results and the observed CO₂ concentrations - gives no doubling of the atmospheric CO₂ concentration by the middle of the next century even when a high rate of increase of the carbon dioxide emissions from fossil fuel combustion of 2.5 % per year is assumed. Assuming a smaller growth of the biomass with a reduction to zero growth and an increase of the carbon dioxide emissions from fossil fuels of 2.5 % per year, the results show a doubling of the atmospheric carbon dioxide concentration at the middle of the next century. Assuming medium and small growth rates for the use of fossil fuels or the resulting CO₂ emissions, a doubling of the atmospheric CO₂-concentration is not reached even when the biomass growth is reduced.

The models that have been used to study potential climatic changes have a number of shortcomings. These include the poor treatment of clouds, precipitation, orographic effects and the coupling of the ocean to the atmosphere. A further deficiency of the climate simulations is that the temporal development of the climatic changes cannot be simulated satisfactorily, since the neglect of or very simplified treatment of the interactions between various climatic factors have a large influence on the temporal development of the simulated temperature changes. Calculations with different model types show large differences in the time lags between increased CO₂-concentration in the atmosphere and climatic effects.

It can be concluded from the material presented here that at present there are many uncertainties regarding both the development of the atmospheric CO₂ concentration as a result of the use of fossil fuels and the effects of increased CO₂-concentrations on the climate and that conclusions regarding energy policy, such as those drawn in the recent studies of the Environmental Protection Agency (EPA, 1983) and the Nuclear Research Center of Jülich (KFA, 1983), are difficult to support in view of the still considerable lack of knowledge. This evaluation is similar to that of a new study published by the U.S. National Academy of Science (CDAC, 1983). Since the potential long-term effects of climatic changes could, however, be considerable, the intensification of research into both the carbon cycle and climate modeling should be given priority.

Vorwort

Die in diesem KfK-Bericht dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen einer für das BMFT durchgeführten Studie über die "Folgen eines verstärkten Kohleeinsatzes in der Bundesrepublik Deutschland" erarbeitet.

In dieser Studie, die die bisher umfassendste Technikfolgenabschätzung in der Bundesrepublik Deutschland darstellt, werden die technischen Möglichkeiten, die ökonomischen Realisierungsbedingungen und Auswirkungen, die Umweltfolgen und die gesellschaftlichen Akzeptanzbedingungen eines verstärkten Steinkohleeinsatzes zur Ölsubstitution analysiert. Betrachtet werden die Möglichkeiten der Ölsubstitution durch Kohlestrom, durch Nutzwärme (Fern- und Prozeßwärme) auf Kohlebasis sowie durch gasförmige und flüssige Kohleveredlungsprodukte.

Aus Platzgründen konnte der zu dieser Studie erstellte Schlußbericht nicht in voller Länge in die Buchpublikation über die Studie - R. Coenen (Hrsg.): "Steinkohle - Technikfolgenabschätzung ihres verstärkten Einsatzes in der Bundesrepublik Deutschland", BMFT-Reihe Risiko- und Sicherheitsforschung, Springer-Verlag Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo, Dezember 1984 - aufgenommen werden, so daß einige Teile herausgenommen werden mußten. Zu diesen Teilen gehört auch der Schlußberichtsteil zu den Analysen über die potentiellen Klimaauswirkungen durch Einsatz fossiler Energieträger, der in diesem KfK-Bericht in stark erweiterter Form veröffentlicht wird. Auch die Teile des Schlußberichtes zu den Umweltfolgen von Abwässern und festen Rückständen aus der Kohlenutzung und -gewinnung und zu den Unfall- und Gesundheitsrisiken im Bergbau werden als KfK-Berichte (KfK 3525 und 3526) getrennt veröffentlicht. Als KfK-Bericht liegt weiterhin die Kurzfassung der Gesamtstudie vor (KfK 3521).

Die Arbeiten zu den potentiellen Klimaauswirkungen durch den Einsatz fossiler Energieträger wurden verantwortlich von Herrn Dr. Halbritter betreut und in Zusammenarbeit mit Frau Dr. Jill Jäger (Meteorologin) im Rahmen eines Unterauftrages durchgeführt; die Modellrechnungen wurden von Frau Kupsch durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis:

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Anthropogene Kohlenstoffemissionen - historische Entwicklung und Annahmen zur zukünftigen Entwicklung	4
3. Der Kohlenstoffkreislauf und seine anthropogene Beeinflussung	7
3.1 Der Kohlenstoffkreislauf	7
3.2 Ergebnisse der Modellrechnungen	10
3.3 Vergleich mit Ergebnissen anderer Untersuchungen	15
4. Potentielle Auswirkungen anthropogener Spurenelement- emissionen auf das Klima	17
4.1 Potentielle Auswirkungen von Kohlendioxidemissionen ...	17
4.2 Potentielle Auswirkungen von sonstigen Spuren- elementemissionen	22
5. Potentielle Folgewirkungen von globalen bzw. regionalen Temperaturerhöhungen	25
6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	27
Literaturverzeichnis	30
 Anhang	
A 1 Die Modellierung des Kohlenstoffkreislaufs	
A 2 Betrachtungen zum Zusammenhang zwischen dem Wachstum der Biomasse und der CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre	

1. Einleitung

Seit 1958 wird die Konzentration des Kohlendioxids (CO_2) in der Atmosphäre durch genaue Messungen ermittelt; es besteht kein Zweifel darüber, daß die Konzentration zunimmt. So stieg die mittlere jährliche CO_2 -Konzentration, gemessen auf dem Mauna Loa, Hawaii, von etwas über 315 ppm im Jahre 1958 auf fast 340 ppm im Jahre 1981 /NAS 1983/ (Abb. 1). In den vergangenen 20 Jahren erhöhte sich die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre um 1-2 ppm CO_2 pro Jahr. Diese Zunahme wird überwiegend der CO_2 -Abgabe an die Atmosphäre durch Verbrennen fossiler Brennstoffe zugeschrieben. Darüber hinaus wird CO_2 auch als Folge des Abholzens von Wäldern, der Neugewinnung von Anbauflächen und der Intensivierung der Landwirtschaft, insbesondere in den Tropen, freigesetzt /Woodwell und Houghton 1977/.

Die Problematik dieses Anstiegs der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre besteht darin, daß das CO_2 gemeinsam mit dem Wasserdampf und anderen Spurengasen den sogenannten "Treibhauseffekt" verursacht. CO_2 absorbiert Sonnenstrahlung nur schwach, die von der Erde ausgesandte Wärmestrahlung jedoch stark. Ein Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre behindert somit die von der Erdoberfläche in Richtung Weltraum gerichtete Wärmestrahlung, während die einfallende Sonnenstrahlung nur wenig geschwächt wird. Bei einer CO_2 -Zunahme und ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen würde sich somit eine Erwärmung der Atmosphäre und der Erdoberfläche ergeben. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, daß die CO_2 -Zunahme sich auch direkt (und zwar positiv) auf das Pflanzenwachstum auswirkt.

Abschätzungen zur Auswirkung einer Steigerung des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre auf rund 600 ppm ergeben einen Temperaturanstieg, der global im Mittel zwischen 1,5 und 4,5 K liegt. Hervorzuheben ist, daß diese Modellrechnungen in nördlichen Breiten eine erheblich ausgeprägtere Temperaturerhöhung prognostizieren als im globalen Mittel. Daneben könnten sich nach diesen Analysen auch die Niederschlagsmengen in verschiedenen Breiten ändern. Eine bedeutende Folge der steigenden Temperaturen könnte eine Verschiebung von Klimazonen sein.

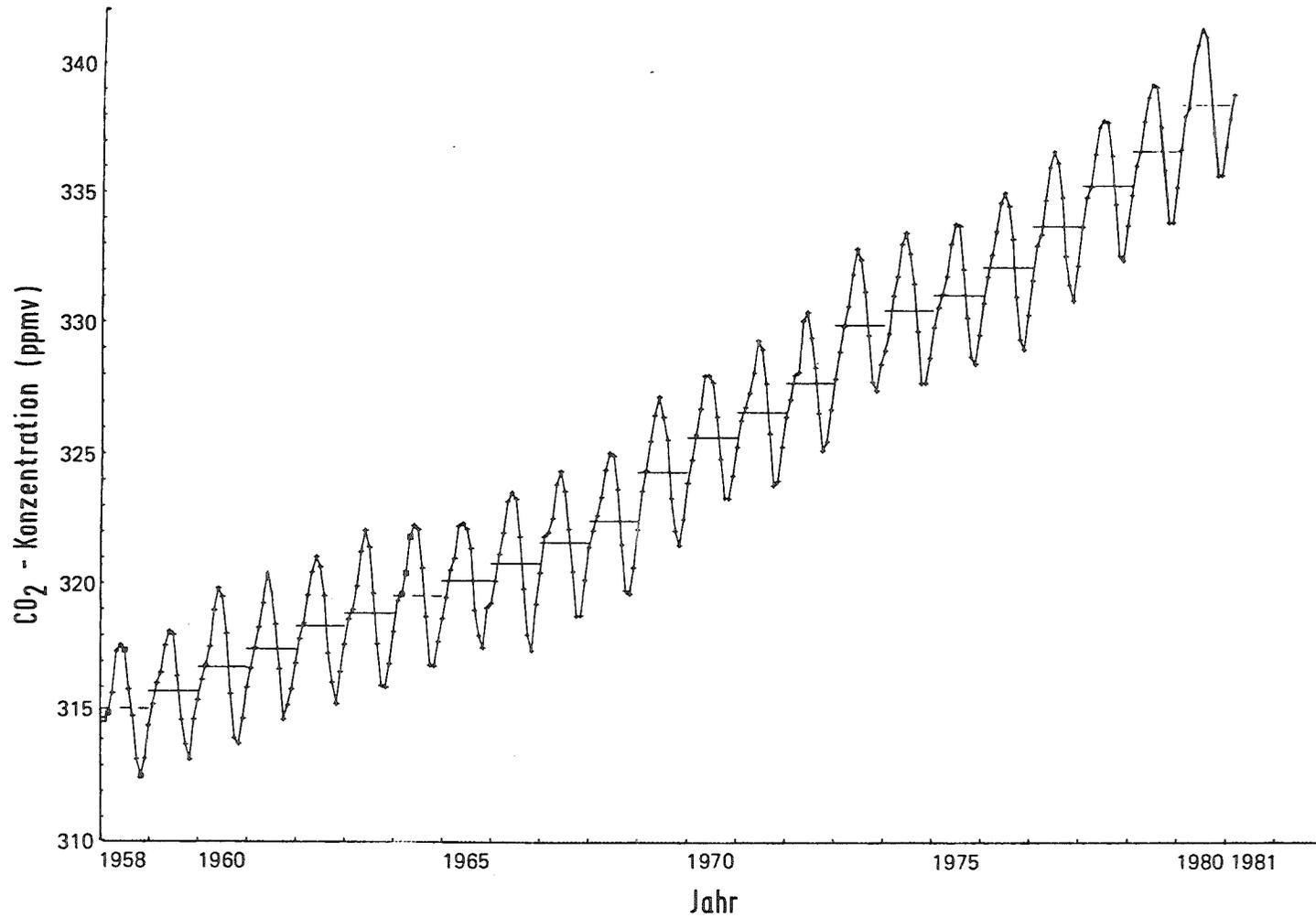


Abb. 1: Mittlere monatliche Konzentrationen des CO₂-Gehalts der Atmosphäre gemessen in Mauna Loa (NAS 1983)

Ob bereits ein Einfluß der erhöhten CO_2 -Konzentrationen der Atmosphäre auf die Temperaturentwicklung stattgefunden hat, läßt sich bis heute nicht feststellen. Die Temperaturen auf der nördlichen Erdhälfte sind zwischen 1880 und 1940 gestiegen. Im Zeitraum von 1940 bis 1970 fand eine Abkühlung statt. In den letzten zehn Jahren gab es große Variationen bei der zeitlichen Temperaturentwicklung. Gegenwärtig wird untersucht, ob eine Erwärmung nachweisbar ist.

Im folgenden werden die Voraussetzungen, unter denen es zu einer Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration kommt, anhand eigener Modellrechnungen näher untersucht. Außerdem wird der Kenntnisstand zu den Auswirkungen einer Erhöhung der CO_2 -Konzentration beschrieben.

2. Anthropogene Kohlenstoffemissionen - historische Entwicklung und Annahmen zur zukünftigen Entwicklung

Die Kohlenstoffemission durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe ist von rund 0,1 Mrd t Kohlenstoff im Jahre 1860 auf rund 5,3 Mrd t Kohlenstoff im Jahre 1980 angestiegen /Rotty 1981/. Die Wachstumsrate der Kohlenstoffemissionen und damit auch die der CO₂-Emissionen über diesen Zeitraum war circa 3,4 % pro Jahr. Im Jahre 1860 entstanden 99,9 % der auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe zurückzuführenden Kohlenstoffemissionen durch Kohleverbrennung; im Jahre 1980 dagegen stammten nur 36,8 % aus der Verbrennung von Kohle, während 45,1 % aus der Ölverbrennung und 14 % aus der Gasverbrennung herrührten. Seit der Energiekrise von 1973/74 hat sich das Wachstum des weltweiten Verbrauchs fossiler Brennstoffe durch den Rückgang des Öl- und Gasverbrauchs stark verlangsamt. Die Wachstumsrate des Kohleverbrauchs wurde allerdings kaum beeinflusst. Die Wachstumsrate für die gesamte Kohlenstoffemission aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe beträgt dadurch zur Zeit nur noch 2,3 %/a /Rotty 1981/. Eine Reihe von Prognosen kommt zu dem Ergebnis, daß die Zuwachsraten für Kohlenstoffemissionen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe während der nächsten 30 bis 50 Jahre wahrscheinlich im Durchschnitt bei 2 %/a liegen, sich also weiter reduzieren werden.

Für eigene Rechnungen mit einem Modell des Kohlenstoffkreislaufs wurden folgende Annahmen über die Entwicklung der Kohlenstoffemissionen bis 2050 gemacht. Drei Fälle wurden angenommen:

<u>Zeitraum</u>	<u>Jährliche Wachstumsrate</u>		
	<u>Fall A</u>	<u>Fall B</u>	<u>Fall C</u>
1981 - 1990	2,5 %	2,5 %	2,5 %
1991 - 2000	2,5 %	2 %	1 %
2000 - 2050	2,5 %	1 %	0 %

Die angegebenen Wachstumsraten für die Kohlenstoffemissionen bedeuten erheblich höhere Wachstumsraten für den Kohleeinsatz, da für den Einsatz von Mineralöl und von Gas nur noch von einem sehr geringen Wachstum auszugehen ist. Weiterhin ist zu erwähnen, daß die spezifischen Kohlenstoff-

emissionen aus der Verbrennung von Kohle mit 724 kg C/t SKE erheblich höher liegen als die spezifischen Kohlenstoffemissionen, die bei der Verbrennung von Erdöl (585 kg C/t SKE) und von Erdgas (390 kg C/t SKE) entstehen.

Abbildung 2 zeigt die historische Entwicklung der jährlichen Kohlenstoffemissionen in die Atmosphäre durch Verbrennung fossiler Energieträger sowie durch Abholzung und intensive Bodennutzung im Zeitraum 1860 bis 1980. Abbildung 3 zeigt die berechneten Kohlenstoffemissionen in den Fällen A, B und C für den Zeitraum 1980 bis 2050. In absoluten Zahlen ausgedrückt ergibt sich für Fall A im Jahre 2050 eine Kohlenstoffemission von etwa 30 Mrd t, d.h. eine Versechsfachung des heutigen Emissionswertes; Fall B führt zu einer jährlichen Emission von etwa 14 Mrd t, was mehr als eine Verdopplung des heutigen Wertes bedeutet. Fall C schließlich ergibt mit 7 Mrd t Jahresemission im Jahre 2050 nur eine relativ geringfügige Emissionssteigerung.

Große Unsicherheiten bestehen noch bei den Kohlenstoffemissionen durch das Abholzen von Wäldern, die Neugewinnung von Anbauflächen und die Intensivierung der Landwirtschaft. Nach Moore et al. erreichten diese Emissionen im Jahre 1980 eine Höhe von etwa 3,6 Mrd t Kohlenstoff (s. Abb. 2) /Moore et al. 1981/. Andere Untersuchungen geben niedrigere Werte an, so z.B. der Bericht des World Climate Programme, der für das Jahr 1981 von einer Emission von 2 Mrd t Kohlenstoff ausgeht /World Climate Programme 1981/.

Auf jeden Fall liegen nach diesen Quellen die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe mit 5,3 Mrd t im Jahre 1980 über denen aus der Verbrennung und Rodung von Biomasse. Für die Simulationen mit dem Kohlenstoffmodell (s. Abschnitt 3) wurde angenommen, daß sich die Wachstumsrate dieser "biologischen" Quellen nach 1980 verlangsamt und daß die Kohlenstoffemission aus diesen Quellen im Jahre 1990 einen konstant bleibenden Wert von etwa 4 Mrd t Kohlenstoff/a erreichen wird.

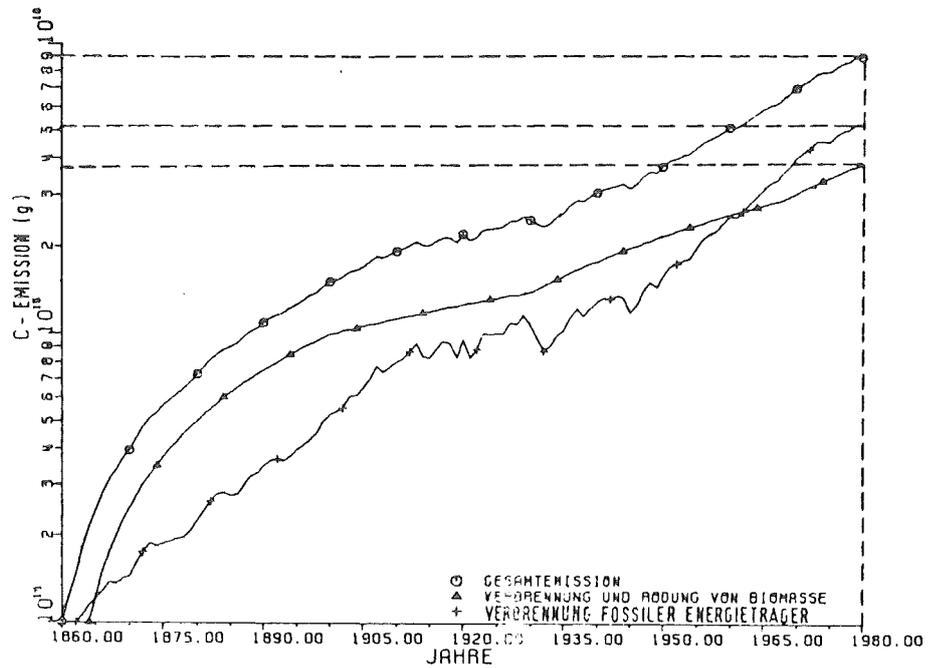


Abb. 2: Jährliche Kohlenstoffemission (C-CO₂) aus der Verbrennung fossiler Energieträger und der Verbrennung und Rodung von Biomasse (1960 - 1980)

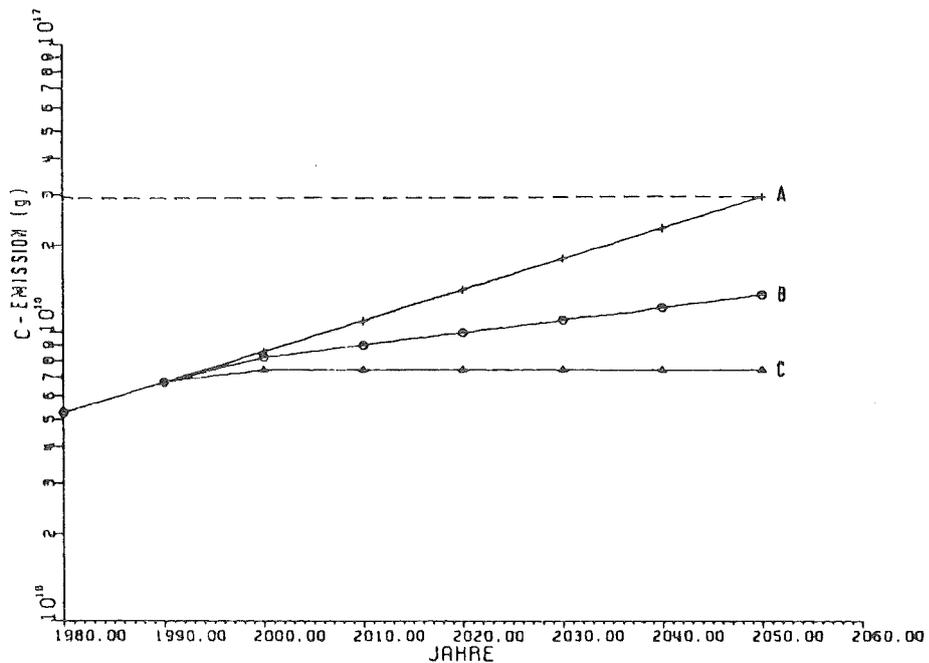


Abb. 3: Zukünftige Entwicklung der Kohlenstoffemission (C-CO₂) aus der Verbrennung fossiler Energieträger (Fall A: hohe, Fall B: mittlere, Fall C: niedrige Wachstumsrate der Kohlenstoffemissionen aus dem Einsatz fossiler Energieträger)

3. Der Kohlenstoffkreislauf und seine anthropogene Beeinflussung

3.1 Der Kohlenstoffkreislauf

Die vier Speicher für Kohlenstoff sind die Atmosphäre, das Meer, die Biosphäre (Landpflanzen und tote organische Substanz) sowie die Lithosphäre (Sedimente). Die Kohlenstoffmenge der Speicher und der Kohlenstoffaustausch zwischen den Speichern sind bisher nur näherungsweise bekannt.

Für Modellbetrachtungen wird im allgemeinen angenommen, daß sich der Kohlenstoffkreislauf bis zum Jahre 1860, also bis zu einem Zeitpunkt vor dem großtechnischen Einsatz fossiler Energieträger, im Gleichgewichtszustand befand, d.h. die Kohlenstoffmenge in den verschiedenen Speichern und die Flüsse zwischen den Speichern unterlagen keinen großen zeitlichen Änderungen. Abbildung 4 zeigt den Kohlenstoffkreislauf mit seinen Speichern und Flüssen für diesen Bezugszeitpunkt. Die Speicher Atmosphäre, langlebige Biosphäre und Mischungsschicht der Ozeane besitzen in etwa gleiche Inventare von $600 - 700 \times 10^{15}$ gC. Der Austausch zwischen der Atmosphäre und der kurzlebigen Biosphäre vollzieht sich mit einem geringen Nettoüberschuß für die Biosphäre, der Austausch Atmosphäre-Mischungsschicht der Ozeane ist in etwa ausgeglichen.

Für das Bezugsjahr 1980 wird von erheblich veränderten Kohlenstoffinventarwerten für die einzelnen Speicher ausgegangen. So waren in der Atmosphäre zu diesem Zeitpunkt ca. 710×10^{15} g Kohlenstoff enthalten. Das Meer kann bezüglich des Kohlenstoffgehaltes in drei Schichten unterteilt werden:

- die durchmischte Oberflächenschicht mit ca. 670×10^{15} gC
- die mittlere Schicht mit ca. 8200×10^{15} gC
- die unterste Schicht mit ca. $26\,000 \times 10^{15}$ gC.

Zwischen der Tiefsee und den übrigen Ozeanschichten findet nur ein sehr langsamer Austausch statt. Abschätzungen der Kohlenstoffmenge in lebenden Pflanzen und toter organischer Substanz auf dem Festland sind unterschiedlich. Bolin (1981) z.B. gibt eine gesamte Biomasse von

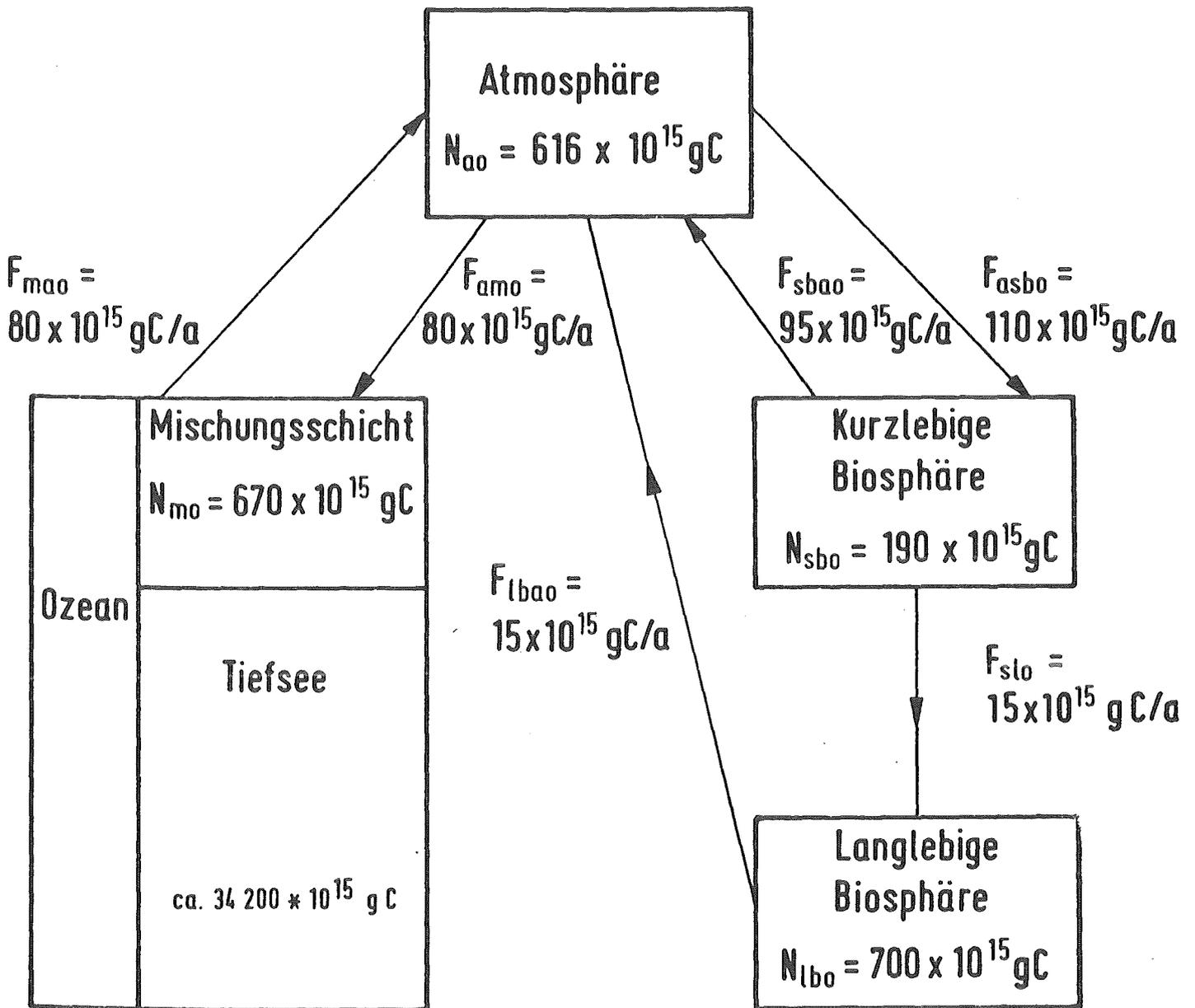


Abb. 4: Modell des globalen Kohlenstoffkreislaufs im Gleichgewichtszustand (Bezugsjahr 1860)

890×10^{15} gC (organische Substanz im Boden ausgenommen) an, während Olson et al. (1983) einen Wert von 562×10^{15} gC angeben.

Zur Vorhersage der CO_2 -Konzentration werden Rechenmodelle des Kohlenstoffkreislaufs benutzt. In dieser Studie wurde ein Modell des Kohlenstoffkreislaufs entwickelt, das gestattet, die Auswirkungen künftiger CO_2 -Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern und aus der Biosphäre zu untersuchen. Die betrachteten fünf Kohlenstoffreservoirs sind Atmosphäre, oberste Mischungsschicht des Ozeans, Tiefsee, kurzlebige pflanzliche Biomasse und langlebige pflanzliche Biomasse. Der Transfer innerhalb der Ozeanreservoirs wird durch einen Diffusionsansatz beschrieben, ähnlich dem im Modell von Oeschger et al. (1975). Die Reservoirgrößen und -übergangsraten in der Biosphäre beruhen auf Daten aus dem Modell von Bolin (1981). Bolin unterteilt die Biomasse in vier Unterreservoirs:

- kurzlebige pflanzliche Biomasse (z.B. einjährige Pflanzen Gras, Blätter, Nadeln)
- langlebige pflanzliche Biomasse (z.B. Äste, Stämme von mehrjährigen Pflanzen)
- Humus
- Boden.

Da der Boden, verglichen mit den Zeitskalen, die in Hinblick auf das CO_2 -Problem betrachtet werden, eine sehr lange Austauschzeit besitzt, 720 Jahre nach Bolin (1981), wird dieses Reservoir in dem vorliegenden Modell nicht berücksichtigt. Bolin nimmt weiterhin eine sehr kurze Verweilzeit des Kohlenstoffs im Humus an. Der Humus wurde im vorliegenden Modell daher bei der kurzlebigen Pflanzenwelt mitberücksichtigt. Die grundlegenden Modellgleichungen sind im Anhang beschrieben.

3.2 Ergebnisse der Modellrechnungen

Das im Abschnitt 3.1 und im Anhang beschriebene Modell des Kohlenstoffkreislaufes gestattet, die aus zukünftigen anthropogenen Kohlendioxidemissionen zu erwartenden atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen zu bestimmen. Die Anpassung des Modells erfolgte anhand der Entwicklung der atmosphärischen Kohlenstoffkonzentration, wie sie an den Stationen in Hawaii und am Südpol im Zeitraum zwischen 1958 und 1980 beobachtet wurde (Bacastow und Keeling 1981). Im Rahmen einer Reihe von Sensitivitätsuntersuchungen wurde der sogenannte biologische Wachstumsfaktor (β), der den Einfluß der durch die erhöhte CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre intensivierten Photosynthese beschreibt, als sensitivster Parameter für die Anpassung der Modellrechnungen an den historischen Verlauf der CO_2 -Konzentrationsentwicklung identifiziert. Diese Anpassung ergab einen Wert für β von 0,1 (Abb. 5). Weitere Betrachtungen über die Simulation des Wachstums der Biomasse in Abhängigkeit von der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre sind dem Anhang A 2 zu entnehmen.

Im einzelnen wurde bei der Anpassung von den folgenden Meßwerten für die CO_2 -Konzentration ausgegangen: Im Januar 1959 wurde eine atmosphärische CO_2 -Konzentration von 315,8 ppm im Mauna Loa, Hawaii, gemessen, die einem atmosphärischen Kohlenstoffgehalt von 670×10^{15} g Kohlenstoff entspricht. Im Januar 1978 betrug die atmosphärische CO_2 -Konzentration 334,6 ppm in Mauna Loa, was einem atmosphärischen Kohlenstoffgehalt von 710×10^{15} g Kohlenstoff entspricht. Der atmosphärische Kohlenstoffgehalt, gemessen in Mauna Loa, wuchs daher um 40×10^{15} g Kohlenstoff im Zeitraum zwischen 1958 und 1978 an. Diese Beobachtungswerte sind zur Modellkalibrierung herangezogen worden. Dabei ist zu bemerken, daß sie nicht dem exakten globalen atmosphärischen Kohlenstoffgehalt entsprechen. So wuchs der beobachtete atmosphärische Kohlenstoffgehalt am Südpol nur um $36,7 \times 10^{15}$ gC im Zeitraum zwischen Januar 1959 und Januar 1978. Die Werte zeigen jedoch deutlich den Trend der globalen Kohlenstoffentwicklung.

○ Rechenwerte — Messungen

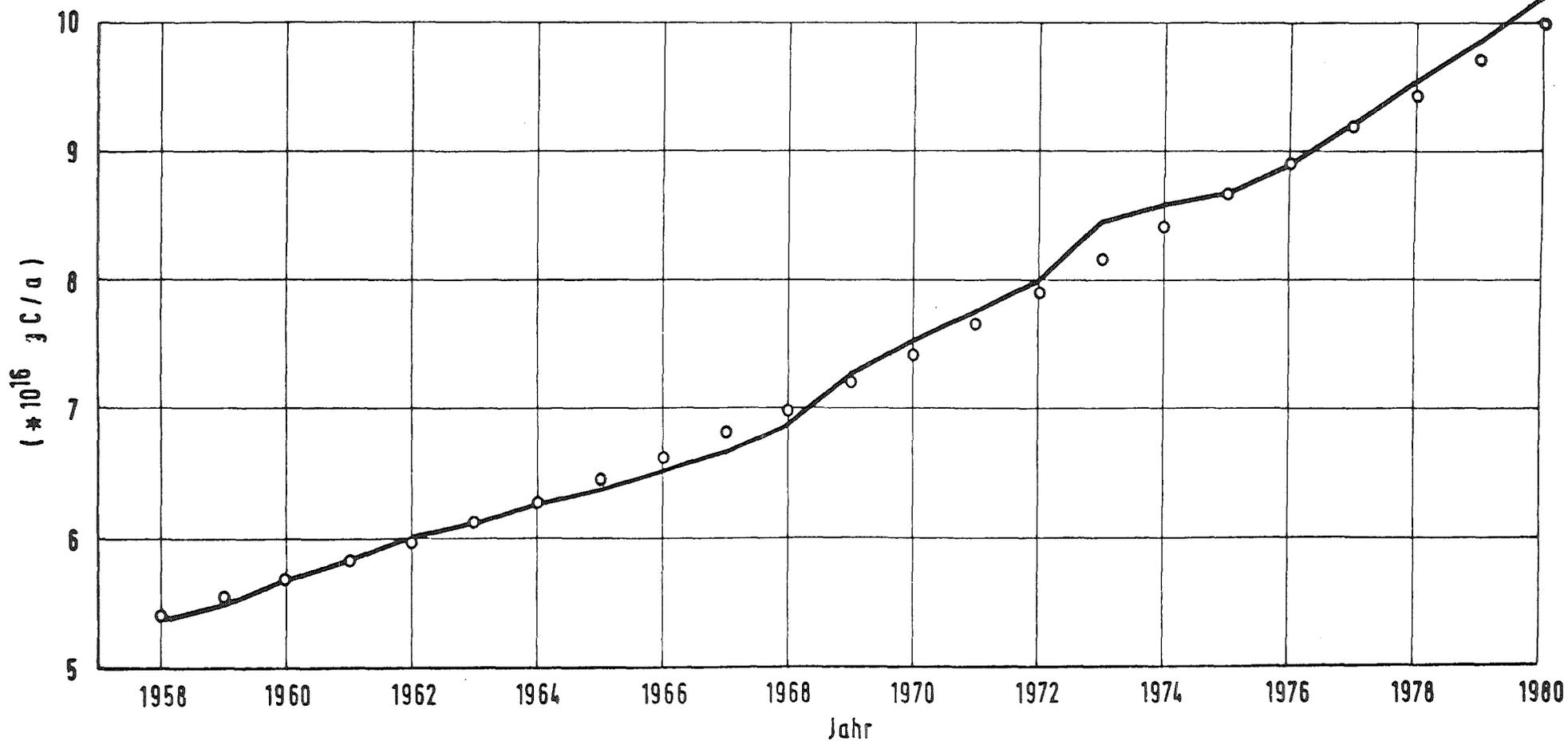


Abb. 5: Anpassung der Modellrechnungen an den historischen Verlauf der atmosphärischen CO₂-Konzentration (Station Mauna Loa) durch geeignete Wahl eines Wertes für den sog. biologischen Wachstumsfaktor β - Zuwachs bezogen auf den "Gleichgewichtszustand" im Jahre 1860

Abbildung 6 zeigt die errechneten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen für $\beta = 0,1$ und die betrachteten Fälle (A, B und C). Die Maxima des atmosphärischen Kohlenstoffgehalts und die Werte für das Jahr 2050 betragen für die untersuchten Fälle:

Maximale Werte	Werte für das Jahr 2050
Fall A: 854×10^{15} gC (402 ppm) (2050)	854×10^{15} gC (402 ppm)
Fall B: 779×10^{15} gC (367 ppm) (2013 - 2021)	751×10^{15} gC (354 ppm)
Fall C: 766×10^{15} gC (361 ppm) (2006 - 2011)	707×10^{15} gC (333 ppm)

Die Unterschiede zwischen den Fällen B und C sind nicht sehr groß. In beiden Fällen wird der maximale Wert für die Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre kurz nach der Jahrhundertwende erreicht. Der Zeitpunkt des Maximalwertes stellt sich bei der kleinen Wachstumsrate (Fall C) früher ein als bei der großen (Fall B). Für die kleine Wachstumsrate ist auch der Zeitraum, in dem der maximale Wert erreicht wird, kürzer. Weiterhin ist in diesem Fall der atmosphärische Kohlenstoffgehalt im Jahre 2050 niedriger als der im Jahre 1980.

Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß eine Reduzierung der Wachstumsrate der anthropogenen Kohlenstoffemission von dem historischen Wert von 4,3 %/a zu Werten unterhalb 2,5 % nach 1990 zur Vermeidung größerer Zuwächse der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration führt.

Die Ergebnisse sind jedoch sehr stark von den Modellannahmen über die Biosphäre abhängig. Zwei weitere Simulationsrechnungen wurden durchgeführt, in welchen der biologische Wachstumsfaktor β im Zeitraum zwischen 1990 und 2020 linear von 0,1 auf 0 abnimmt. Die Ergebnisse zeigen, daß diese Reduktion des Wachstumsfaktors einen großen Einfluß auf die Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration hat (Abb. 7). Diese Reduktion steigert die atmosphärische CO₂-Konzentration im Jahre 2050 um etwa 50 % im Vergleich zum Fall $\beta = 0,1$.

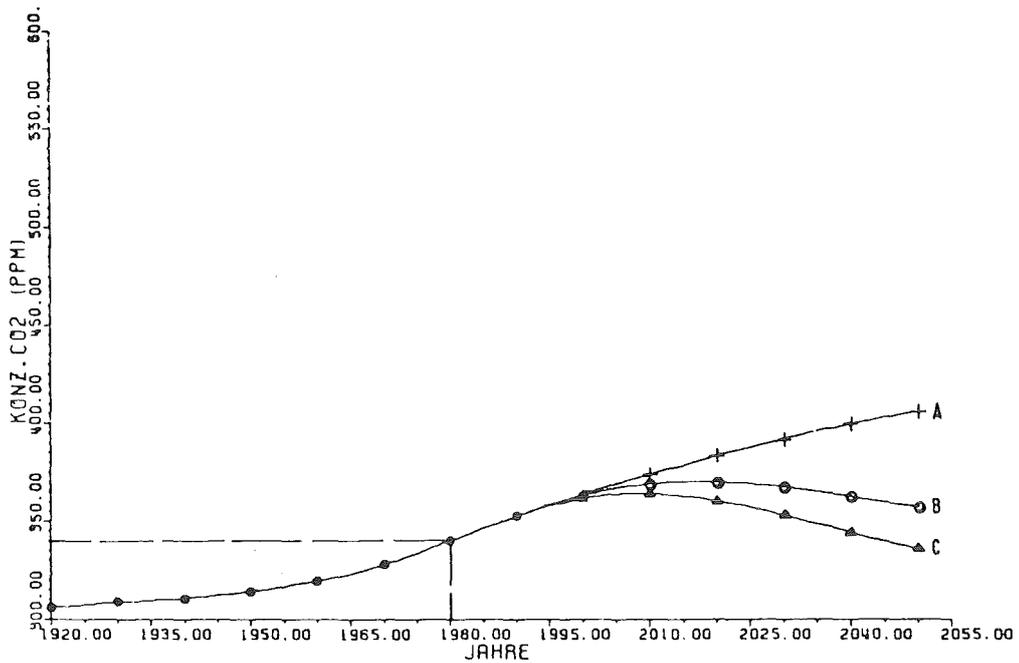


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration für verschiedene Annahmen über die Entwicklung der Kohlenstoffemissionen (Fall A: hohe, Fall B: mittlere, Fall C: niedrige Wachstumsrate der anthropogenen Kohlenstoffemissionen)

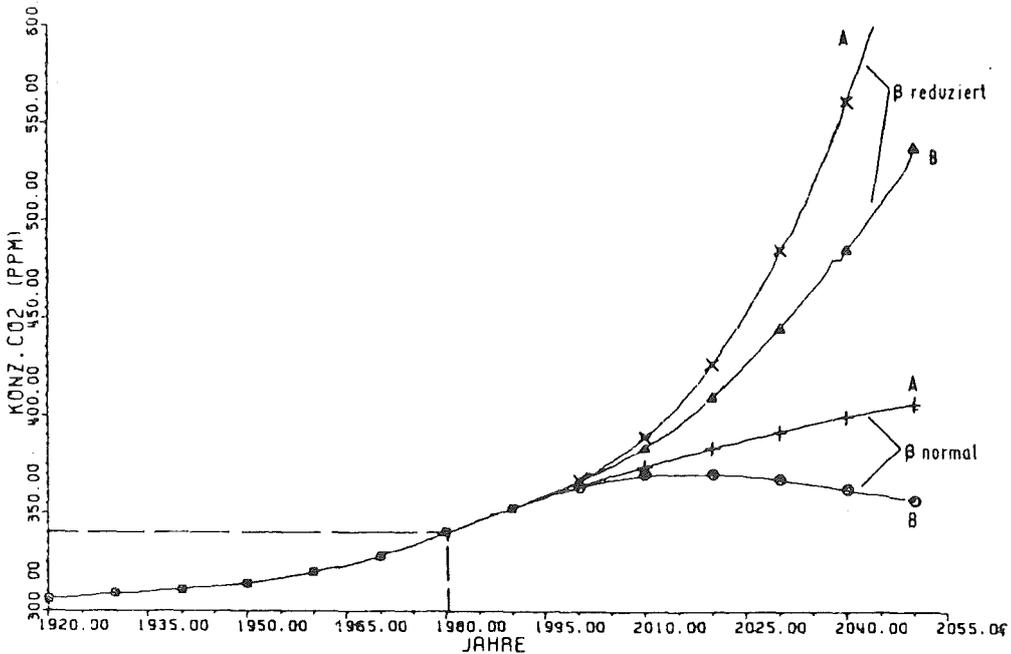


Abb. 7: Simulation der zeitlichen Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration für verschiedene Annahmen über den biologischen Wachstumsfaktor β und die Entwicklung der Kohlenstoffemissionen (Fall A: hohe, Fall B: mittlere, Fall C: niedrige Wachstumsrate der anthropogenen Kohlenstoffemissionen)

Im einzelnen ergeben sich für das Jahr 2050 die folgenden Unterschiede im atmosphärischen Kohlenstoffgehalt für die betrachteten Fälle:

Fall A, β normal:	854×10^{15} gC	(402 ppm)
Fall A, β reduziert:	1390×10^{15} gC	(655 ppm)
Fall B, β normal:	751×10^{15} gC	(354 ppm)
Fall B, β reduziert:	1130×10^{15} gC	(533 ppm)

Diese Ergebnisse unterstreichen die bereits erwähnte hohe Sensitivität des Modells auf Änderungen des Wertes des biologischen Wachstumsfaktors β . Bacastow und Keeling (1979) zeigten in ähnlicher Weise, daß die Festlegung einer Grenze für das Wachstum der Biosphäre einen großen Einfluß auf die Entwicklung des atmosphärischen Kohlenstoffgehalts hat. Loucks (1980) schlug vor, den Wert von β auf effektiv 0 zu setzen. Die Ergebnisse der Fallrechnungen β normal und β reduziert zeigen, daß eine Reduktion des Wachstumsfaktors nach 1990 den atmosphärischen Kohlenstoffgehalt im Jahre 2050 um etwa 50 % steigert im Vergleich zu dem Fall eines konstant gehaltenen β . Der Zuwachs des atmosphärischen Kohlenstoffgehalts in Fällen A und B, β reduziert, wird ausgeglichen durch eine Abnahme des Kohlenstoffs, der in der Biosphäre gespeichert wird.

Sowohl die kurzlebige als auch die langlebige Biosphäre reagieren unterschiedlich auf die Reduktion des biologischen Wachstumsfaktors β nach 1990. Im Jahre 2050 beträgt der in der Biosphäre gespeicherte Kohlenstoff:

	kurzlebige Biosphäre	langlebige Biosphäre
Fall A, β normal:	540×10^{15} gC	1090×10^{15} gC
Fall A, β reduziert:	224×10^{15} gC	728×10^{15} gC
Fall B, β normal:	438×10^{15} gC	1010×10^{15} gC
Fall B, β reduziert:	223×10^{15} gC	725×10^{15} gC

Die Änderung des Wertes für β nach 1990 reduziert nicht nur den Kohlenstoffbetrag, der in der Biosphäre gespeichert wird, sie führt auch zum Zuwachs des Kohlenstoffgehalts, der im Ozean gespeichert wird. So beträgt im Jahre 2050 der Kohlenstoffgehalt der obersten Mischungsschicht im Falle A 684×10^{15} gC und im Falle B, β reduziert, 708×10^{15} gC.

3.3 Vergleich mit Ergebnissen anderer Untersuchungen

Ein Vergleich der Ergebnisse der im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Rechnungen mit den Ergebnissen anderer Studien, die vor kurzem veröffentlicht wurden /EPA 1983; CDAC 1983; KFA 1983/, zeigt insgesamt eine recht gute Übereinstimmung. In Tabelle 1 sind die Werte für die Kohlenstoffemissionen und die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre aus den verschiedenen Studien zusammengestellt. Die differenzierten Emissionserhebungen in den Studien der EPA und der CDAC ergeben einen zu erwartenden Emissionsbereich von 5 bis 26 Mrd t C/a, der in sehr guter Übereinstimmung mit den pauschalen Emissionsannahmen der vorliegenden Arbeit steht (Fälle A-C). In der Studie der KFA-Jülich wird von vier Szenarien ausgegangen:

- zwei Szenarien des International Institute for Applied Systems Analysis (22 TW- und 36 TW-Weltenergieeinsatz),
- ein Nullwachstums-Szenario und
- ein sog. Effizienz-Szenario.

Das Nullwachstums-Szenario geht davon aus, daß der mittlere Primärenergieverbrauch pro Kopf von 2 kW·a/a im Jahre 1975 auch in Zukunft beibehalten wird; die Bevölkerung verdoppelt sich allerdings im Betrachtungszeitraum 1975 - 2030 von 4 auf 8 Mrd, was eine Steigerung des Gesamtenergieverbrauchs bedeutet. Das Effizienz-Szenario ergibt trotz Bevölkerungswachstum einen geringeren Energieverbrauch im Jahre 2030 im Vergleich zu heute aufgrund effizienterer Energienutzung.

Die CDAC-Studie und die EPA-Studie haben Kohlenstoffemissionen von 15 Mrd t C/a als wahrscheinlich angenommen und errechnen für diesen Fall eine atmosphärische CO₂-Konzentration von ungefähr 500 ppm. Die KFA-Studie errechnet für das IIASA(36 TW)-Szenario (16 Mrd t C/a im Jahre 2030) einen ähnlichen Wert für die atmosphärische CO₂-Konzentration in Höhe von 495 ppm. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen des in dieser Studie untersuchten Falles B mit reduziertem biologischen Wachstumsfaktor, für den bei Kohlenstoffemissionen im Jahre 2050 in Höhe von 13,5 Mrd t C/a die atmosphärische CO₂-Konzentration mit 533 ppm abgeschätzt wurde.

Tab. 1: Vergleich der Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zur Kohlenstoffemission und zur CO₂-Konzentration in der Atmosphäre im Jahre 2050 (2030)²

Studie	C-Emissionen im Jahre 2050 (Mrd t C/a)	Atm. CO ₂ -Gehalt im Jahre 2050 (ppm)
<u>KfK</u>		
Fall A	29,6	402
A (β^1) reduziert)		655
B	13,5	354
B (β^1) reduziert)		533
C	7,43	333
<u>EPA</u> (Referenzszenario)	15	490
<u>CDAC</u> (Referenzszenario)	15	500
<u>KFA</u>	<u>im Jahre 2030</u>	<u>im Jahre 2030</u>
IIASA (36 TW ²)	16	495
IIASA (22 TW ²)	10	450
Nullwachstum (16 TW ²)	7	425
Effizienz (5 TW ²)	0,8	365

Legende:

- KfK Kernforschungszentrum Karlsruhe
- EPA US-Environmental Protection Agency
- CDAC Carbon Dioxide Assessment Committee
- KFA Kernforschungszentrum Jülich
- IIASA International Institute for Applied Systems Analysis

- 1) β = biologischer Wachstumsfaktor
- 2) angenommener Weltenergieverbrauch in Twa/a

4. Potentielle Auswirkungen anthropogener Spurenelementemissionen auf das Klima

4.1 Potentielle Auswirkungen von Kohlendioxidemissionen

Viele mit Klimamodellen unterschiedlicher Komplexität 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, wie bereits erwähnt, dadurch bedingt, daß CO_2 langwellige Strahlung gut absorbiert bzw. emittiert.

Berechnungen ergeben, daß eine Verdopplung der Konzentration des CO_2 in der Atmosphäre global zu einer erhöhten Energieabsorption der unteren Atmosphäre, der Meere und des Festlandes von durchschnittlich circa 4 W m^{-2} führt; man ist relativ sicher, daß dieser Schätzwert auf $\pm 25 \%$ genau ist /NAS 1979/. Größere Unsicherheiten ergeben sich bei der Abschätzung der Veränderung der Oberflächentemperatur infolge der Veränderung dieser Absorption. Unter Berücksichtigung der bekannten Rückkopplungseffekte, wie z.B. dem Einfluß der Wolken, wurde geschätzt, daß sich bei einer Verdopplung der CO_2 -Konzentration die globale mittlere Jahrestemperatur der Erdoberfläche um $3 \pm 1,5 \text{ K}$ ändert /NAS 1979/.

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 Verdopplung des CO_2 -Gehalts die Jahresmittelwerte der Erdoberflächentemperatur in der nördlichen Hemisphäre um $3,3 \text{ K}$ zunehmen. Die Oberflächentemperatur erhöht sich in niedrigen Breiten pro Jahr um etwas über 3 K , in hohen Breiten um mehr als 5 K .

Den Klimamodellen zufolge bleibt in niederen Breiten die errechnete Temperaturerhöhung vom Wechsel der Jahreszeiten praktisch unbeeinflusst. In höheren Breiten ist dies anders: bei 65° nördlicher Breite steigt die Temperatur im Frühjahr stärker an, bei 85° nördlicher Breite im Frühjahr und Sommer. Die stärkere Zunahme im Frühjahr/Sommer in höheren Breiten ist auf den Eis-Albedo-Rückkopplungseffekt - die Auswirkung des Eises auf das Verhältnis von reflektierter zu auftreffender Strahlung - zurückzuführen.

Die meisten der bisher zur Untersuchung erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen eingesetzten Modelle fallen in eine der folgenden Kategorien:

- (1) Energiebilanzmodelle (EBM): Sie betrachten die Variationen der Wärmebilanz des Systems Erde-Atmosphäre (null- oder eindimensional).
- (2) Strahlungs-Konvektions-Modelle (SKM): Sie berechnen das Strahlungsgleichgewicht zwischen absorbierte Solarstrahlung und abgestrahlte langwelliger Strahlung und schließen die Effekte des konvektiven Wärmetransports ein (eindimensional).
- (3) Allgemeine Zirkulationsmodelle (AZM): Sie simulieren das dynamische Verhalten der Atmosphäre durch die Berechnung der zeitabhängigen Lösung der dynamischen Gleichungen für die großräumigen Bewegungen der Atmosphäre im dreidimensionalen Raum. Einige atmosphärischen Zirkulationsmodelle werden mit einfachen Ozeanmodellen gekoppelt.

Die mit diesen Modelltypen errechneten Temperaturerhöhungen für den Fall einer Verdopplung der CO₂-Konzentration der Atmosphäre liegen in folgenden Bereichen:

EBM: 1,3 - 3,3⁰ C

SKM: 1,3 - 3,2⁰ C

AZM: 1,3 - 3,9⁰ C

Um die Auswirkungen einer erhöhten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre richtig bewerten zu können, muß man aber nicht nur wissen, wie sich die mittlere globale Temperatur ändert, sondern auch, wie sich die regionalen Temperaturverteilungen in Abhängigkeit von den Jahreszeiten verhalten. Weiterhin sind Änderungen des regionalen und zeitabhängigen Verhaltens weiterer meteorologischer Größen, wie des Niederschlags und der Windgeschwindigkeit, von Interesse. Die Beantwortung dieser Fragen ist im Prinzip nur durch den Einsatz der "allgemeinen Zirkulationsmodelle" möglich. Diese Modelle können allerdings bisher wegen einer Reihe von Mängeln die regionale Verteilung der genannten Variablen noch nicht befriedigend nachbilden. Die Mängel betreffen u.a. die ungenügende Behandlung von Wolken, Niederschlägen und orographischen Effekten. Darüber

hinaus berücksichtigen diese Modelle die Zirkulation der Ozeane und die damit verbundenen Auswirkungen auf den Wärmehaushalt und die Temperaturverteilung innerhalb der Ozeane nicht in hinreichender Weise. Auch für die Kopplungen der Zirkulation der Atmosphäre mit der der Ozeane werden nur einfache Modellannahmen gemacht. Deshalb können die Voraussagen der bestehenden Modelle über regionale Klimaveränderungen als Folge einer erhöhten CO_2 -Konzentration noch nicht als zuverlässig angesehen werden.

Ein weiterer Mangel der bisher vorliegenden Klimamodelle besteht darin, daß die zeitliche Entwicklung einer möglichen Temperaturänderung aufgrund erhöhter CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre nicht befriedigend simuliert werden kann. Es muß angenommen werden, daß zwischen den beiden Ereignissen "CO₂-Konzentrationserhöhung" und "Temperaturerhöhung" eine Verzögerung von einigen Jahrzehnten besteht. Rechnungen zur zeitlichen Entwicklung der Temperaturänderung bei unterschiedlichen Modellannahmen, aber gleicher Entwicklung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration, führen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, wie die in Abb. 8 dargestellten Vergleichsrechnungen zur zeitlichen Entwicklung der Oberflächentemperatur der Ozeane - einmal als Übergang von sukzessiven Gleichgewichtszuständen innerhalb kurzer Zeitintervalle (Gleichgewichtsansatz), zum anderen unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Wechselwirkungen der ablaufenden Prozesse, wie z.B. des vertikalen Wärmetransports (transienter Ansatz) - für den Fall eines Anwachsens der atmosphärischen CO_2 -Konzentration auf 600 ppm bis zum Jahre 2060 illustrieren /Dickinson 1982/. Der transiente Ansatz muß dabei als die realistischere Beschreibung der Temperaturentwicklung angesehen werden.

Der modellbedingte Verzögerungseffekt für die Temperaturerhöhung wirkt sich in höheren Breitengradzonen stärker aus als im Äquatorialbereich. So wird für den Äquatorialbereich eine Temperaturerhöhung von 1 K mit dem Gleichgewichtsansatz für das Jahr 2025 und mit dem transienten Ansatz für das Jahr 2050 errechnet, ein Zeitunterschied von 25 Jahren. Im arktischen Bereich vergrößert sich diese modellbedingte Zeitdifferenz für eine 1 K-Temperaturerhöhung sogar auf etwa 50 Jahre. Die bereits erwähnte größere Gesamttemperaturänderung in höheren Breitengradzonen im Vergleich zur Äquatorialzone im Fall einer Steigerung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zeigt sich auch für die Entwicklung der Oberflächentemperatur der Ozeane.

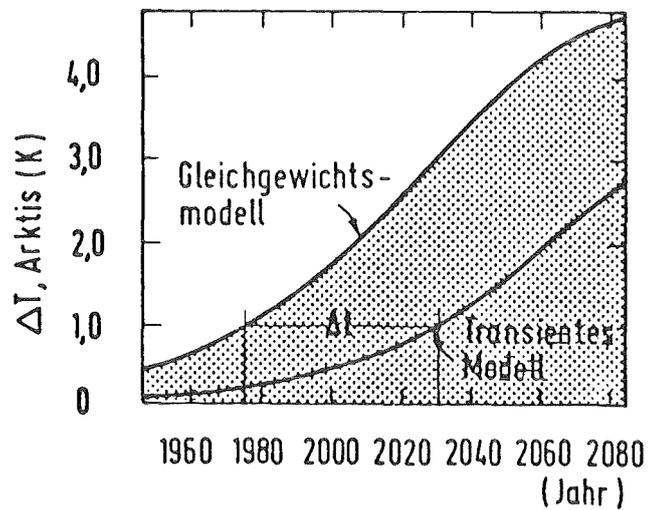
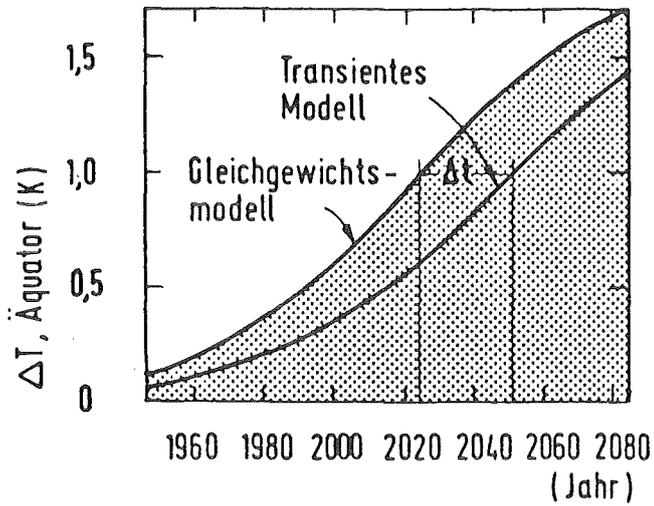


Abb. 8: Modellrechnungen zur zeitlichen Entwicklung der Oberflächentemperatur der Ozeane für den Fall eines Anwachsens der atmosphärischen CO_2 -Konzentration auf 600 ppm bis zum Jahre 2060 auf der Grundlage von Gleichgewichtsmodellen und von transienten Modellen für

- a) die Äquatorialzone,
- b) die Arktiszone

(Quelle: /Dickinson 1982/)

Aus dem dargestellten Stand der Methodenentwicklung auf dem Gebiet der Klimamodelle lassen sich die folgenden Schlüsse herleiten:
Künftige Arbeiten auf diesem Gebiet müssen sich mit der Verbesserung allgemeiner Zirkulationsmodelle befassen, damit regionale Klima-anomalien zuverlässig vorhergesagt werden können. Darüber hinaus ist der Einsatz einfacher Modelle (Energiebilanzmodelle, Strahlungskonvektionsmodelle) für die Durchführung von Sensitivitätsuntersuchungen wünschenswert. Die "Simulationsgüte" der Klimamodelle sollte anhand von historischen Beobachtungsergebnissen zur Klimaentwicklung überprüft werden. Die Konsequenzen der möglichen zeitlichen Verzögerungen zwischen "CO₂-Konzentrationserhöhung" und "Temperaturerhöhung" auf die regionalen Klimaänderungen muß als Forschungsthema hohe Priorität erhalten
/Schneider, Thompson 1980/.

4.2 Potentielle Auswirkungen von sonstigen Spurenelementemissionen

CO₂ ist nicht das einzige Gas das einen Einfluß auf das Klima ausüben kann. Eine Reihe weiterer Gase verursachen ebenfalls den sog. Treibhauseffekt. Diese Gase könnten die durch CO₂ bewirkten Klimaänderungen noch verstärken. Konzentrationen und Zuwachsraten einiger dieser Spurengase sind in den letzten Jahren intensiv untersucht worden (z.B., Machta, 1983; Chamberlain, 1982). Von vorrangiger Bedeutung sind hierbei die Stoffe: Distickoxid (N₂O), Methan (CH₄), Chlorfluormethane, halogenierte Kohlenwasserstoffe sowie Ozon (O₃) und stratosphärischer Wasserdampf (H₂O).

Die Emissionsquellstärken von Spurenelementen und deren Zuwachsraten sind nur unzureichend bekannt. Die Hauptquelle für Distickoxid (N₂O) stellt die bakterielle Denitrifikation im Boden und in Oberflächengewässern dar. Die Verwendung ammoniumhaltiger Düngemittel auf landwirtschaftlich genutzten Böden und die Einleitung ammoniumhaltiger Abwässer in Gewässern erhöhen die Abgaberate von N₂O aus Böden und Gewässern. Weiterhin trägt die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit einer Rate von 3-4 Mill t N₂O/a zur Gesamtemission bei. Machta (1983) gibt die Zuwachsrate für N₂O mit ca. 0,25%/a an. Hahn (1979) berechnete für die Zeit zwischen 2025 und 2040 eine N₂O-Konzentration, die 100% über dem heutigen Wert liegt. Hauptquelle für die Emission von Methan sind Bergbau, industrielle Prozesse und weitere anthropogene Aktivitäten, die etwa 15-50 Mill t Methan/a an die Atmosphäre abgeben. Weitere anthropogene Quellen sind der Anbau von Reisfeldern, die Viehhaltung und die Trockenlegung von Sumpfgebieten. Die atmosphärische Konzentration von Methan hat einen jährlichen Zuwachs von ca. 1,7%. Es ist zu erwarten, daß sich diese Entwicklung fortsetzen wird, da die ergiebigsten Methanquellen eng mit der Größe der Weltbevölkerung gekoppelt sind. Chlorfluormethane werden nur industriell erzeugt. Sie finden in Kühlgeräten, Sprühdosen, Lösungs- und Reinigungsmitteln Einsatz. Die Weltproduktion von Chlorfluormethanen ist bis Mitte der 70er Jahre gestiegen. Seitdem ist sie konstant geblieben und wird zukünftig eher rückläufig sein, da sowohl in den USA, als auch in Schweden bereits Maßnahmen zur Einschränkung der Verwendung dieser Produkte ergriffen wurden. Kohlenstoff-Tetrachlorid (CCl₄) und Kohlenstoff-Tetrafluorid (CF₄) haben sehr lange Verweilzeiten in der Atmosphäre (1 000 - 10 000 Jahre); daher können sich auch bei kleiner jährlicher Emission im Laufe der Zeit

erhöhte Konzentrationen aufbauen. Sie werden hauptsächlich bei der Aluminiumproduktion, der Stahlproduktion und anderen industriellen Prozessen abgegeben. Als wesentliche Quelle für den Anstieg des troposphärischen Ozonpegels wird der langsame, kontinuierliche Anstieg des Kohlenmonoxids in der Nordhemisphäre angesehen, das mit der Konzentration in der Atmosphäre korreliert ist. Die Abschätzungen der klimatischen Auswirkungen von Spurengasen sind hauptsächlich mit eindimensionalen Strahlungskonvektionsmodellen durchgeführt worden. Tabelle 2 zeigt die so berechneten Änderungen der Temperatur der bodennahen Atmosphäre bei einer Verdoppelung der Spurengaskonzentration oder bei einer Konzentrationszunahme von 0 bis 1 ppb. Abschätzungen anderer Autoren zeigen Unterschiede zu den in Tabelle 2 aufgeführten Werten. Diese Unterschiede betragen allerdings nicht mehr als etwa $\pm 30\%$. Die Temperaturänderungen durch einzelne Spurengase sind nicht so groß wie die Änderung, die durch CO_2 zu erwarten ist. Die Summe der möglichen Temperaturänderungen (vgl. Tabelle 2) könnte aber durchaus in der Größenordnung der durch CO_2 induzierten Änderung liegen.

Insgesamt befindet sich die Untersuchung von Spurengasen, die einen Einfluß auf den Strahlungshaushalt der Erde besitzen, erst im Anfangsstadium. Das noch lückenhafte Verständnis des Einflusses komplizierter photochemischer Prozesse auf den Strahlungshaushalt wird ständig erweitert und modifiziert.

Tab. 2: Abschätzungen der Änderung der Temperatur der bodennahen Atmosphäre durch atmosphärische Konzentrationsänderungen von Stoffen, die Einfluß auf die atmosphärische Strahlungsbilanz besitzen (ausgenommen CO₂) (aus: Machta (1983))

Stoff	Konzentrations- änderung (ppb)		Änderung der Ober- flächentemperatur
	von	bis	
Distickoxid (N ₂ O)	300	600	0.3-0.4
Methan (CH ₄)	1500	3000	0.3
CFC-11 (CFC1 ₃)	0	1	0.15
CFC-12 (CF ₂ Cl ₂)	0	1	0.13
CFC-22 (CF ₂ HCl)	0	1	0.04
Kohlenstoff Tetrachlorid (CCl ₄)	0	1	0.14
Kohlenstoff Tetrafluorid (CF ₄)	0	1	0.07
Methyl Chlorid (CH ₃ Cl ₃)	0	1	0.0131
Methylene Chloride (CH ₂ Cl ₂)	0	1	0.05
Chloroform (CHCl ₃)	0	1	0.1
Methyl Chloroform (CH ₃ CCl ₃)	0	1	0.02
Ethylene (C ₂ H ₄)	0.2	0.4	0.01
Schwefeldioxid (SO ₂)	2	4	0.02
Ammoniak (NH ₃)	6	12	0.09
Troposphärisches Ozon (O ₃)	+))	+))	0.9
Stratosphärischer Wasserdampf (H ₂ O)	3000	6000	0.6

+) Abhängig von der geographischen Breite und der Höhe

5. Potentielle Folgewirkungen von globalen bzw. regionalen Temperaturerhöhungen

Globale und regionale Temperaturerhöhungen würden eine Reihe von Folgewirkungen nach sich ziehen, von denen das Abschmelzen der arktischen und antarktischen Eismassen und das Ansteigen des Meeresspiegels die am häufigsten diskutierten sind. Durch ein Abschmelzen des arktischen Treibeises würde der Meeresspiegel überhaupt nicht beeinflusst werden, da das arktische Treibeis mit dem Meer im Schwimmgleichgewicht steht /Flohn 1980/, wohl aber durch ein Abschmelzen der Eisschilde Grönlands und der Antarktis. Man nimmt jedoch an, daß sich das Abschmelzen dieser Eisschilde über Zeiträume von Hunderten bis Tausenden von Jahren abspielen würde. Diese Zeiträume sind erheblich länger als jene, in denen mit einem Abschmelzen von Schnee und Packeis gerechnet werden muß. Häufig diskutiert wird das Verhalten des Eises in der westlichen Antarktis, das auf einem Felssockel unterhalb des Meeresspiegels liegt. Es wird behauptet, daß eine CO₂-induzierte Erwärmung die schützenden Eisbarrieren abschwächen könnte, so daß das Eis ins Schwimmen käme und schnell abschmelzen würde. Neueste Studien kommen zu der Schlußfolgerung, daß sich das Abschmelzen des westantarktischen Eises ebenfalls erst in Zeiträumen von Hunderten von Jahren vollziehen würde und nicht, wie vereinzelt behauptet, bereits in einigen Jahrzehnten. Ein vollkommenes Abschmelzen des arktischen Treibeises hätte, wie erwähnt, zwar keinen Einfluß auf den Meeresspiegel, die Beeinflussung des Klimas würde aber durch die Verminderung des reflektierten Strahlungsflusses (Albedo) erheblich sein.

Die Erwärmung wird begleitet von Verschiebungen der geographischen Verteilungen verschiedener klimatischer Elemente, wie Niederschlag, Verdunstung und Bodenfeuchtigkeit. Die Variationen dieser Anomalien mit der geographischen Breite und Länge und mit der Jahreszeit sind mindestens so groß wie die global gemittelten Änderungen. Bisher können nur global und zonal gemittelte Werte für die Klimaelemente realistisch simuliert werden.

Aufgrund der geschilderten großen Unsicherheiten in den Erkenntnissen über die Klimaauswirkungen durch anthropogene CO₂-Emissionen empfiehlt es sich, bei Folgenanalysen über die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Land- und Forstwirtschaft, auf die gesamte Volkswirtschaft und auf die allgemeinen Lebensbedingungen zu berücksichtigen, daß solche Analysen auf sehr unsicheren Ausgangspositionen beruhen. Einen interessanten Ansatz zur Durchführung von Folgenanalysen stellt die historische Analyse von Klimaänderungen und ihren Folgen dar.

6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Verschiedene Arbeiten prognostizieren aufgrund von Modellrechnungen, daß sich die CO_2 -Konzentration durch CO_2 -Emissionen bis Mitte des nächsten Jahrhunderts verdoppeln wird und daß damit eine Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur von 1,5 bis 4,5 K verbunden sein wird. Diese Prognosen wurden in Hinblick auf zwei Aspekte überprüft:

- (1) Ist eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre durch CO_2 -Emissionen in den nächsten 70 Jahren überhaupt zu erwarten und, wenn ja, unter welchen Voraussetzungen?
- (2) Wie ist die Aussagekraft der Klimamodelle zu beurteilen, die bisher zur Prognose von Temperaturänderungen aufgrund von Erhöhungen der CO_2 -Konzentration benutzt wurden?

Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Modellrechnungen zum Kohlenstoffkreislauf zeigen, daß bei einem weiteren Wachstum der Biosphäre (Wachstumsfaktor $\beta = 0,1$) selbst bei der hohen Zuwachsrate der Kohlenstoffemissionen aus dem Einsatz fossiler Energieträger von 2,5 %/a keine Verdopplung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre bis Mitte des nächsten Jahrhunderts zu erwarten ist. Bei Annahme eines geringeren, tendenziell auf Null absinkenden Wachstums der Biosphäre und eines Wachstums der Kohlenstoffemissionen aus dem Einsatz fossiler Brennstoffe von 2,5%/a ergeben die Modellrechnungen eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration für den Zeitpunkt Mitte des nächsten Jahrhunderts. Bei Annahme mittlerer und niedriger Zuwachsraten für den Einsatz fossiler Energieträger bzw. der daraus resultierenden Kohlenstoffemissionen wird eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration für den Zeitraum bis Mitte des nächsten Jahrhunderts auch bei geringem Wachstum der Biosphäre nicht erreicht. Dies zeigt die Bedeutung des biologischen Wachstumsfaktors für das Ergebnis der Rechnungen und weist auf die Notwendigkeit hin, den Kohlenstoffkreislauf besser zu untersuchen. Erst aufgrund einer verbesserten Wissensbasis werden belastbare Aussagen möglich sein.

Die bisher für die Prognose von Klimaänderungen eingesetzten Klimamodelle sind mit einer Reihe von Mängeln behaftet. Diese Mängel betreffen insbesondere die ungenügende Behandlung von Wolken, Niederschlägen, orographischen Effekten und des Systems Ozean-Atmosphäre. Ein weiterer Mangel der Klimamodellrechnungen besteht darin, daß die zeitliche Entwicklung der Klimaänderungen nur sehr unzureichend prognostiziert werden kann, da die Vernachlässigung bzw. die stark vereinfachte Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen klimatischen Faktoren von großem Einfluß auf den zeitlichen Verlauf der prognostizierten Temperaturänderungen sind. Rechnungen mit verschiedenen Modellvarianten ergeben große Unterschiede in den zeitlichen Verzögerungen zwischen erhöhten CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre und den Klimaauswirkungen.

Zusammenfassend ist aus den dargestellten Sachverhalten zu schließen, daß im Augenblick sowohl die Aussagen über die Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration aufgrund des Einsatzes fossiler Energieträger als auch die Aussagen über die Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf das Klima mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Bei der Durchführung von Analysen über die Folgen von Klimaveränderungen auf die Land- und Forstwirtschaft, auf die Gesamtwirtschaft und auf die allgemeinen Lebensbedingungen und bei der Interpretation der Ergebnisse solcher Analysen muß daher der Unsicherheit der Ausgangsposition Rechnung getragen werden. Da die potentiellen langfristigen Auswirkungen von Klimaveränderungen jedoch erheblich sein können, stellt eine Intensivierung der Forschung sowohl zum Kohlenstoffkreislauf als auch zu den Klimamodellen eine vordringliche Aufgabe dar.

Neuere Studien beziehen teilweise eine pessimistischere Position zum "CO₂-Problem", als sie in dieser Arbeit eingenommen wird. Es soll hier kurz auf

- die Studie der amerikanischen Environmental Protection Agency (EPA) "Can we Delay a Greenhouse-Warming?" /EPA 1983/,
- die Studie der amerikanischen Akademie der Wissenschaften (NAS) "Changing Climate" /CDAC 1983/ und
- die Studie der KFA Jülich "Auswirkungen von Kohlendioxidemissionen auf das Klima" /KFA 1983/

eingegangen werden. Bei diesen Untersuchungen handelt es sich im wesentlichen um Systematisierungen bzw. Neuinterpretationen bekannten Wissens. Weiterentwicklungen von Methoden und von Datenbasen wurden nur in beschränktem Umfang geleistet. Nur die EPA-Studie weist auf den relativ neuen Aspekt hin, daß nämlich weitere Spurengase, wie Methan, Distickstoffmonoxid und verschiedene Halogenkohlenwasserstoffe, eine ähnliche Wirkung für den Strahlungshaushalt der Erde haben wie CO_2 . Während die EPA-Studie und die KFA-Studie die Gefahr von Klimaveränderungen durch anthropogene CO_2 -Emissionen als sehr hoch einschätzen, bewertet die NAS-Studie diese potentielle Gefahr zurückhaltender. Die KFA-Studie sieht noch Möglichkeiten, durch Sofortmaßnahmen größere Krisen zu vermeiden; die EPA-Studie dagegen betont, daß es unrealistisch sei anzunehmen, durch energiepolitische Maßnahmen könnten die drohenden Klimaveränderungen verhindert oder merklich verzögert werden. Die EPA fordert daher von Politikern und Wissenschaftlern, entsprechende Anpassungsstrategien zu entwickeln. In den Schlußfolgerungen der CDAC-Studie dagegen wird betont, daß auch bei Beachtung der Bedeutung des Problems die vorhandenen Kenntnislücken und Unsicherheiten so hoch einzuschätzen seien, daß noch keine Notwendigkeit für konkrete Handlungen, wie Entwicklung von Vermeidungs- oder Anpassungsstrategien, gesehen werden könne. Sollten solche Strategien einmal notwendig sein, so wird sich ohnehin ein erhebliches Durchsetzungsproblem ergeben, da sich der Verursachungsmechanismus von Klimaauswirkungen durch Spurenelementemissionen global vollzieht, während die konkreten Auswirkungen regional unterschiedlich auftreten. Es werden daher weltweite gemeinsame Aktionen notwendig sein, um einen Zustand zu vermeiden, der eventuell einigen Regionen erhebliche Nachteile, anderen aber Vorteile erbringen wird.

Die oben genannten Studien zeigen eines sehr deutlich: die geforderten verstärkten Forschungsarbeiten können nicht als einzelwissenschaftliche Aktivitäten durchgeführt werden; vielmehr setzt die notwendige Verkettung der vielfältigen ökonomischen, ökologischen, meteorologischen u.a. Aspekte der " CO_2 -Problematik" die Initiierung und Förderung koordinierter Forschungsvorhaben voraus, damit tatsächlich entscheidungsorientierte Empfehlungen gegeben werden können.

Literaturverzeichnis

AKITA, F. and MOSS, D.N.:

Photosynthetic responsive to CO₂ and light by maize and wheatleaves adjusted for constant stomatal apertures. Crop Science 13, pp. 234 - 237, 1973

BACASTOW, R.B. and KEELING, C.D., 1979:

Models to predict future atmospheric CO₂ concentrations. In, Workshop on the global effects of carbon dioxide² from fossil fuels. CONF-770385, U.S. Dept. of Energy, Wahington D.C.

BACASTOW, R.B. and KEELING, C.D., 1981:

Atmospheric carbon dioxide concentration and the observed airborne fraction. In, B. Bolin (ed.), Carbon Cycle Modelling, J. Wiley and Sons, Chichester

BROECKER, W.S., PENG, T.-H. and ENGH, R., 1980:

Modelling the carbon system. In, Proceedings of the carbon dioxide and climate research program conference. CONF-8004110, U.S. Dept. of Energy, Washington D.C.

BOLIN, B., 1981:

Steady state and response characteristics of a simple model of the carbon cycle. In, B. Bolin (ed.), Carbon Cycle Modelling, J. Wiley and Sons, Chichester

CDAC, 1983:

Changing Climate. Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee. National Academy Press, Washington D.C.

CHAMBERLAIN, J.W., FOLEY, H.M., MacDONALD, G.J., AND RUDERMAN, M.A., 1982:

Climate effects of minor atmospheric constituents. In, W.C. Clark (ed.), Carbon Dioxide Review: 1982, Oxford University Press

EPA, 1983:

Can we delay a greenhouse warming? United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C.

GOUDRIAAN, J. and KETNER, P., 1984:

A simulation study for the global carbon cycle, including man's impact on the biosphere. Climatic Change 6 (1984), 167 - 192

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.

LOUCKS, O.L., 1980:

Recent results from studies of carbon cycling in the biosphere. In, Proceedings of the carbon dioxide and climate research program conference. CONF-8004110, U.S. Dept. of Energy, Washington D.C.

KFA, 1983:

Studie über die Auswirkungen von Kohlendioxidemissionen auf das Klima. Kernforschungsanlage Jülich.

MACHTA, L., 1983:

Effects of non-CO₂ greenhouse gases. In, Changing Climate, National Academy Press, Washington D.C.

MOORE, B. et al., 1981:

A simple model for analysis of the role of terrestrial ecosystems in the global carbon budget. In, B. Bolin (ed.), Carbon Cycle Modelling, J. Wiley and Sons, Chichester

OESCHGER, H., U. SIEGELTHALER, U. SCHOTTERER, AND A. GUGELMANN, 1975:

A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. Tellus, 27, 168-192

ROTTY, R.M., 1981:

Data for global CO₂ production from fossil fuels and cement. In, B. Bolin (ed.), Carbon Cycle Modelling, J. Wiley and Sons, Chichester

ROTTY, R.M. and G. Marland, 1980:

Constraints on fossil fuel use. In, W. Bach, J. Pankrath, and J. Williams, Interactions of Energy and Climate. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland

WOODWELL, G.M. HOUGHTON, R.A.:

Biotic influences on the world carbon budget. In: Stumm, W. (ed.), Global Chemical Cycles and their Alternations by Man, Abakon Verlagsgesellschaft 1977

WORLD CLIMATE PROGRAMME:

On the assessment of the role of CO₂ on climate variations and their impact. Report of Joint WMO/CSO/UNEP Meeting of experts, World Meteorological Organisation, Geneva 1981

Anhang

A 1) Die Modellierung des Kohlenstoffkreislaufs

Es wurde ein Modell des Kohlenstoffkreislaufs entwickelt, das es gestattet, die Auswirkungen zukünftiger Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger und aus der Biosphäre zu untersuchen.

Das Gleichungssystem

Die Änderung des Kohlenstoffgehalts in den fünf betrachteten Kompartments wird durch die folgenden Gleichungen beschrieben:

Atmosphäre:

$$\frac{dn_a}{dt} = -k_{am} \cdot (N_{ao} + n_a) + k_{ma} \cdot (N_{mo} + \xi(t)n_m) + k_{sba} \cdot (N_{sbo} + n_{sb}) + k_{lba} \cdot (N_{lbo} + n_{lb}) - F_{asb} + \gamma_{bio}(t) + \gamma_{ff}(t) \quad (1)$$

Kurzlebige Biomasse:

$$\frac{dn_{sb}}{dt} = F_{asb} - k_{sba} \cdot (N_{sbo} + n_{sb}) - k_{sl} \cdot (N_{sbo} + n_{sb}) - \gamma_{bio}(t) \cdot sf \quad (2)$$

Langlebige Biomasse:

$$\frac{dn_{lb}}{dt} = k_{sl} \cdot (N_{sbo} + n_{sb}) - k_{lba} \cdot (N_{lbo} + n_{lb}) - \gamma_{bio}(t) \cdot lf \quad (3)$$

Oberste Mischungsschicht des Ozeans:

$$\frac{dn_m}{dt} = k_{am} (N_{ao} + n_a) - k_{ma} (N_{mo} + \xi n_m) - K \cdot A \frac{\partial}{\partial z} (C_{do} + c_d) / \quad z = 0 \quad (4)$$

Tiefsee:

$$\frac{\partial c_d}{\partial t} = K \frac{\partial^2}{\partial z^2} (C_{do} + c_d) \quad (5)$$

Dabei ist N_{i0} die Kohlenstoffmenge im Reservoir i im Jahr 1860. Es wird dabei von der Annahme ausgegangen, daß sie bis zu diesem Zeitpunkt im Gleichgewicht war.

n_i ist die Abweichung von diesem Gleichgewichtszustand im Reservoir i .

- | | |
|----------------|-----------------------------------------|
| $i, j = a$ | bezeichnet die Atmosphäre, |
| $i, j = m$ | die obere Mischungsschicht des Ozeans, |
| $i, j = d$ | die Tiefsee, |
| $i, j = sb(s)$ | die kurzlebige pflanzliche Biomasse und |
| $i, j = lb(l)$ | die langlebige pflanzliche Biomasse. |

k_{ij} ist die Zeitkonstante für den Transfer vom Kompartiment i nach j ,
 ξ ist der Pufferfaktor, auf den später noch näher eingegangen wird.

Die Bedeutung der anderen Variablen und Konstanten, sowie ihre Werte können Tabelle 1 A entnommen werden.

F_{asb} beschreibt den Kohlenstofffluß aus der Atmosphäre in die kurzlebige pflanzliche Biomasse durch die Photosynthese. Weitere Informationen dazu sind dem Anhang A 2 zu entnehmen.

Von folgendem Ansatz ausgehend

$$F_{asb} = F_{asbo} \cdot \left(\frac{N_{ao} + n_a}{N_{ao}} \right)^\beta \cdot \left(\frac{N_{sbo} + n_{sb}}{N_{sbo}} \right)$$

erhält man durch eine Potenzreihenentwicklung die nach der ersten Summe abbricht

$$F_{asb} = F_{asbo} \cdot \left(1 + \beta \frac{n_a}{N_{ao}} \right) \cdot \left(\frac{N_{sbo} + n_{sb}}{N_{sbo}} \right) \quad (6)$$

in dieser Form geht F_{asb} in das Gleichungssystem ein.

$\gamma_{bio}(t)$ gibt die Kohlenstoffemission der Biosphäre an die Atmosphäre durch Abholzung und Bodennutzung an. Die vorliegenden Kenntnisse über den durch intensive Bodennutzung entstehenden Anteil sind bisher noch nicht hinreichend, um sie in quantitativen Analysen berücksichtigen zu können. γ_{bio} wird daher im vorliegenden Ansatz nur auf die kurzlebige und langlebige Biomasse verteilt.

sf und lf geben den Anteil von $\gamma_{bio}(t)$ an, der von der kurzlebigen (sf) bzw. langlebigen (lf) pflanzliche Biomasse stammt. Diese Größen wurden wie folgt angenommen:

$$sf = \frac{N_{sbo} + n_{sb}}{N_{sbo} + n_{sb} + N_{lbo} + n_{lb}}$$

$$lf = \frac{N_{lbo} + n_{lb}}{N_{sbo} + n_{sb} + N_{lbo} + n_{lb}}$$

In den Gleichungen (4) und (5) wird mit

$$c_d(z) = C_{do}(z) + c_d(z)$$

die Kohlenstoffkonzentration in der Tiefsee bezeichnet, wobei C_{do} für die angenommene Gleichgewichtskonzentration im Jahr 1860 und c_d für die Abweichung von diesem Gleichgewicht steht.

z ist die Tiefenkordinate innerhalb der Tiefsee. $z = 0$ ist die Grenze zwischen Mischungsschicht und Tiefsee.

Näherung für den diffusiven Kohlenstofftransport in die Tiefsee

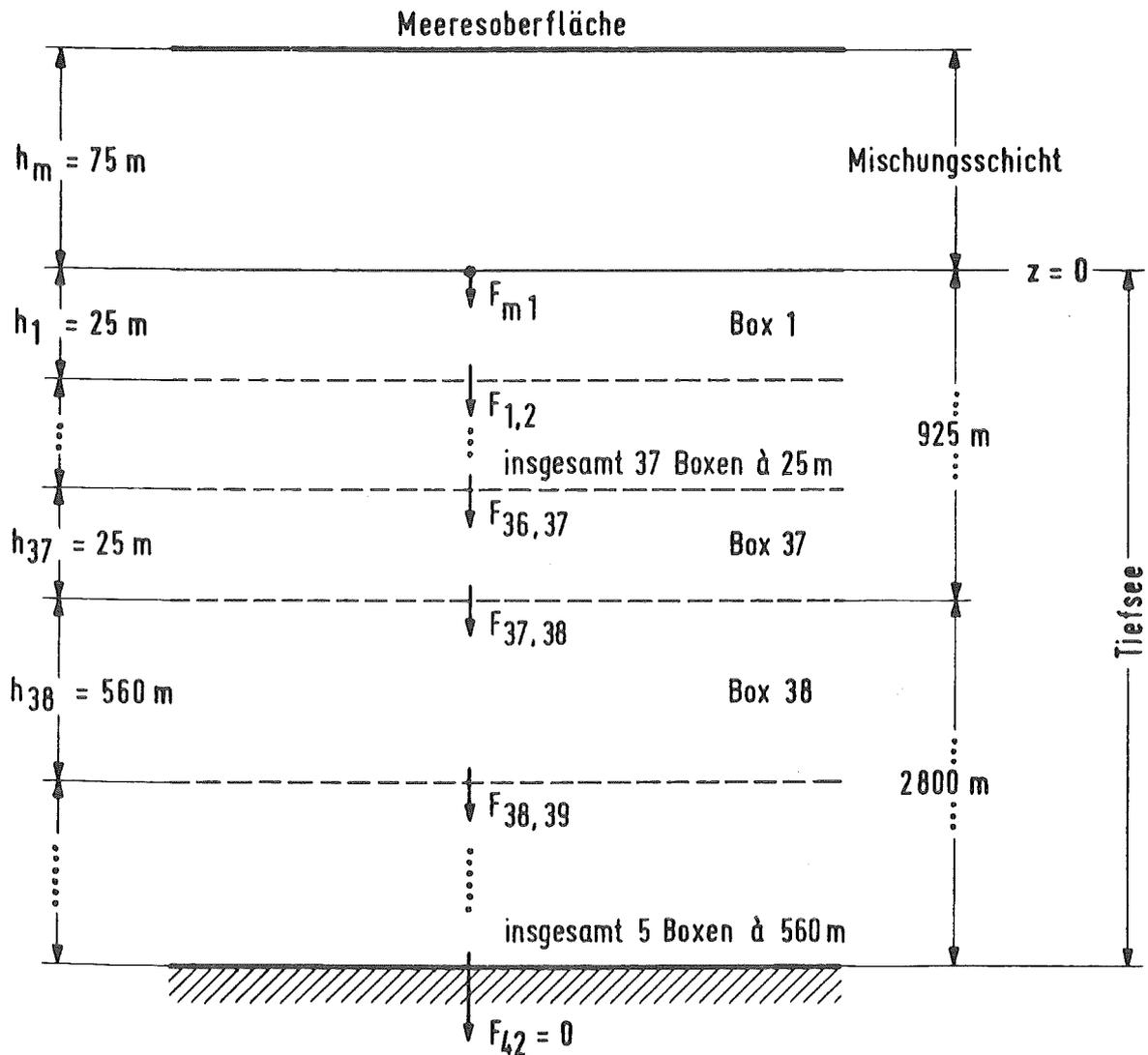
Um die partielle Differentialgleichung (5) in eine einfachere gewöhnliche DGL umwandeln zu können, wird die Tiefsee in Anlehnung an Oeschger et al., 1975 in ein System aus Einzelboxen aufgeteilt. Die Schichtdecke der Boxen beträgt bis 1000 m Tiefe 25 m und bis zum Meeresboden (3800 m) 560 m. Somit besteht der Ozean insgesamt aus 43 Kompartments. Im weiteren wird um die kontinuierliche Diffusion durch 42 diskrete Flüsse zwischen den Boxen beschrieben (Abb. A 1). Das Differentialgleichungssystem wird damit von einem System mit 5 Gleichungen auf ein System mit 46 Gleichungen erweitert.

Für den diffusiven CO_2 -Fluß gilt

$$F(z) = -K \cdot A \frac{\partial C_d}{\partial z}, \quad (7)$$

wobei K die Diffusionskonstante ist und A die Fläche des Ozeans.

Für den Gradienten $\frac{\partial C_d}{\partial z}$ gilt näherungsweise für den Übergang von Box i zu Box j .



$F_{i,j}$ ist der Nettofluß von Box i nach Box j

Abb. A 1: Modellbeschreibung des Kohlenstofftransports im Ozean

$$\frac{\partial C_d}{\partial z} = \frac{C_j - C_i}{\Delta_{ij}} .$$

C_i und C_j geben die Kohlenstoffkonzentrationen in den Boxen i und j , Δ_{ij} gibt den Abstand zwischen den Mittelpunkten der Boxen an.

Mit diesem Ansatz erhält man aus Gleichung (7)

$$F_{ij} \cong K \cdot A \frac{C_i - C_j}{(h_i + h_j)/2} \quad (8)$$

wobei h_i und h_j die Höhen der Boxen i und j sind.

Aus der Kohlenstoffkonzentration C_i kann man leicht die Kohlenstoffmenge in der Box i errechnen:

$$\begin{aligned} C_i &= C_{i0} + c_i \\ &= \frac{N_{i0} + n_i}{A \cdot h_i} \end{aligned} \quad (9)$$

Der Nettofluß F_{ij} von Box i nach Box j wird beschrieben durch

$$F_{ij} = k_{ij}(N_{i0} + n_i) - k_{ji}(N_{i0} + n_i) \quad (10)$$

Da für den Gleichgewichtsfall die folgende Beziehung gilt

$$k_{ij}N_{i0} = k_{ji}N_{j0},$$

läßt sich Gleichung (10) wie folgt umschreiben:

$$F_{ij} = k_{ij} \left(n_i - n_j \cdot \frac{N_{i0}}{N_{j0}} \right). \quad (11)$$

Aus (9) und (11) erhält man damit für den CO₂-Fluß

$$F_{ij} = k_{ij} \cdot A \cdot h_i \left(c_i - \frac{C_{io}}{C_{jo}} c_j \right) \quad (12)$$

Man kann davon ausgehen, daß der Quotient aus den CO₂-Konzentrationen annähernd 1 ist und erhält dann durch einen Vergleich der Ausdrücke (8) und (12) für den Austauschkoefizienten k_{ij} die Abschätzung

$$k_{ij} \cong \frac{2 \cdot K}{h_i(h_i + h_j)} \cdot \quad (13)$$

Mit diesen Näherungen läßt sich der Fluß zwischen zwei aufeinanderfolgenden Boxen i und j der Tiefsee beschreiben durch

$$\begin{aligned} F_{ij} &= \frac{2 \cdot K}{h_i(h_i + h_j)} \cdot A \cdot h_i \cdot \left(c_i - c_j \cdot \frac{C_{io}}{C_{jo}} \right) \\ &= \frac{2 \cdot K}{h_i + h_j} \cdot \left(\frac{n_i}{h_i} - \frac{n_j}{h_j} \cdot \frac{N_{io}}{N_{jo}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Für den Austausch zwischen der Mischungsschicht und der ersten Box reduziert sich Gleichung (14) durch die Annahme, daß die Diffusion erst an der Stelle $z = 0$ (obere Grenze der ersten Box) beginnt zu

$$F_{m1} = \frac{2 \cdot K}{h_1} \cdot \left(\frac{n_m}{h_m} - \frac{n_1}{h_1} \cdot \frac{N_{mo}}{N_{io}} \right) \quad (15)$$

wobei der Index 1 sich auf die erste Schicht der Tiefsee bezieht und h_i die Höhe der Schicht i beschreibt.

Die Änderung des Kohlenstoffgehalts der Tiefsee entsprechend Gleichung (5) ergibt sich für die 1. Schicht zu:

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} &= F_{m1} - F_{12} \\ \frac{dn_1}{dt} &= n_m \cdot \frac{2 \cdot K}{h_1 \cdot h_m} \\ &\quad - n_1 \left[\frac{2 \cdot K}{h_1^2} \cdot \frac{N_{mo}}{N_{10}} + \frac{2 \cdot K}{h_1(h_1 + h_2)} \right] \\ &\quad + n_2 \cdot \frac{2 \cdot K}{h_2(h_1 + h_2)} \cdot \frac{N_{10}}{N_{20}} \end{aligned} \tag{16}$$

Für tiefere Schichten i, j, k:

$$\begin{aligned} \frac{dn_j}{dt} &= F_{ij} - F_{jk} \\ &= n_i \cdot \frac{2 \cdot K}{h_i(h_i + h_j)} \\ &\quad + n_j \cdot \left[- \frac{2 \cdot K}{h_j(h_i + h_j)} \cdot \frac{N_{io}}{N_{jo}} - \frac{2 \cdot K}{h_j(h_j + h_k)} \right] \\ &\quad + n_k \cdot \frac{2 \cdot K}{h_k(h_j + h_k)} \cdot \frac{N_{jo}}{N_{ko}} \end{aligned} \tag{17}$$

Für die Tiefsee werden somit die partiellen Differentialgleichungen durch das System von gewöhnlichen Differentialgleichungen (16) und (17) genähert.

Der Pufferfaktor

Der Pufferfaktor ξ , beschreibt das Verhältnis zwischen der Änderung des Partialdrucks von CO_2 im Meerwasser und der Änderung der gelösten anorganischen Kohlenstoffkonzentration, wenn CO_2 dem Meerwasser zugeführt wird oder austritt. Da der Partialdruck von CO_2 im Meerwasser anwächst, wächst auch der Pufferfaktor an (Bacastow, 1981). Die Abhängigkeit von ξ von der gelösten anorganischen Kohlenstoffkonzentration (C) kann berechnet werden durch die Lösung eines Polynoms 5. Ordnung für die Wasserstoffionenkonzentration als unabhängiger Variablen. Bacastow (1981) hat einen einfachen Algorithmus entwickelt, der den Faktor hinreichend beschreibt. Diese Gleichung wurde im vorliegenden Modell benutzt.

$$\xi = 9,36 + 59,56 x + 4558 x^3$$

mit

$$x = (C - C_0)/C_0$$

wobei C_0 die vorindustrielle gelöste anorganische Kohlenstoffkonzentration beschreibt.

Tabelle 1 A: Die beiden Rechnungen benutzten Werte und ihre Bedeutung

A	=	$3600 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$	Fläche des Ozeans
β	=	0.1	Wachstumsfaktor
C_{do}	=	$2.95 \cdot 10^{-2} \text{ g } \frac{\text{C}}{\text{m}^3}$	Kohlenstoffkonzentration in der Tiefsee im Jahr 1860
K	=	$3987 \frac{\text{m}^2}{\text{a}}$	Diffusionskoeffizient
Austauschkoeffizienten zwischen			
k_{am}	=	$1/7.7 \text{ a}^{-1}$	Atmosphäre und Mischungsschicht
k_{ma}	=	$1/8.375 \text{ a}^{-1}$	Mischungsschicht und Atmosphäre
k_{sba}	=	$1/2 \text{ a}^{-1}$	kurzl. pflanzl. Biomasse und Atmosphäre
k_{lba}	=	$1/46.67 \text{ a}^{-1}$	langl. pflanzl. Biomasse und Atmosphäre
k_{sl}	=	$1/12.67 \text{ a}^{-1}$	kurzl. und langl. pflanzl. Biomasse
Kohlenstoffinventar im Jahr 1860			
N_{ao}	=	$616 \cdot 10^{15} \text{ gC}$	in der Atmosphäre
N_{mo}	=	$670 \cdot 10^{15} \text{ gC}$	in der Mischungsschicht (Ozean)
N_{sbo}	=	$190 \cdot 10^{15} \text{ gC}$	in der kurzl. pflanzl. Biomasse
N_{lbo}	=	$700 \cdot 10^{15} \text{ gC}$	in der langl. pflanzl. Biomasse
Kohlenstofffluß im Jahr 1860 von			
F_{asbo}	=	$110 \cdot 10^{15} \frac{\text{gC}}{\text{a}}$	Atmosphäre zu kurzl. Biomasse
F_{sba}	=	$95 \cdot 10^{15} \frac{\text{gC}}{\text{a}}$	kurzl. Biomasse zu Atmosphäre
F_{lba}	=	$15 \cdot 10^{15} \frac{\text{gC}}{\text{a}}$	langl. Biomasse zu Atmosphäre
F_{slo}	=	$15 \cdot 10^{15} \frac{\text{gC}}{\text{a}}$	kurzl. zu langl. Biomasse

A2) Betrachtungen zum Zusammenhang zwischen dem Wachstum der Biomasse und der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre

Die durchgeführten Rechnungen zum Kohlenstoffkreislauf zeigen einen ausgeprägten Einfluß des angenommenen Wachstumsverhaltens der Biosphäre auf die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Über den genauen Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen ist bisher wenig bekannt. In Gewächshausexperimenten konnte jedoch festgestellt werden, daß bei sogenannten C₃-Pflanzen die Photosynthese durch eine erhöhte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre gesteigert werden kann. C₄-Pflanzen dagegen können auch bei heutigen CO₂-Konzentrationen fast maximale Photosynthese erreichen. C₄-Pflanzen, wie z.B. Mais, Zuckerrohr und viele tropische Gräser sind im allgemeinen dem warmen Klima angepaßt. C₃-Pflanzen, zu denen auch Weizen gehört, sind typischer für die gemäßigten Breiten. Die Trennung ist allerdings nicht eindeutig, so kann man auch in unseren Breiten C₄-Pflanzen finden und umgekehrt. Bei unbeschränkter Wasserverfügbarkeit verursacht eine Verdopplung der CO₂-Konzentration bei C₃-Pflanzen eine Zunahme der Photosynthese von 15 - 20 %, während die Zunahme bei C₄-Pflanzen unwesentlich ist.

Abbildung A2 zeigt den Einfluß von CO₂ auf das Photosyntheseverhalten von zwei Pflanzen unterschiedlichen Typs. Bei gleicher Lichtintensität beträgt die Nettophotosyntheserate von Weizen (C₃-Pflanze) 70 mg CO₂ dm⁻²h⁻¹, bei Mais (C₄-Pflanze) 55 mg CO₂ dm⁻²h⁻¹.

Die Sättigung der Syntheserate tritt bei Mais bei einer niedrigeren CO₂-Konzentration (ca. 450 ppm) als bei Weizen (ca. 850 ppm) auf. Das Wachstum der Pflanzen ist natürlich nur dann möglich, wenn ausreichende Nährstoffvorräte vorhanden sind und wenn andere Umweltfaktoren eine Zunahme der Produktion von organischem Stoff nicht behindern.

Modellbeschreibungen des Kohlenstoffkreislaufs berücksichtigen daher, daß die Photosyntheserate (F_{asb} im vorliegenden Modell) von der Kohlenstoffmenge in der Pflanze (N_{sb}) und von derjenigen in der Atmosphäre (N_a) abhängen. Es gilt der folgende funktionale Zusammenhang:

$$F_{asb} = g_1(N_a) \cdot g_2(N_{sb})$$

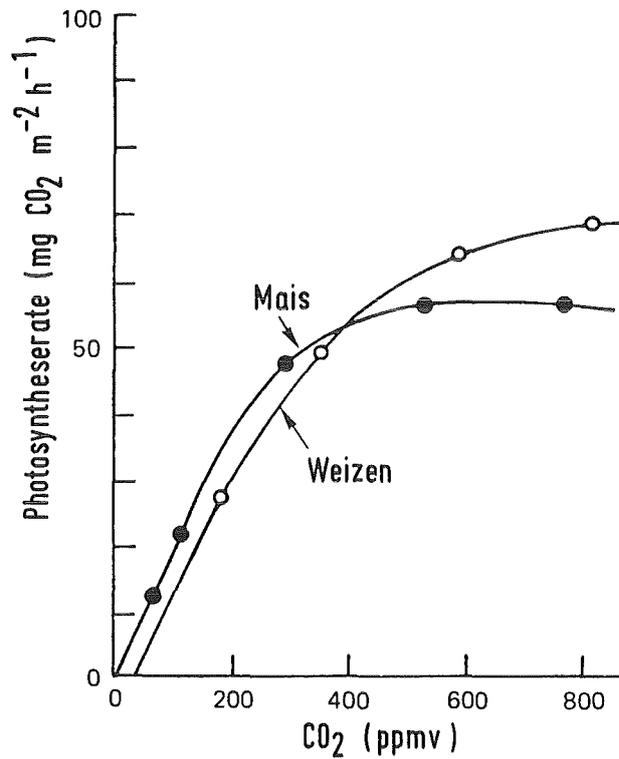


Abb. A2: Zusammenhang zwischen Photosyntheserate und CO₂-Konzentration (aus Akita und Moss, 1973)

Eine ähnliche aufgebaute Beziehung gilt für den Umkehrprozess, die Respiration:

$$F_{sba} = h_1 (N_a) \cdot h_2 (N_{sb})$$

Als erste Näherung für diesen allgemeinen Ansatz hat Keeling (1973), die folgenden Beziehungen vorgeschlagen:

$$F_{asb} = F_{asbo} \cdot \left(\frac{N_a}{N_{ao}} \right)^\beta \cdot \left(\frac{N_{sb}}{N_{sbo}} \right)^{\beta'_{ab}}$$

$$F_{sba} = F_{sbao} \cdot \left(\frac{N_{sb}}{N_{sbo}} \right)^{\beta'_{ba}}$$

Da Photosynthese und Respiration direkt von der Größe der pflanzlichen Biomasse abhängen, haben β'_{ab} und β'_{ba} ungefähr den Wert eins. Die Größe des Exponenten β ist dagegen sehr unsicher und wurde von Keeling (1973) als Variable zur Anpassung benutzt. Dieser Ansatz ist dem hier betrachteten Rechenmodell zugrunde gelegt worden.

In dem Modell von Goudriaan und Ketner (1984) wird der Zusammenhang zwischen biologischem Wachstum und der atmosphärischen CO_2 -Konzentration mittels der sogenannten Nettoprimärproduktivität NPP beschrieben. NPP ist die Differenz zwischen der jährlichen Bruttoassimilation (hier F_{asb}) und der Respiration (hier F_{sba}).

$$\text{NPP} = F_{asb} - F_{sba}$$

Die Dichte von NPP, $\sigma(\text{NPP})$, ist definiert als:

$$\sigma(\text{NPP}) = \text{NPP} / \text{AE}.$$

Dabei ist AE die von Pflanzen bedeckte Fläche (in m^2).

Für das Verhältnis zwischen $\sigma(\text{NPP})$ und der atmosphärischen CO_2 -Konzentration geben die beiden Autoren die folgende Gleichung an:

$$\sigma(\text{NPP}) = \sigma(\text{NPP}_0) \cdot \left(1 + \beta \ln \frac{C_a}{C_{a0}}\right)$$

Dabei ist C_a die aktuelle CO_2 -Konzentration gemessen in ppm und C_{a0} die Konzentration im Gleichgewichtszustand.

Eine weitere Form der letzten Gleichung ist:

$$\frac{d \sigma(\text{NPP})}{dC_a} = \beta \cdot \frac{\sigma(\text{NPP})}{C_a}$$

Goudriaan und Ketner geben verschiedene Werte für β an. Es kann einen Wert von 0 haben, wenn Phosphat begrenzt ist, von 0.3 wenn Stickstoff begrenzt ist und von 0.7 wenn alle Nährstoffe unbegrenzt verfügbar sind. Diese Werte wurden ebenfalls in Gewächshäusern gemessen.

β ist also immer ein spezifischer Wert für bestimmte Bodenverhältnisse und wie schon erwähnt, auch für spezielle klimatische Wachstumsbedingungen und Pflanzentypen. Die Abhängigkeit von all diesen Parametern kann unmöglich in einem praktikablen Modell vom CO_2 -Kreislauf berücksichtigt werden. Es wird daher eine Kategorisierung notwendig sein, die die Angabe mittlerer β s für die landwirtschaftlich genutzten Gebiete (erhöhtes Nährstoffangebot), die nicht landwirtschaftlich genutzten Gebiete und die Wälder der unterschiedlichen Klimazonen möglich macht. Um mit diesem Ansatz sinnvoll arbeiten zu können, müssen zusätzlich Daten über die Größe dieser Gebiete sowie die Kohlenstoffmengen in den dazugehörigen Biomassen vorliegen.