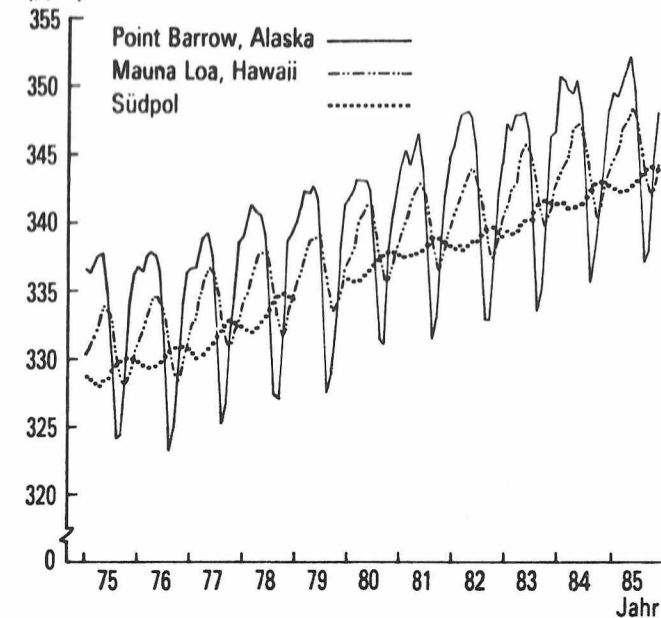


Vom Menschen verursachte Klimaveränderungen

Mittlere Kohlendioxidkonzentration
(ppm)



Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre
während der letzten zehn Jahre

1989

**SOCIETE SUISSE DE PHYSIQUE
SCHWEIZERISCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT
SWISS PHYSICAL SOCIETY**

Vom Menschen verursachte Klimaveränderungen

Verfasst im Auftrag der SPG von
Dr. F. Gassmann und Dr. R. Weber
Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen

Für die SPG:
PD Dr. H.J. Schötzau und Prof. Dr. W. Kündig

1989

Diese Broschüre ist bei der Schweizerischen Physikalischen Gesellschaft,
c/o Physik-Institut der Universität Zürich, Schönberggasse 9, 8001
Zürich erhältlich.

Vorwort

Der Vorstand der Schweizerischen Physikalischen Gesellschaft (SPG) möchte seine Mitglieder mit dem vorliegenden Bericht über Ursachen, wissenschaftlich erhärtete Zusammenhänge sowie mögliche Konsequenzen des Treibhauseffektes informieren und damit einen Beitrag leisten, die Diskussionen um dieses Thema auf eine sachlich fundierte Basis zu stellen.

Beim Beginn des Gletscherrückzugs am Ende der letzten Eiszeit (vor ca. 13'000 Jahren) lebten auf der Erde rund 5 Millionen Menschen, die sich bis zum Beginn unserer Zeitrechnung auf ca. 200 Millionen vermehrten. Die Weltbevölkerung wächst heute um rund 100 Millionen pro Jahr. Sie wird voraussichtlich die 6-Milliardengrenze vor der Jahrtausendwende überschreiten und die 8-Milliardengrenze im Jahr 2020 erreichen. Falls wirksame Geburtenkontrollmassnahmen fehlschlagen, wäre bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gar mit 14 Milliarden Menschen zu rechnen. Der Weltenergieverbrauch, der heute praktisch vollständig auf fossiler Energie beruht und rund 12 TW (1 TW = 10^{12} Watt) beträgt, dürfte in nächster Zeit noch wesentlich schneller als die Bevölkerungszahl anwachsen: Einerseits wächst der Pro-Kopf-Energieverbrauch in den Industrienationen, die 1/4 der Erdbevölkerung umfassen und 3/4 der Energie umsetzen, ständig an, andererseits werden die Entwicklungs- und Schwellenländer versuchen, ihr massives Energiedefizit gegenüber den Industrienationen abzubauen. Gleichzeitig werden sie grosse Anstrengungen unternehmen, um die landwirtschaftliche Anbaufläche drastisch zu vergrössern. Eine Verdoppelung des Weltenergieverbrauchs bis zum Jahre 2020 und eine empfindliche Dezimierung der tropischen Regenwälder sind deshalb realistische und gleichzeitig beängstigende Prognosen.

Der SPG-Vorstand ist der Ansicht, dass Physiker auf der Basis ihres Wissens die grundlegenden Zusammenhänge der Veränderungen der Umwelt erkennen und begreifen können. Das Verständnis dieser Vorgänge ist Voraussetzung sowohl für die Entwicklung von geeigneten Modellen zur Beschreibung der quantitativen Zusammenhänge als auch für die Bewertung von Modellresultaten und deren Umsetzung in die Praxis. Während im erstgenannten Aufgabenbereich, der Mo-

dellentwicklung, nur ein sehr kleiner Prozentsatz der Naturwissenschaftler tätig ist, so fällt im zweiten Bereich jedem einzelnen eine wichtige Rolle in seinem beruflichen und privaten Umfeld zu. Es kann sich zum Beispiel um den persönlichen Einsatz für die Entwicklung umweltschonender Systeme und deren Realisierung handeln oder um die überzeugende Weitergabe der Information an Schüler, Studenten, Mitarbeiter, Freunde und Bekannte. In diesem Sinne möchte der SPG-Vorstand mit dem vorliegenden Bericht in einer gut verständlichen Form die wichtigsten Zusammenhänge und Erkenntnisse erläutern und darüber hinaus zum Studium detaillierterer Arbeiten anregen. Die Autoren Dr. F. Gassmann und Dr. R. Weber haben in Zusammenarbeit mit den Herren Prof. Dr. H. Oeschger und PD Dr. U. Siegenthaler (Universität Bern) versucht, aufgrund neuester wissenschaftlicher Arbeiten auf die wichtigsten Aspekte des Problems einzugehen.

Wir möchten abschliessend darauf hinweisen, dass momentan sowohl in der Schweiz (Programme Climatique "ProClim" der Schweiz. Akademie der Naturwissenschaften, früher SNG) wie auch weltweit (International Geosphere Biosphere Program "IGBP") Anstrengungen unternommen werden, entsprechende wissenschaftliche Programme zu definieren, die anfangs der neunziger Jahre anlaufen sollen. Im Herbst 1990 wird die zweite Weltklimakonferenz in Genf tagen, so dass auf diesen Zeitpunkt hin mit neuen Forschungsergebnissen zu rechnen ist.

Inhalt

1 Klimasystem und Treibhauseffekt	7
2 Aus vergangenen Klimaschwankungen lernen	9
3 Immer mehr klimawirksame Spurengase	12
4 Wie verändert sich das globale Klima?	17
5 Klimaveränderungen mit drastischen Folgen	18
6 Bedeutung der heute sichtbaren globalen Klimaveränderungen	20
7 Herausforderung an Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft	22

1 Klimasystem und Treibhauseffekt

Die Frage der Klimasteuerung durch die atmosphärische CO_2 -Konzentration wird in der Wissenschaft seit mehr als einem Jahrhundert diskutiert. Bereits 1827 hat der bekannte Physiker und Mathematiker J.-B. Fourier [1] auf den Treibhauseffekt der Atmosphäre hingewiesen. Am Ende des letzten Jahrhunderts schätzte S. Arrhenius [2], dass eine Verdoppelung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration eine globale Erwärmung um $4\text{--}6^\circ\text{C}$ bewirken würde.

In den 60er und 70er Jahren wurde die Theorie des Treibhauseffekts verfeinert. Vor allem wurde gezeigt, dass die Energiebilanz auf der Erdoberfläche durch das gekoppelte System Erdoberfläche–Troposphäre–Stratosphäre–Ozean bestimmt wird. Während dieser Zeit wurden auch erste komplexe dreidimensionale Klimamodelle entwickelt.

Der Energiehaushalt der Erde wird durch die einfallende Sonnenstrahlung und die von der Erde emittierte Wärmestrahlung bestimmt. Rund 30% der einfallenden Sonnenenergie wird reflektiert, während 20% in der Atmosphäre und 50% von der Erdoberfläche absorbiert werden. Entsprechend ihrer mittleren Temperatur von 15°C emittiert die Erdoberfläche Wärmestrahlung im Infrarotbereich zwischen etwa 4 und $40\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge. Während die wolkenfreie Atmosphäre für das Sonnenlicht annähernd transparent ist, wird die Infrarotstrahlung von Wasserdampf, CO_2 und Spurengasen absorbiert und remittiert. Wie in Abb. 1 dargestellt ist, erfolgt die Remission sowohl nach oben wie nach unten und steigert dadurch die Temperatur der Erdoberfläche über den Wert, welcher der Absorption und Remission der Sonnenstrahlung allein entspräche. Dieser Erwärmungseffekt wird als Treibhauseffekt bezeichnet. Um ein Strahlungsgleichgewicht zu erreichen, muss sich die Erdoberfläche auf eine Temperatur erwärmen, welche die Emission von Wärmestrahlung entsprechend 115% des einfallenden Sonnenlichts ermöglicht, obschon — wie in Abb. 1 gezeigt — nur 51% des Sonnenlichts von der Erdoberfläche absorbiert wird. Ohne die natürlichen Treibhausgase wäre die Erdoberfläche 33°C kälter. Da die Netto-Absorption der Erdoberfläche auf der kurzwelligen Seite 51% der einfallenden Sonnenenergie beträgt, die Netto-Emission auf der langwelligen Seite hingegen nur rund 20%, werden 31% durch Konvektion an die Atmosphäre übertragen.

Energiehaushalt der Erde

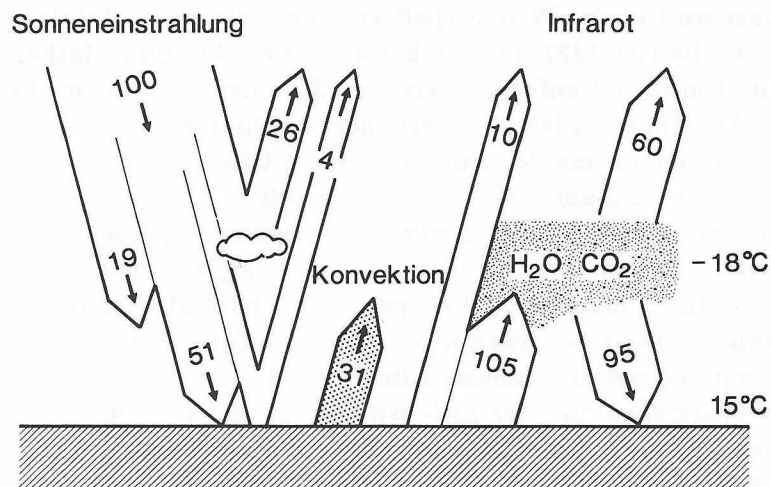


Abbildung 1: Energiehaushalt der Erde; Sonneneinstrahlung am oberen Rand der Atmosphäre = 100 Einheiten. Zusätzlich zur Sonneneinstrahlung erhält die Erdoberfläche Infrarotstrahlung aus der Atmosphäre, etwa 2/3 infolge des Wasserdampfs und 1/3 infolge des CO₂. Dieser Treibhauseffekt erhöht die Temperatur der Erdoberfläche um 33°C auf +15°C gegenüber der vom Weltraum aus gesehenen Ausstrahlungstemperatur der Erde von -18°C [3].

Wird nun die Konzentration von CO₂ und der anderen Spurengase in der Atmosphäre erhöht, so wird zunächst weniger Wärmestrahlung in den Weltraum emittiert. Die Erdoberfläche und die unteren Atmosphärenschichten erwärmen sich und senden mehr Wärmestrahlung aus, bis sich das Gleichgewicht mit der Sonneneinstrahlung wieder neu eingestellt hat.

Detaillierte Rechnungen [4] ergeben, dass sich bei einer CO₂-Verdoppelung zunächst die Wärmeabstrahlung der Erde um etwa 4 W/m² verringert. Um wieder ein Gleichgewicht der Abstrahlung mit der Sonneneinstrahlung zu erreichen, muss sich die Oberflächentemperatur um 1.1°C erhöhen.

Eine Reihe von Rückkopplungseffekten verstärkt die Temperaturerhöhung. So nimmt bei einer Erwärmung die Wasserdampfkonzentration der Atmosphäre und damit der Treibhauseffekt zu. Eine weitere positive Rückkopplung liefert das Abschmelzen von Schnee und Eis (Land- und Meereis), die im Vergleich zu den Oberflächen der Kontinente und der Ozeane eine hohe Albedo (Rückstrahlvermögen) besitzen und wenig Sonnenlicht absorbieren. Ob die Wolken und Aerosole auf Klimaveränderungen verstärkend oder dämpfend wirken, ist noch unklar.

Gemäss Rechnungen mit einer Vielzahl von Klimamodellen dominieren die positiven Rückkopplungseffekte und verstärken die primäre Erwärmung (1.1°C) um einen Faktor 2–4.

2 Aus vergangenen Klimaschwankungen lernen

In der Natur finden in jedem Moment Prozesse statt, welche zu Änderungen der klimatischen Grössen innerhalb grosser Zeiträume führen. Heute gilt als gesichert, dass während der letzten zwei Millionen Jahre ca. 20 Eiszeiten ebensovielen ausgeprägten Warmzeiten gegenüberstanden. Die letzte Warmzeit, das Eem, dauerte ungefähr von 135'000 bis 120'000 v.Chr., die letzte Eiszeit, die Würm-Kaltzeit, von 115'000 bis 11'000 v.Chr. Vor rund 10'000 Jahren fand der Übergang in die jetzige Warmzeit statt. Ablauf und Ergebnisse dieser Klimaveränderungen sind in natürlichen Archiven wie Eis, Moränen, fossilen Böden oder Tiefseesedimenten, Vulkanstaub, Pollen, Luftpfeinschlüssen oder Jahrringen von Baumstämmen überliefert.

Die Verteilung von Spurenelementen und vor allem der Isotope weist auf die Wechselwirkung innerhalb und zwischen den Teilsystemen hin. Lange Zeit wurde in den verschiedenen Forschungsprogrammen versucht, isolierte Komponenten des globalen Klimasystems zu erfassen. Diese sind meist auf die Teilsysteme Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre oder Lithosphäre bezogen. Unsere Kenntnisse der physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse, die diese Systeme verbinden und letztlich einen Schlüssel zum Verständnis des Kli-

masystems bilden, sind noch unvollständig. Erst das Verständnis des Zusammenwirkens der Systeme wird es uns ermöglichen, die Mechanismen zu erkennen, die für die folgenden Klimaereignisse verantwortlich sind:

- In der letzten Warmzeit, dem Eem, vor rund 120'000 Jahren waren die Temperaturen global etwa 1°C höher, in den Eiszeiten rund 5°C tiefer als die langfristigen Mittelwerte in der Nacheiszeit, in der wir heute leben.
- Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre änderte sich zwischen Eiszeit und Nacheiszeit um etwa einen Faktor 1.4 (siehe Abb. 2). Dies ergaben Messungen an altem Polareis, die unter anderem an der Universität Bern durchgeführt wurden [6].
- Im Übergang Eiszeit/Nacheiszeit gab es abrupte Klimawechsel, die in einem Zeitraum von vielleicht zwei Generationen abliefen und durch die Messung von klimabezogenen Parametern gut belegt sind.
- Diese Anzeichen für schnelle Schwankungen traten auch in bestimmten Phasen der letzten Eiszeit auf und deuten darauf hin, dass das Klimasystem unter bestimmten Umständen in einen bistabilen Zustand gerät, der sehr empfindlich auf Störungen reagieren kann.
- Vor 6'000 bis 8'000 Jahren, im sogenannten klimatischen Optimum, setzte eine intensive Vegetations- und Bodenentwicklung ein. Seespiegelschwankungen aus dieser Zeit weisen auf stark schwankende Verhältnisse im Wasserkreislauf hin.
- Die letzten 1'000 Jahre sind von der mittelalterlichen Warmzeit und der sogenannten Kleinen Eiszeit vom ausgehenden 16. Jahrhundert bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts geprägt [7,8,9]. Obwohl diese Klimaschwankungen im Vergleich mit den vorher erwähnten als geringfügig bezeichnet werden müssen, geht aus den geschichtlichen Dokumenten eindeutig hervor, dass sie in der Mitte des 14. Jahrhunderts und in den extremsten Phasen der

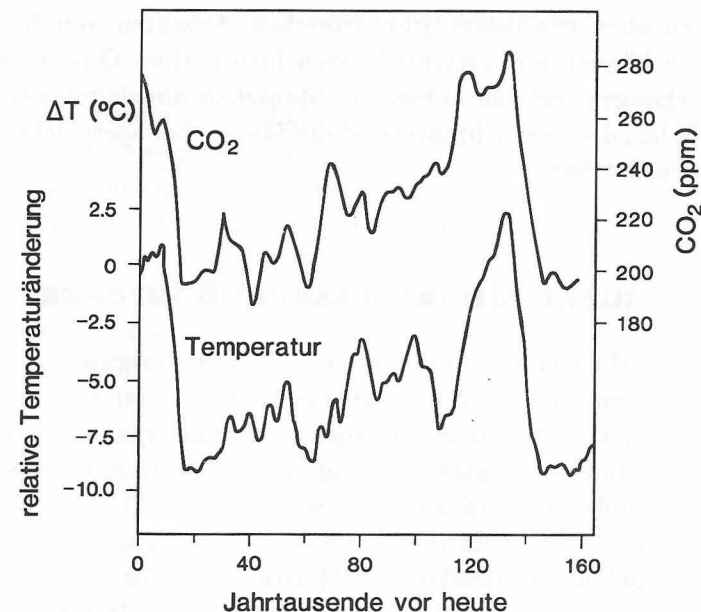


Abbildung 2: CO₂-Konzentration der Atmosphäre (oben) und Temperaturvariation der Eisoberfläche (unten) bezüglich des heutigen Wertes. Zur Rekonstruktion wurden die Daten des Eisbohrkerns der Vostok-Station in der Antarktis verwendet [5]. Die Temperaturen der Eisoberfläche wurden nach der Deuterium-Methode bestimmt.

Kleinen Eiszeit zu einschneidenden Veränderungen der Lebensbedingungen geführt haben.

- Die Klimaanomalien der letzten Jahre sind durch die verbesserten Mess- und Beobachtungstechniken gut belegt. Das aussergewöhnliche Auftreten von warmem Ozeanwasser vor der Küste Perus (El Niño) von 1982–83 ist nach dem heutigen Kenntnisstand mit hoher Wahrscheinlichkeit für den warmen Winter 1982/83 im Osten der Vereinigten Staaten und den extrem trockenen Sommer 1983 in weiten Teilen Europas verantwortlich. Temperaturverschiebungen im Atlantik werden heute mit der Niederschlagsverteilung in der Sahelzone in Verbindung gebracht.

Neben den oben erwähnten physikalischen Aspekten von Klimaveränderungen können aus verschiedensten historischen Quellen auch deren Auswirkungen auf das Leben des Menschen abgeleitet werden. Daraus wird klar, dass der Klimaverlauf die Menschheitsgeschichte wesentlich mitgeprägt hat.

3 Immer mehr klimawirksame Spurengase

Neben den natürlicherweise vorkommenden Treibhausgasen (hauptsächlich Wasserdampf und Kohlendioxid) gewannen in den letzten hundert Jahren auch vom Menschen freigesetzte klimawirksame Gase an Bedeutung. Die fünf wichtigsten anthropogenen Treibhausgase sollen deshalb im Folgenden kurz charakterisiert werden [10,11]. Interessanterweise liegen die Absorptionsbanden von Ozon, Lachgas, Methan und den Chlorfluorkohlenwasserstoffen (CFC) gerade in Fenstern des atmosphärischen Absorptionsspektrums, weshalb diese zum Teil in der Natur nicht vorkommenden Spurengase eine viel stärkere Erhöhung des Treibhauseffekts pro Molekül zur Folge haben als Wasserdampf oder Kohlendioxid. Der Beitrag zur heutigen anthropogenen Erhöhung des Treibhauseffekts ist für die folgenden einzelnen Gase jeweils in Klammern angegeben [10].

Kohlendioxid (CO₂) (55 %): Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist vom vorindustriellen Wert von 280 ppm (1 ppm = 10⁻⁶, Volumenanteil) auf den heutigen Wert von rund 350 ppm angestiegen, wie die Messungen an einem Eisbohrkern aus der Antarktis und direkte atmosphärische Messungen des CO₂-Gehalts auf Hawaii (Abb. 3) zeigen. Dies bedeutet eine bereits heute wesentliche Zunahme von 25 %. Die Messungen auf Hawaii (Abb. 4) zeigen deutlich einen jahreszeitlichen Verlauf und weisen seit 1974 einen Anstieg von 1.4 ppm/y auf. Detaillierte Modellrechnungen zum globalen Kohlenstoffkreislauf [14], welche insbesondere die Aufnahme des atmosphärischen CO₂ durch die Ozeane simulieren, ergeben, dass rund die Hälfte des anthropogen freigesetzten CO₂ in der Atmosphäre verbleibt. Der heutige jährliche Anstieg lässt sich so mit Hilfe einer einfachen Rechnung aus dem welt-

Tabelle 1: CO₂ in der Atmosphäre

Masse der Atmosphäre (kg)	$530'000 \times 10^{13}$
CO ₂ in der Atmosphäre (kg)	280×10^{13}
C-Umsatz durch weltweite Verbrennung fossiler Energieträger (Stand 1986) (kg C/y)	0.55×10^{13}
daraus entstehende Menge CO ₂ (kg CO ₂ /y)	2.0×10^{13}
die Hälfte verbleibt in der Atmosphäre (kg CO ₂ /y)	1.0×10^{13}
dies entspricht einer CO ₂ -Zunahme von	0.36 % /y

weiten Einsatz fossiler Energie bestimmen (Tab. 1).

Neben dieser Übereinstimmung zwischen erwartetem CO₂-Anstieg aufgrund der Nutzung fossiler Energiequellen und den gemessenen Werten zeigen weitere Untersuchungen den direkten Zusammenhang zwischen CO₂-Anstieg und fossiler Energienutzung :

- Die Südhemisphäre hinkt im CO₂-Anstieg der Nordhemisphäre nach, was die Tatsache widerspiegelt, dass CO₂ vorwiegend auf der Nordhalbkugel freigesetzt wird.
- Während der letzten 160'000 Jahre traten nie so hohe CO₂-Konzentrationen auf wie heute (vgl. Abb. 2).

Aufgrund der heute zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Erkenntnisse kann der Zusammenhang zwischen dem globalen CO₂-Anstieg und der Nutzung fossiler Energiequellen nicht mehr angezweifelt werden. Darüber hinaus tragen auch die Brandrodungen der tropischen Regenwälder nach neuesten Schätzungen [11] mit rund 10¹² kg C/y zum CO₂-Anstieg in der Atmosphäre bei.

Chlorfluorkohlenwasserstoffe (CFC, z.B. CF₂Cl₂, CFCl₃) (8 %): CFC werden weltweit in einem Umfang von jährlich rund 10⁶ t als Treibgase für Spraydosen und zum Schäumen poröser Kunststoffe sowie als Betriebsmittel für Kälteanlagen hergestellt. Die rein anthropogenen CFC sind in der Troposphäre chemisch inert, werden also

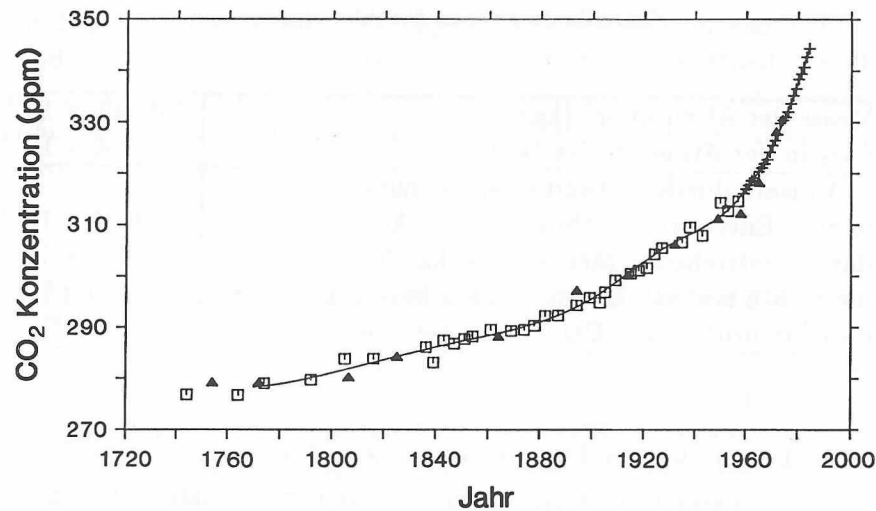


Abbildung 3: Atmosphärischer CO_2 -Anstieg seit 1740, gemäss Messungen an Luftblasen aus einem Eisbohrkern von Siple, Antarktis ($\square$ und $\triangle$) sowie ab 1958 direkten Messungen auf Mauna Loa, Hawaii (+) [12].

weder umgewandelt noch ausgewaschen. Sie reichern sich deshalb in der Troposphäre an und dringen langsam in die Stratosphäre vor, wo sie langsam abgebaut werden und dabei Chlorkradikale freisetzen, welche massgeblich zum Abbau der Ozonschicht beitragen. Die heutige troposphärische Konzentration von rund 0.7 ppb (1 ppb = 10^{-9} , Volumenanteil) wurde während der vergangenen Jahrzehnte vollständig durch den Menschen verursacht. Die Anstiegsrate aufgrund der heutigen CFC-Produktion beträgt ca. 0.05 ppb/y. Die heutige Konzentration wird also selbst bei eingefrorener Produktionsrate innerhalb von etwa fünfzehn Jahren verdoppelt!

Methan (CH_4) (26 %): Die heutige CH_4 -Konzentration in der Atmosphäre ist 2-3 mal höher als während der vergangenen drei Jahrtausende und ist stark mit der Weltbevölkerung korreliert (vgl. Abb. 5). Neben den direkten Emissionen aus Mülldeponien und Verlusten bei der Erdgasgewinnung sind wichtige Quellen biogen: anaerober Abbau von organischem Material durch Bakterien im Wasser von Reisfeldern

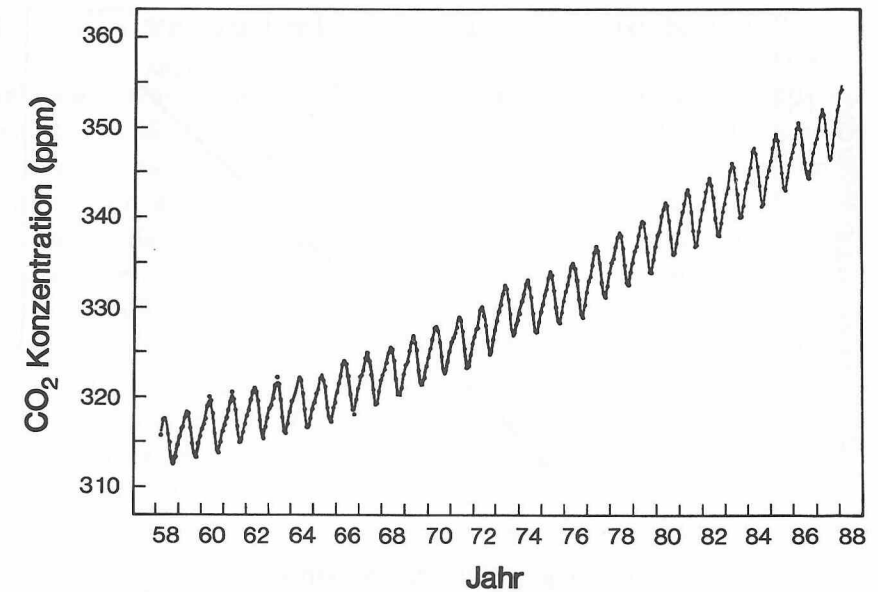


Abbildung 4: Atmosphärische CO_2 -Konzentration gemessen im Mauna Loa Observatorium (Hawaii). Der wellenförmige Verlauf der Monatsmittel ist durch die Aktivität der Biosphäre bedingt: Im Sommer CO_2 -Reduktion aufgrund der Assimilation und im Winter CO_2 -Zunahme durch Verrottung von organischem Material [13].

und anderen Feuchtgebieten, Fermentation in den Därmen von Wiederkäuern (Rindern), d.h. indirekt auch durch den Menschen verursacht [11].

Ozon (O_3) (9 %): Die vorindustrielle Ozonkonzentration ist nicht aus natürlichen Archiven bestimmbar. Im vergangenen Jahrzehnt wurde aber eine deutliche Zunahme in der Troposphäre und eine besorgniserregende Abnahme in der Stratosphäre über der Antarktis (Ozonloch) festgestellt. Ursache der troposphärischen Ozonzunahme sind photochemische Prozesse auf der Basis von Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden aus Verkehr, Industrie und Feuerungen. Die stratosphärische Ozonabnahme wird massgeblich durch die CFC verursacht.

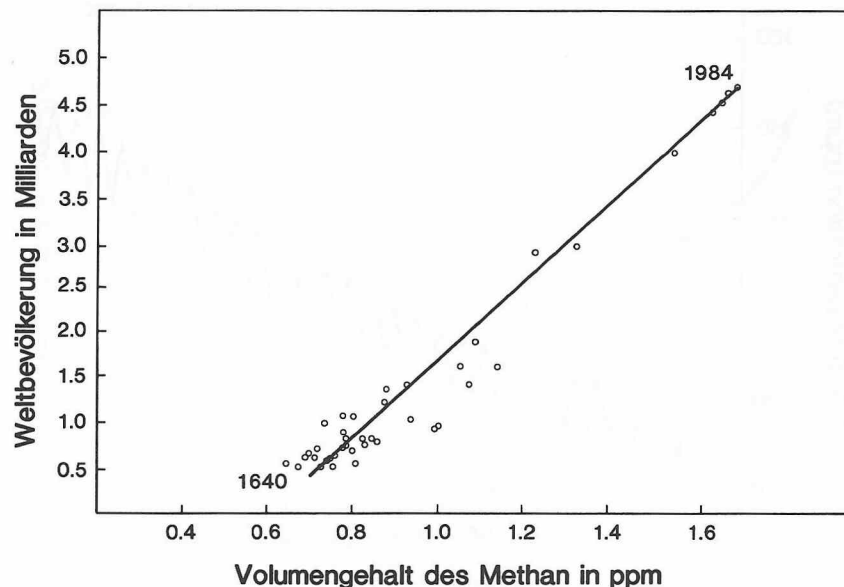


Abbildung 5: Das Wachstum der Weltbevölkerung und die Zunahme der Methankonzentration in der Atmosphäre sind linear miteinander verknüpft [15].

Lachgas (N_2O) (2 %): Die N_2O -Konzentration hat erst seit der Mitte unseres Jahrhunderts von 290 auf 310 ppb zugenommen. Die für die Zukunft befürchtete Zunahme wird durch übermässigen Einsatz von Kunstdünger (mikrobielle Zersetzung des überschüssigen Kunstdüngers) sowie durch die Verbrennung von Biomasse und fossilen Brennstoffen verursacht.

Die Konzentrationen aller wichtigen, vom Menschen verursachten Treibhausgase erreichen heute relevante Werte im Vergleich zu den natürlicherweise vorkommenden Konzentrationen. Deshalb sind anthropogen verursachte Veränderungen des Klimas zu erwarten, die sich im selben Rahmen wie natürliche Schwankungen bewegen oder sogar darüber hinausgehen.

4 Wie verändert sich das globale Klima?

Bei einem Wachstum der CO_2 -Emission von 2% pro Jahr würde sich der atmosphärische CO_2 -Gehalt etwa bis zum Jahr 2050 gegenüber dem vorindustriellen Wert von 280 ppm verdoppeln. Wie oben erwähnt, wird die Erhöhung des Treibhauseffekts durch einen Konzentrationsanstieg anderer Gase beschleunigt. Die Gesamtheit der Spurengase verstärkt den Effekt des CO_2 ungefähr um den Faktor zwei. Unter Berücksichtigung des heutigen Trends für den Konzentrationsanstieg dieser Gase wird eine Erhöhung des Treibhauseffekts, welcher einer CO_2 -Verdoppelung entspricht, bereits für das Jahr 2030 berechnet. Aufgrund der Trägheit des Systems Erde (Wärmekapazität des Ozeans) wird sich diese aber erst etwa im Jahre 2050 voll auswirken.

Die durch die Erhöhung des Treibhauseffekts sich einstellende globale Klimaveränderung wird oft für das Äquivalent einer CO_2 -Verdoppelung abgeschätzt. Rechnungen mittels einer ganzen Hierarchie von Modellen verschiedener Komplexität [16] liefern für diesen Fall Resultate von globalen Temperaturerhöhungen im Bereich von 1.5–4.5°C.

Viel Beachtung finden Prognosen der zur Zeit wohl auf dem höchsten Stand der Forschung stehenden Modelle des Goddard Institute for Space Studies (GISS), New York, des Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), Princeton, und des National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, bei welchen eine dreidimensional gerechnete Atmosphäre mit einem einfachen Ozeanmodell gekoppelt ist. Trotz verschiedenen Annahmen stimmen die Modelle in Bezug auf die Grösse der zu erwartenden Veränderungen überein. Gemittelt über die Erdoberfläche prognostizieren alle drei Modelle einen mittleren Temperaturanstieg auf der Erdoberfläche von 3.5–4.2°C. Für eine Höhe von 25 km wird dagegen, bedingt durch die erhöhte Abstrahlung durch das dort vorhandene CO_2 , eine Temperaturabnahme von 4–8°C vorhersagt.

Was die Voraussage der regionalen Verteilung der Temperaturänderungen betrifft, unterscheiden sich die verschiedenen Modelle quantitativ recht stark, stimmen aber qualitativ gut überein. Für höhere Breiten wird eine grössere Änderung der Jahresmitteltemperatur und eine stärkere jahreszeitliche Abhängigkeit der Erwärmung (ausgeprägter Temperaturanstieg im Winter) prognostiziert als für äquatoriale

Gebiete. Im Bereich der die Schweiz enthaltenden Gittermasche 5° – 15° Ost, 45° – 55° Nord ergeben die Modelle für die mittlere Sommertemperatur Erhöhungen um 0 – 6°C , für die mittlere Wintertemperatur solche von 4 – 8°C .

Mit der Erwärmung wäre im Mittel eine Zunahme der Niederschläge zu erwarten, die durch eine erhöhte Verdunstung verursacht ist. Die Prognosen der oben erwähnten "General Circulation Models", welche regionale Voraussagen machen, weisen auf grössere Trockenheit im Innern der Kontinente hin.

Allerdings werden in allen numerischen Klimamodellen der Wärmetransport durch den Ozean, welcher die Erwärmung der Erdoberfläche verzögert, sowie die Veränderungen der Wolkendecke und entsprechende Albedoveränderungen, der Einfluss der Aerosole und der Biosphäre nur ungenügend erfasst. Daneben sind auch positive Rückkopplungsmechanismen durch den Ozonabbau in der Stratosphäre infolge der dortigen Abkühlung denkbar [17].

5 Klimaveränderungen mit drastischen Folgen

Die vorhergesagte Erwärmung der Erdoberfläche, welche in polaren Gebieten besonders ausgeprägt sein dürfte, wird einen Teil der Eismassen abschmelzen lassen. Ein vollständiges Abschmelzen des ganzen Festlandeises würde einen Anstieg des Meeresspiegels um etwa 70 m bewirken. Ein Abschmelzen des Grönlandeises allein ergäbe einen Anstieg von 6 m.

Abschätzungen weisen darauf hin, dass bei einer Erwärmung um 1.5 – 4.5°C ein Anstieg des Meeresspiegels von 25–165 cm zu erwarten ist. Obwohl dies erst im Zeitraum einiger Dekaden vorhergesagt wird, ist zu bedenken, welche Auswirkungen solche Veränderungen auf die Küstengebiete der Erde hätten.

Im Zeitraum von 10–20 Jahren könnten sich Veränderungen auf die Niederschlagsverteilung auswirken. Numerische Simulationen [18] sagen trockenere Böden in den gemässigten Breiten voraus, was weitreichenden Einfluss auf den Wasserhaushalt und damit auf die Vegetation hätte.

Daneben hat das CO_2 einen direkten Einfluss auf die Vegetation, da das Wachstum der Pflanzen durch das Angebot von Licht, CO_2 , Wasser und weiteren Nährstoffen bestimmt wird. Ein höherer atmosphärischer CO_2 -Gehalt kann, falls die anderen Randbedingungen gleich bleiben, zu einem intensiveren Wachstum führen. Auch kann sich die Resistenz gegen Trockenheit erhöhen, da sich die Spaltöffnungen wegen des erhöhten CO_2 -Angebots weniger öffnen werden. Durch die gesamthaft veränderten Umweltbedingungen werden die verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlich beeinflusst, und die Diversität der Vegetation kann sich ändern. Es ist fraglich, ob die positiven Effekte der CO_2 -Düngung bei möglicherweise stark verändertem Wasserhaushalt zum Tragen kommen werden. Schwierig vorauszusagen sind auch die Auswirkungen auf das diffizile biologische Gleichgewicht zwischen Nützlingen und Schädlingen.

Viel Beachtung haben im Laufe der letzten Jahre die Beobachtungen schneller Schwankungen des Klimasystems [19,20] in der Grössenordnung mehrerer Grad Celsius innerhalb weniger Jahrzehnte gefunden. Derartige Klimaschwankungen wurden am Ende der letzten Eiszeit durch Analysen der Isotopenzusammensetzung im Grönlandeis, aber auch, synchron dazu, in europäischen Seesedimenten beobachtet. Studien an Sedimenten aus dem Nordatlantik weisen eindeutig darauf hin, dass diese Klimaveränderungen mit Schwankungen der räumlichen Ausdehnung des Kaltwasserkörpers im Nordatlantik, der das Klima Europas ganz wesentlich beeinflusst, verknüpft sind. Diese Beobachtungen zeigen uns, dass kurzfristige Änderungen der Ozeanzirkulation auf das Klima der Kontinente starke Auswirkungen haben.

Man zieht daher bei Klimaprognosen immer mehr auch mögliche rapide Entwicklungen in Erwägung, die durch das Umkippen der Systeme (wie eine Umlenkung des Golfstromes oder eine Änderung der Monsunzyklen) bedingt sind.

Für die Schweiz wären die Folgen der Klimaveränderungen in den nächsten 20 Jahren (leichte Temperaturerhöhung und Änderung der Niederschlagsverteilung) sicher verkraftbar. Anders sieht es hingegen aus mit den globalen Auswirkungen. Werden die Trockengürtel der Erde auch nur geringfügig verschoben, so werden damit Millionen von Menschen ihrer Existenzgrundlage beraubt. Da heute auf der dicht-

besiedelten Erde kein Raum zum Ausweichen mehr besteht, sind entsprechende soziale und politische Spannungen zu befürchten. Erleidet die amerikanische Landwirtschaft durch die erwarteten Änderungen der Temperatur- und Niederschlagsverteilung Mindererträge, so sind einschneidende weltwirtschaftliche Folgen zu erwarten. Die Schweiz kann sich demzufolge nicht als Insel sehen, die von den wirtschaftlichen, sozialen und politischen Spannungen der restlichen Erde ausgenommen wird.

6 Bedeutung der heute sichtbaren globalen Klimaveränderungen

Es gibt heute starke Indizien dafür, dass der weltweit beobachtete Temperaturanstieg des vergangenen Jahrhunderts mit der Erhöhung der Konzentration der Treibhausgase korreliert ist. Abbildung 6 zeigt neueste Rekonstruktionen der Erdtemperatur seit 1860 [21]. Es ist ein mittlerer Temperaturanstieg von rund 0.5°C festzustellen; auch hatten wir zwischen 1980–88 die sechs wärmsten Jahre seit 1860 [22]. Der Temperaturverlauf zeigt jedoch dem Anstieg überlagerte Variationen, vermutlich bedingt durch Vulkanausbrüche, Änderungen von Sonnenparametern, aber auch mögliche interne Änderungen des Systems Erde, wie Schwankungen der Ozeanzirkulation. Wichtig ist auch, dass durch die Wärmekapazität des Ozeans der globale Temperaturanstieg um etwa zwei Jahrzehnte verzögert wird, und dieser damit im Gleichgewicht höher wäre. Die anthropogene Veränderung der globalen Temperatur von 1860 bis heute beträgt, unter Berücksichtigung dieses Effekts, $0.5\text{--}0.8^{\circ}\text{C}$.

Im Gegensatz zum globalen Temperaturanstieg stimmt die regionale Verteilung der Erwärmung, wie sie durch Klimamodelle berechnet wird, schlecht mit den in den letzten 25–35 Jahren gemessenen Daten überein [23].

Einiges Aufsehen erregten in den letzten Jahren extreme klimatische Ereignisse, wie Dürren im Südosten und mittleren Westen der Vereinigten Staaten von Amerika, Überschwemmungen u.a. in Bangladesh, aussergewöhnlich starke Niederschläge im Alpengebiet 1987 oder

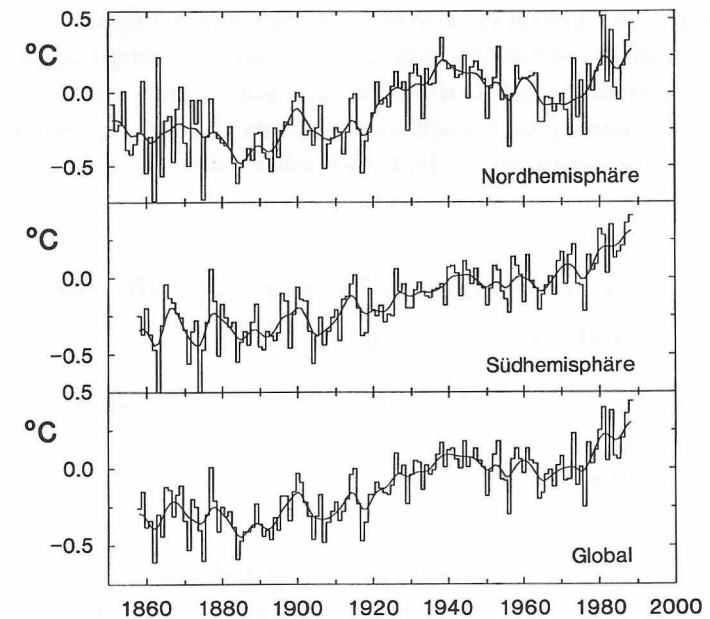


Abbildung 6: Landgestützte Jahresmittelwerte der Oberflächentemperatur der Nordhalbkugel (oben), der Südhalbkugel (Mitte) und global (unten). Alle Reihen sind als Abweichungen vom Mittelwert der Referenzperiode 1951–70 gezeichnet. Glatte Kurven zeigen geglättete Werte [21].

der trockene Winter 1989 in Mitteleuropa. Ob diese allerdings Anzeichen kommender klimatischer Änderungen sind oder im Rahmen natürlicher Schwankungen liegen, ist eine bislang offene Frage.

Messungen in Alaska [24] zeigen eine Erwärmung der Permafrostböden um $2\text{--}4^{\circ}\text{C}$ während der letzten Dekaden an, was darauf hinweisen könnte, dass sich die Zunahme des Treibhauseffekts in polaren Gebieten am stärksten auswirkt, wie von den Klimamodellen vorhergesagt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Anstieg der Erdtemperatur seit 1860 etwa den Erwartungen aufgrund der Abschätzungen mittels Klimamodellen für den beobachteten CO_2 - und Spurengasanstieg entspricht. Da die Erdtemperatur jedoch auch natürlichen Schwankungen in derselben Grössenordnung des Temperaturanstiegs unterworfen ist, kann letzterer noch nicht wissenschaftlich streng den

Auswirkungen des Treibhauseffekts zugeschrieben werden.

Da zwischen Prognose und Beobachtung kein Widerspruch besteht, setzt sich immer mehr die Ansicht durch, dass sich der mit dem Treibhauseffekt korrelierte Temperaturanstieg in rund zehn Jahren von den natürlichen Schwankungen eindeutig abheben wird.

7 Herausforderung an Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft

Die folgenden Punkte sind als Denkanstösse zu verstehen, wie der globalen Herausforderung begegnet werden könnte, die von den drohenden Klimaveränderungen ausgeht.

Wissenschaft: Die Wissenschaft ist vor die Aufgabe gestellt, das Wissen um die komplizierten physikalischen, chemischen und biologischen Mechanismen, die das System Erde steuern, zu fördern. Im speziellen gilt es, so rasch als möglich den Einfluss des Menschen auf die Temperatur genau zu messen, um diesen von den natürlichen Schwankungen zu separieren. Eine verbesserte Erfassung der erwarteten Temperaturerhöhung wird vor allem bessere Prognosen zulassen. Damit würde auch die "Global Change"-Problematik der Bevölkerung viel stärker bewusst.

Eine immer wichtigere Rolle werden sodann Studien über die Auswirkungen spielen, da die sich abzeichnenden Klima- und Umweltveränderungen durch geeignete Massnahmen im Energiesektor wohl nurmehr verzögert, jedoch nicht mehr verhindert werden können. Im Vordergrund wird dabei der Zusammenhang Klima – Ökosysteme stehen, der interdisziplinär mit modernen Methoden untersucht werden muss.

Technik: Der weitgehende Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energie stellt Technik und Wirtschaft vor eine epochale, aber prinzipiell nicht unlösbare Aufgabe. Die Entwicklung emissionsarmer Systeme und die Optimierung der Energienutzung wird unsere heu-

tige Energiewirtschaft von Grund auf verändern. Nullenergie-Häuser, Elektroautos, Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Fernheizsysteme, Wasserstoff als Energieträger sind richtungsweisende Beispiele für eine rationelle Energienutzung. Für die Bereitstellung von Energie ohne CO₂-Emission steht momentan neben der Sonnenenergie (Wasserkraftwerke, Wind, Sonnenkollektoren, Solarzellen, Holz) nur die Kernenergie zur Verfügung. Bei der Betrachtung aller technischen Möglichkeiten zur Entschärfung des Klimaproblems muss aber beachtet werden, dass diese höchstens dann erfolgreich sein können, wenn es gelingt, den Energieverbrauch (weltweit heute ca. 12 TW, entsprechend 2 kW pro Kopf der Weltbevölkerung) drastisch zu senken. Nur so können die erwähnten Massnahmen einen relevanten Beitrag zur Substitution fossiler Energie liefern.

Wirtschaft: Im Hinblick auf Massnahmen zur Entschärfung des Klimaproblems wird sich die Erkenntnis durchsetzen müssen, dass der Weg des quantitativen Wirtschafts- und Bevölkerungswachstums durch ein qualitatives Wachstum zu ersetzen ist [25]. Um die einschneidende Wende im Energiesektor zu ermöglichen, muss in erster Linie eine drastische Senkung des Primärenergieverbrauchs angestrebt werden. Dies wird dadurch erleichtert, dass Investitionen in Einspartetechnologien teilweise eine höhere Rendite als solche in Versorgungstechniken abwerfen [26]. Neue emissionsfreie Energiequellen dürfen jedoch nur so eingesetzt werden, dass die Energienachfrage nicht durch zusätzlich bereitgestellte Energie noch weiter anwächst und damit der Substitutionseffekt hinfällig wird.

Gesellschaft: Das Problem des Anstiegs klimarelevanter Spurengase besitzt weltweites Ausmass. Gelegentlich wird von "Winners und Losers", je nach den zu erwartenden regionalen Auswirkungen, gesprochen. Hochentwickelte Länder werden negative Auswirkungen der zu erwartenden Klimaveränderungen besser auffangen können als solche, die schon heute mit Überlebensproblemen kämpfen.

In der Wissenschaft hat die hier diskutierte Problematik zu einer positiven Entwicklung geführt. Die in diesen Fragen engagierten Wissenschaftler sind auf das Wissen der Kollegen aus anderen Disziplinen angewiesen. Die Programme werden immer internationaler getragen.

Eine ähnliche Entwicklung müsste in der Weltpolitik einsetzen. Eine Neuorientierung an der immer wichtiger werdenden Aufgabe der künftigen Erhaltung eines menschenwürdigen Lebensstandards unter grösstmöglicher Schonung der Umwelt. Nur so wird es möglich sein, den komplexen, globalen Umweltproblemen ohne allzu grosse negative Auswirkungen zu begegnen.

Aus der Erkenntnis, wie komplex die Auswirkungen der menschlichen Eingriffe in die Naturvorgänge sind, muss sich die Einsicht durchsetzen, dass solche Eingriffe in einem minimalen Rahmen gehalten werden müssen. Eine wirksame Strategie zur bestmöglichen Verminderung von Klimaveränderungen erfordert aber, dass die wissenschaftlich-technologischen Erkenntnisse auch von der breiten Öffentlichkeit zur Kenntnis genommen und umgesetzt werden. Wir leben in einer hochtechnisierten Welt und können die auf uns zukommenden Probleme nur in enger Zusammenarbeit mit einer Technik lösen, die sich an den neuen Randbedingungen orientiert, jedoch keinesfalls in Konfrontation mit ihr.

Literaturverzeichnis

- [1] Fourier, J.-B.: *Mémoires sur les Températures du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires*, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France VII, 569 (1824).
- [2] Arrhenius, S.: *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*, Phil. Mag. Ser. 5, 41, (251), 237 (1896).
- [3] Siegenthaler, U.: *Causes and Effects of Natural CO₂ Variations during the Glacial-Interglacial Cycles*, Lecture Notes in Earth Sciences 16, 153 (1988).

- [4] Lal, M., Ramanathan, V.: *The Effects of Moist Convection and Water Vapor Radiative Processes on Climate Sensitivity*, J. Atmosph. Sci. 41, 2238 (1984), und Kiehl, J.T., Ramanathan, V.: *Radiative Heating Due to Increased CO₂. The Role of H₂O Continuum Absorption in the 12-18 μ m Region*, J. Atmosph. Sci. 39, 2923 (1982).
- [5] Barnola, J.M. et al.: *Vostok ice core provides 160'000-year record of atmospheric CO₂*, Nature 329, 408 (1987).
- [6] Neftel, A., Oeschger, H., Staffelbach, T., Stauffer, B.: *CO₂ record in the Byrd ice core 50'000N-5'000 years BP*, Nature 331, 609 (1988).
- [7] Pfister, C.: *Klimageschichte*, p.48 in *Das Klima, seine Veränderungen und Störungen*, Jahrbuch der SNG 1983.
- [8] Zumbühl, H.J., Holzhauser, H.: *Alpengletscher in der Kleinen Eiszeit*, Die Alpen 64, Sonderheft 1988.
- [9] Lamb, H.H., *Weather, Climate and Human Affairs*, (New York, 1988).
- [10] Dickinson, R.E., Cicerone, R.J.: *Future Global Warming from Atmospheric Trace Gases*, Nature 319, 109 (1986).
- [11] *Schutz der Erdatmosphäre: Eine internationale Herausforderung*; Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages, Deutscher Bundestag, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn 1988.
- [12] Friedli, H. et al.: *Ice Core Record of the ¹³C/¹²C Ratio of Atmospheric CO₂ in the Past Two Centuries*, Nature 324, 237 (1986).
- [13] Keeling, C.D., Whorf, T.P., Heimann, M., Mook, W.G.: *A 3-Dimensional Model of the Atmospheric CO₂ Transport Based on Observed Winds, 1.*, AGU Monograph Time Series in the Pacific (PACCLIM), ed. D. Peterson, in press.
- [14] Siegenthaler, U., Oeschger, H.: *Predicting Future Atmospheric Carbon Dioxide Levels*, Science 199, 388 (1978).
Oeschger, H. Heimann, M.: *Uncertainties of Predictions of Future Atmospheric CO₂ Concentrations*, J. Geophys. Res. 88C, 1258 (1983).
- [15] Bolin, B., Döös, B.R., Jäger, J. und Warrick, R.A.: *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems*, Scope 29 (1986).
- [16] Schlesinger, M.E.: p.653 und Mitchell, J.F.B.: p.1009 in *Physically-Based Modelling and Simulation of Climate and Climatic Change*, Part II, NATO ASI Series C: Vol. 243 (1988).
Schlesinger, M.E.: *Equilibrium and Transient Climatic Warming Induced by Increased Atmospheric CO₂*, Climate Dynamics 1, 35 (1986).

- [17] Kerr, R.A.: *Ozone Hole Bodes Ill for the Globe*, Science **241**, 785 (1988).
- [18] Manabe, S. und Wetherald, R.T.: *Large-Scale Changes of Soil Wetness Induced by an Increase in Atmospheric Carbon Dioxide*, J. Atmos. Sci. **44**, 1211 (1987).
- [19] Oeschger, H. et al.: *Late Glacial Climate History from Ice Cores*, Geophysical Monograph **29**, 299 (1984).
- [20] Broecker, W.S.: *Unpleasant Surprises in the Greenhouse?*, Nature **328**, 123 (1987).
- [21] Jones, P.D.: *Hemispheric Surface Air Temperatures Variations: Recent Trends and an Update to 1987*, J. Climate **1**, 654 (1988), neueste Daten: persönliche Mitteilung.
- [22] Hansen, J. und Lebedeff, S.: *Global Trends of Measured Surface Air Temperature*, J. Geophys. Res. **92D**, 13345 (1987); und *Global Surface Air Temperatures: Update Through 1987*, Geophys. Res. Lett. **15**, 323 (1988).
- [23] Barnett, T.P. und Schlesinger, M.: *Detecting Changes in Global Climate Induced by Greenhouse Gases*, J. Geophys. Res. **92D**, 14772 (1987).
- [24] Lachenbruch, A.H. und Marshall, B.V.: *Changing Climate: Geothermal Evidence from Permafrost in the Alaskan Arctic*, Science **234**, 689 (1986).
- [25] *Qualitatives Wachstum* Bericht der Expertenkommission des Eidg. Volkswirtschaftsdepartementes, Bundesamt für Konjunkturfragen Studie Nr. 9 (1985).
- [26] zitiert nach International Energy Agency: *Energy Conservation in IEA Countries*, OECD, IED, Paris, 1987 in Bach, W. in *Energie und Kohlendioxid*, Expertengruppe Energieszenarien, Schriftenreihe Nr. 24, EDMZ.