

Die wichtigsten Erkenntnisse zum Treibhaus-Problem

Fritz Gassmann, Paul Scherrer Institut, Villigen PSI

Die Physik des Treibhauseffektes ist mit Hilfe einfacher Relationen qualitativ und quantitativ begreifbar. Es lassen sich damit die wissenschaftlichen Schlussfolgerungen der Weltklimakonferenz 1990, die mit dem IPCC-Bericht identisch sind, nachvollziehen sowie deren Schwachstellen diskutieren. Insbesondere könnte sich herausstellen, dass die Prognosen über die kommende Klimaveränderung nach oben korrigiert werden müssen. Aber auch ohne eine solche Verschärfung des Problems wird aufgrund paläoklimatischer Erkenntnisse klar, dass es sich um eine drastische Veränderung des globalen Klimasystems in ungeheurer kurzer Zeit handelt. Weiter legt der Verlauf der atmosphärischen Kohlendioxid- und Methankonzentrationen sowie der Temperatur über die letzte Eiszeit hinweg nahe, dass das Klimasystem instabil ist und empfindlich auf kleine Störungen reagiert.

Es ist trotz vieler wissenschaftlicher Unsicherheiten heute klar, dass sich der Planet Erde in einer entscheidenden Übergangsphase befindet, die seine Entwicklung in eine lange Zukunft hinein prägen wird. Ob dieser durch den Menschen verursachte Prozess ihm selbst und der ganzen Biosphäre vorteilhaft sein wird, ist äusserst fraglich.

The Most Important Findings Related to the Greenhouse Problem

The physical basis of the greenhouse effect can easily be understood qualitatively and quantitatively by a few simple relations. The scientific conclusions of the World Climate Conference 1990, which are identical with the IPCC report, can be reproduced and critically analysed. We must be aware that the long range climate forecasts probably have to be corrected towards higher temperatures. Even without this possible intensification of the problem, we have to judge future climate change on the paleoclimatological background as dramatic in respect to its amplitude and also to its rate of change. Atmospheric concentrations of carbon dioxide and methane together with temperature variations during the last ice age suggest an instable global climate system amplifying small perturbations.

In spite of many scientific uncertainties, it is clear today, that planet earth is going to execute a major transient having important implications on its development for a very long time. If this anthropogenic process will be in favour of mankind and the whole biosphere is uttermost questionable.

1 Einleitung

Der Treibhauseffekt wurde bereits zu Beginn des vorigen Jahrhunderts durch den berühmten Mathematiker J.-B. J. Fourier postuliert (J.-B. J. Fourier, 1824). Vor rund einhundert Jahren untersuchte S. Arrhenius den Effekt einer CO₂-Verdoppelung in der Erdatmosphäre auf die mittlere Globaltemperatur (die Motivation für seine Arbeiten wurde jedoch nicht durch mögliche anthropogene Veränderungen des Treibhauseffektes gegeben, sondern durch die Frage nach den Ursachen der Eiszeiten; er erkannte jedoch, dass die durch die Industrie emittierte Kohlenstoffmenge den globalen Kohlenstoffkreislauf entscheidend verändern könnte) und errechnete einen mittleren Wert des Klima-Sensitivitätsparameters von 5,4 K (S. Arrhenius, 1896), der erstaunlich nahe am heute

akzeptierten Wertebereich von 1,5–4,5 K liegt (IPCC, 1990). Ein Vergleich der Bestimmung dieses Schlüsselparameters – einmal auf der Basis rudimentärer Kenntnisse über globale geophysikalische Zusammenhänge von Hand durchgeführt und einmal auf der Basis von nur noch mit grossen Rechenanlagen bewältigbaren Datenmengen erarbeitet – wirft bereits ein erstes Licht auf die Komplexität des Problems und legt zugleich die Frage nach dem Erkenntnisfortschritt nahe.

Im vorliegenden Bericht soll versucht werden, den heutigen Stand der Forschung zu charakterisieren sowie die wesentlichen Erkenntnisse aufzuzeigen. Ob diese für die Durchsetzung einschneidender Massnahmen ausreichen? Dieser politisch brisanten Frage soll abschliessend eine Antwort vom wissenschaftlich-philosophischen Standpunkt gegeben werden.

2 Physikalische Grundlagen des Treibhauseffektes

Die Sonne ist die einzige klimarelevante Energiequelle für das Raumschiff Erde. Sie liefert einen sehr gleichbleibenden Energiestrom $Q = 1367,5 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$ (gemessen bei einem mittleren Erdbahnradius), wovon durch Wolken 20%, durch Aerosole und Luftmoleküle 6% und von der Erdoberfläche 4% in den Weltraum reflektiert werden. Die planetare Albedo beträgt also $\alpha = 30\%$, und die durch das System Atmosphäre-Erdoberfläche absorbierte mittlere kurzwellige Strahlungsstromdichte (im Wellenlängenbereich $0,3\text{--}7 \mu\text{m}$) ist demzufolge $Q(1-\alpha)/4 \approx 240 \text{ W/m}^2$. Der Faktor $1/4$ rührt daher, dass die Strahlungsstromdichte $Q(1-\alpha)$ nur auf die der Sonne zugewandte Kreisscheibe πR^2 ($R = \text{Erdradius}$) wirkt, währenddem die gesamte Erdoberfläche $4\pi R^2$ misst. Das Gleichgewicht ist dann erreicht, wenn die thermische Infrarotausstrahlung σT^4 (im Wellenlängenbereich $3\text{--}50 \mu\text{m}$) gleich der mittleren kurzwelligen Einstrahlung wird:

$$Q(1-\alpha)/4 = \sigma T^4 \quad (1)$$

σ ist die Stefan-Boltzmannsche Konstante ($\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$). Die effektive Gleichgewichts-Strahlungstemperatur T wird gemäss dieser Beziehung 255 K oder -18°C .

Aufgrund der vertikalen Verteilung der wichtigsten natürlichen Absorber infraroter Strahlung, die nach dem Kirchhoffschen Emissionsgesetz auch für die Infrarotausstrahlung verantwortlich sind, nämlich in erster Linie Wasserdampf und Kohlendioxid, lässt sich die Höhe der mittleren Strahlungsschicht auf rund 5,5 km über dem Meeresniveau berechnen (J.F.B. Mitchell, 1989). Dies geschieht mit Strahlungstransportmodellen, die gleichzeitig die Ausstrahlung verschiedener Luftschichten sowie die Absorption von Infrarotstrahlung bei deren Durchquerung bestimmen, wobei die komplexe Struktur der Absorptionsbanden sowie die Wolken berücksichtigt werden müssen. Allein die Wol-

ken, die im infraroten Bereich nahezu wie schwarze Körper emittieren, tragen gut die Hälfte zum mit Hilfe von Satelliten extraterrestrisch messbaren Strahlungsstrom bei. Die Wassermoleküle übernehmen deshalb die Hauptrolle bei der Festlegung der Höhe der mittleren Strahlungsschicht, gefolgt von Kohlendioxid an zweiter Stelle sowie weiteren Treibhausgasen (Methan, Fluorchlorkohlenwasserstoffe = FCKW, troposphärisches Ozon und Lachgas = Distickstoffoxid) an dritter Stelle. Die Hauptkomponenten der Atmosphäre, Stickstoff und Sauerstoff, spielen gar keine Rolle, weil die symmetrischen N_2 - und O_2 -Moleküle kein Dipolmoment aufweisen, das mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirken könnte.

Die Lufttemperatur auf der Höhe der mittleren Strahlungsschicht beträgt nach der Standard-Atmosphäre $-20,75^\circ\text{C}$, liegt also sehr nahe bei der effektiven Gleichgewichts-Strahlungstemperatur von -18°C . Zuzufolge des intensiven vertikalen Massenaustausches innerhalb der Troposphäre (Konvektion) stellt sich ein mittlerer vertikaler Temperaturgradient von $-6,5\text{ K/km}$ ein, der stabiler ist als derjenige für trockene Luft ($-9,7\text{ K/km}$), weil die in einem aufsteigenden Luftpaket frei werdende Kondensationswärme dessen Temperatur langsamer absinken lässt. Durch diesen Austauschprozess werden die Temperaturen aller Troposphärenschichten eng mit der Temperatur in Bodennähe verkoppelt, die $-20,75 + 5,5 \cdot 6,5 = 15^\circ\text{C}$ wird.

Vielfach wird die Differenz von 33 K zwischen der bodennahen Lufttemperatur (15°C) und der effektiven Gleichgewichts-Strahlungstemperatur (-18°C) als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet, was nicht ganz korrekt ist, denn ohne Wasserdampf und Kohlendioxid würde das Strahlungsgleichgewicht (1) für eine planetare Albedo von $\approx 40\%$ (für trockenen Sand oder Meereis) eine Oberflächentemperatur von -28°C oder für $\alpha \approx 6,7\%$ (Mond) eine solche von $+1^\circ\text{C}$ ergeben. Je nachdem, wie man sich die Oberfläche eines treibhausfreien Vergleichsplaneten vorstellt, variiert die Grösse des natürlichen Treibhauseffektes in weiten Grenzen. Auf jeden Fall muss der natürliche Treibhauseffekt aber neben der Existenz von Wasser als entscheidend für die Möglichkeit der biologischen Evolution gewertet werden.

Durch eine anthropogene Erhöhung der Konzentrationen infrarotabsorbierender Spurengase wird die Troposphäre opaker für Wärmestrahlung und demzufolge verschiebt sich die mittlere Strahlungsschicht nach oben in eine Region mit tieferer Temperatur. Dadurch wird die Infrarotemission der Troposphäre verkleinert, so dass das Gleichgewicht zwischen Einstrahlung und Ausstrahlung gestört wird. Für alle wichtigen Treibhausgase wurde der entsprechende Netto-Energiezustrom zur Troposphäre im Tropopausenniveau ΔF mit Hilfe von Strahlungstransportmodellen bestimmt. Für Kohlendioxid lautet der Zusammenhang zwischen ΔF und der Konzentration C näherungsweise (IPCC, 1990)

$$\Delta F = 6,3 \ln C/C_0 \quad (\Delta F \text{ in } \text{W/m}^2) \quad (2)$$

Für eine bei den meisten Untersuchungen zugrunde gelegte Verdoppelung des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes ($C/C_0 = 2$) wird $\Delta F_2 = 4.4 \text{ W/m}^2$. Dieser zusätzliche Wärmestrom heizt die Troposphäre um $\Delta T_{2,0}$ auf ($\Delta T_{2,0}$ = primäre Erwärmung ohne Rückkoppelungseffekte), bis die effektive Strahlungstemperatur T wieder ihren Gleichgewichtswert (-18° C) erreicht und ΔF_2 kompensiert

$$\Delta F_2 = \Delta(\sigma T^4) \approx 4\sigma T^3 \Delta T_{2,0} \quad (3a)$$

woraus folgt

$$\Delta T_{2,0} = \Delta F_2 / (4\sigma T^3) = 1,2 \text{ K} \quad (3b)$$

Durch die oben erwähnte konvektive Koppelung der verschiedenen Troposphärenschichten wird die Aufheizspanne $\Delta T_{2,0}$ auch an die Oberflächenschicht übertragen. Durch Veränderungen des troposphärischen Temperaturgradienten kann die Erhöhung der Oberflächentemperatur davon etwas abweichen, was hier jedoch Einfachheit halber vernachlässigt werden soll.

Eine Reihe von Rück- und Gegenkoppelungseffekten modifiziert diese primäre Temperaturerhöhung $\Delta T_{2,0}$. So ist zu erwarten, dass die Wasserdampfkonzentration innerhalb einer sich erwärmenden Troposphäre zunimmt und den Treibhauseffekt verstärkt. Zusätzlich wird durch das Abschmelzen von Meer- und Landeis die Albedo verkleinert, was den Treibhauseffekt ebenfalls verstärkt. Ob Veränderungen der Häufigkeit und Struktur der Wolken auf Klimaveränderungen verstärkend oder dämpfend wirken, ist wohl unsere entscheidendste Kenntnislücke im Zusammenhang mit der anthropogenen Verstärkung des Treibhauseffektes und verursacht den grossen Unsicherheitsbereich in den heutigen Prognosen.

Gemäss Rechnungen mit verschiedenen dreidimensionalen Klimamodellen dominieren die positiven Rückkoppelungseffekte und verstärken die primäre Erwärmung $\Delta T_{2,0}$ um einen Faktor $\beta \approx 2 \dots 4$, so dass der sogenannte Klimasensitivitätsparameter $\Delta T_2 = \beta \Delta T_{2,0}$ nach diesen Modellen einen Wert von etwa $2,4 \dots 4,8 \text{ K}$ erhält. Rechnungen mit eindimensionalen Strahlungs-Konvektionsmodellen, die den Zusammenhang zwischen den Reflexionseigenschaften und dem Wassergehalt der Wolken wesentlich detaillierter berücksichtigen, als dies mit dreidimensionalen Zirkulationsmodellen möglich ist, legen jedoch einen Wert des Rückkoppelungsfaktors deutlich unterhalb von $\beta = 2$ nahe. Aus diesem Grunde kann der allgemein akzeptierte Bereich des Klimasensitivitätsparameters ΔT_2 von $1,5 \dots 4,5 \text{ K}$ («beste Schätzung» $2,5 \text{ K}$) vorläufig beibehalten werden (IPCC, 1990).

Der Klimasensitivitätsparameter bezieht sich auf den stationären Gleichgewichtszustand einer Atmosphäre mit doppeltem vorindustriellem Kohlendioxidgehalt ($2 \cdot 280 = 560 \text{ ppmv}$). Aufgrund der engen Kopplung der Troposphäre mit den Ozeanen gestaltet sich der dynamische Ablauf der Erwärmung jedoch

nicht einfach proportional zum Kohlendioxidgehalt.

Erstens wird die Erwärmung durch die thermische Trägheit der Ozean-Oberflächenschicht verzögert (die Wärmekapazität der Atmosphäre entspricht derjenigen von 2,5 m Wasser und kann vernachlässigt werden). Die dynamische Gleichung für die mittlere Globaltemperatur lautet für eine Störung ΔF

$$c \dot{T} = Q(1-\alpha)/4 - \sigma T^4 + \Delta F \quad (4a)$$

oder formuliert mit Hilfe der Abweichung ΔT von der Gleichgewichtstemperatur und mit Berücksichtigung des Rückkoppelungsfaktors β sowie des Tiefenwasserbildungsfaktors χ (siehe unten)

$$c \Delta \dot{T} = \Delta F(1-\chi) - 4\sigma T^3 \Delta T / \beta \quad (4b)$$

Bei einer sprunghaft einsetzenden und hernach konstanten Störung ΔF (engl. climate forcing) lautet die Lösung

$$\Delta T(t) = \Delta F(1 - e^{-\lambda t / \beta c}) \beta(1-\chi) / \lambda \quad (5)$$

wobei $\lambda = 4\sigma T^3 = 3,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
 $\beta =$ Rückkoppelungsfaktor
 $\chi =$ Bruchteil der an die Tiefsee abgegebenen Wärme
 $c =$ Wärmekapazität der Meeresoberflächenschicht
 (rund 75m) $\approx 3 \cdot 10^8 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Für $\beta = 1,2 \dots 4$ ergibt sich eine Zeitkonstante $\beta c / \lambda$ von 3...10 Jahren, um die die Erwärmung verzögert wird.

Zweitens muss ΔF mit einem Faktor $(1-\chi)$ multipliziert werden, weil durch die Tiefenwasserproduktion (vorwiegend im Nordatlantik) etwa ein Drittel der an die Meeresoberfläche übertragenen Wärme für längere Zeit (etwa ein Jahrtausend) an die Tiefsee abgegeben wird ($\chi \approx 0,3$).

Mit Hilfe der Relationen (2) und (5) kann die mittlere globale Temperaturerhöhung für vorgegebene Emissionsszenarien abgeschätzt werden. Nach dem «Business as usual»-Szenario (IPCC, 1990), das durch intensivierten Kohleabbau, bescheidene Sparmassnahmen, den Abbrand aller tropischen Wälder und uneingeschränkter landwirtschaftlicher Methan- und Lachgasemissionen charakterisiert wird, muss mit einer Verdoppelung der äquivalenten Kohlendioxidkonzentration (zur Vereinfachung kann man das totale Forcing ΔF der verschiedenen Treibhausgase in Kohlendioxidäquivalenten ausdrücken; dies ist diejenige Kohlendioxidkonzentration, die dasselbe Gesamtforcing ergeben würde) in der Atmosphäre bis etwa zum Jahre 2017 und mit einer Verfünffachung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gerechnet werden. Daraus resultiert nach (2) $\Delta F = 10 \text{ W/m}^2$ und mit $\beta = 2,2$ (entspricht einem mittleren Klimasensitivitätsparameter von 2,5 K) und $\chi = 0,3$ wird ΔT im Jahre 2100 nach (5) rund 4 K, was mit den im

IPCC-Bericht wiedergegebenen 4,3 K gut übereinstimmt. Der Verzögerungsterm in (5) wurde für diese Abschätzung vernachlässigt, da die sich ergebende Zeitkonstante von rund 5 Jahren gegenüber der betrachteten Zeitspanne nicht von Bedeutung ist.

Es ist wichtig festzustellen, dass diese Abschätzung auf einem keineswegs utopischen Szenario beruht, denn weder die vorhandenen Kohlevorräte (diese könnten den vollständigen heutigen Primärenergieverschleiss der Menschheit von ca. 13 TW noch über mindestens 400 Jahre decken) noch die Nahrungsmittelproduktion wirken in diesem Zeitrahmen prinzipiell limitierend.

Drittens muss zusätzlich zu den soeben erläuterten Prozessen mit Rückkopplungen gerechnet werden, die weder im Sensitivitätsparameter noch sonstwie in heutigen Modellen berücksichtigt sind. So wird eine erwärmte Meeresoberflächenschicht weniger Kohlendioxid aufnehmen können, was zu einem noch schnelleren Anstieg der atmosphärischen Konzentration führen wird. Dieser Effekt könnte weiter verstärkt werden durch eine Stabilisierung der Meeresoberflächenschicht durch erhöhte Wassertemperaturen und eine – via Veränderungen der Meereszirkulation und der Niederschlagsverteilung – verringerte Salinität, wodurch die Tiefenwasserbildung reduziert würde. Dadurch könnte sowohl der Abtransport von Kohlendioxid wie auch von Wärme in die Tiefsee stark vermindert werden.

Viele offene Fragen betreffen auch die Reaktionen der Biosphäre sowohl auf dem Land wie in der Meeresoberflächenschicht. Einem möglichen Kohlendioxid-Düngungseffekt, der verstärktes Wachstum und damit eine Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre hervorrufen könnte, stehen Adaptationsprozesse oder sogar eine Freisetzung grösserer Methanmengen aus feuchten Böden (Sümpfe, Reisfelder) oder auftauenden Permafrostgebieten gegenüber. Obwohl die damit zusammenhängenden Prozesse noch kaum verstanden werden, liegt die Vermutung nahe, dass ihre Summe den Treibhauseffekt eher verstärken als abschwächen wird (IPCC, 1990).

Wiederholt man die oben angegebene Schätzung der mittleren Erhöhung der Globaltemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts etwas verantwortungsvoller, wie dies für ein irreversibles globales Experiment angezeigt wäre, müsste man nicht die «beste», sondern eine vorsichtige Schätzung des Rückkopplungsfaktors β verwenden, die eher bei ca. 3 liegen dürfte. Dieser Wert wird auch durch paläoklimatische Untersuchungen gestützt (C. Lorius et al., 1990). Weiter müsste die Möglichkeit der Verminderung der Tiefenwasserbildung sehr ernst genommen werden, was sich in einer Verkleinerung von χ auf etwa die Hälfte ($\chi = 0,15$) niederschlagen könnte. Schliesslich müssten die erwähnten, die Stoffkreisläufe betreffenden Rückkopplungen in Betracht gezogen werden, die eine verstärkte Zunahme der äquivalenten Kohlendioxidkonzentration nach sich ziehen würden. Eine Multiplikation des vorindustriellen Kohlendioxidgehaltes mit dem Faktor 6–7 statt 5 wäre deshalb angezeigt. Mit diesen keineswegs übervorsichtigen Schätzwerten ergäbe sich eine Temperaturzunahme bis ans Ende des kommenden Jahrhunderts von rund 8 K anstelle von 4 K,

was oberhalb der «hohen Schätzung» von 6,3 K im IPCC-Bericht liegt. In Anbetracht der globalen Dimension, der Einmaligkeit und Irreversibilität des zu erwartenden Klimaereignisses sowie der damit verbundenen Unwägbarkeiten und Risiken müssen die oben erwähnten 8 K nicht als eine «hohe Schätzung», sondern als eine die Verantwortung der Wissenschaftler gegenüber unserem Planeten miteinbeziehendes bestes Wissen betrachtet werden, das dem politischen Handeln zugrunde gelegt werden muss.

3 Paläoklimatologische Erkenntnisse

Das Klima ist weder eine absolute noch eine konstante Grösse. Anthropogene Veränderungen können deshalb nur durch einen Vergleich mit in der Vergangenheit aufgetretenen natürlichen Schwankungen beurteilt und gewertet werden. Im Bild 1 ist der Verlauf der mittleren Globaltemperatur seit der Zeit der ersten Landpflanzen (Kambrium, 570 Mio. Jahre v.h.) über einer logarithmischen Zeitachse dargestellt. Die Temperaturangaben stammen nur für die letzten zwei Jahrhunderte aus direkten Messungen. Weiter zurückliegende Temperaturen wurden mit Hilfe indirekter Methoden abgeleitet (Mittelalter: Berichte über Zehntenabgaben, Weinlesedaten, Schneetage, Gletschervorstösse etc., früher: Isotopenverhältnisse in Eisbohrkernen und Sedimenten, Pollenanalysen, Dendrochronologie). Auch wenn bezüglich weit zurückliegender Temperaturangaben Unsicherheiten sowohl in der Datierung wie auch in ihrer globalen Repräsentativität und ihrer Genauigkeit bestehen, so ist doch festzustellen, dass sich vor allem im vergangenen Jahrzehnt aus den verschiedensten Methoden ein immer konsistenteres Bild des Temperaturverlaufes seit der letzten Zwischenzeit (Eem) ergeben hat. Es darf heute als gesichert betrachtet werden, dass im Holozän-Klimaoptimum vor ca. 5000–6000 Jahren die mittlere Globaltemperatur 1–1,5 K höher lag als zu Beginn unseres Jahrhunderts und dass die letzte Zwischenzeit vor rund 125 000–130 000 Jahren mit 1–2 K höherer Temperatur die wärmste Zeit der vergangenen 200 000 Jahre war. Wahrscheinlich war diese Zeit die wärmste im ganzen Quartär (bis ca. 2 Mio. Jahre v.h.) und wurde zum letzten Mal im Pliozän-Optimum (ca. 3,3–4,3 Mio. Jahre v.h.) überboten, als die Mitteltemperatur rund 3 K höher lag als zu Beginn unseres Jahrhunderts. Temperaturen, wie sie uns bis zum Ende des kommenden Jahrhunderts bevorstehen, sind auf dem Globus vermutlich das letzte Mal im Miozän (ca. 9–25 Mio. Jahre v.h.) aufgetreten, in einer Zeit, wo sich der Vorfahre des Menschen noch nicht vom Ahnen der Schimpansen und der Gorillas abgetrennt hatte. Noch wärmer, wie dies im 22. Jahrhundert bevorstehen könnte, dürfte es zum letzten Mal in der späteren Kreidezeit (ca. 101–67 Mio. Jahre v.h.) gewesen sein, als Dinosaurier die Erde bevölkerten. Das Gewicht dieser Erkenntnisse aus der Paläoklimatologie darf auf keinen Fall als gering eingestuft werden, da diese die Brisanz der heutigen Situation am deutlichsten ausdrücken: Wir sind daran, das globale Klima in nur 100–200 Jahren in einen Zustand zu verschie-

ben, der innerhalb der biologischen Evolutionszeit des Menschen nie vorhanden war. Die zu erwartenden anthropogenen Klimaveränderungen müssen deshalb auf dem Hintergrund paläoklimatischer Erkenntnisse als äusserst schnell und in ihrer Amplitude ungeheuer gross beurteilt werden.

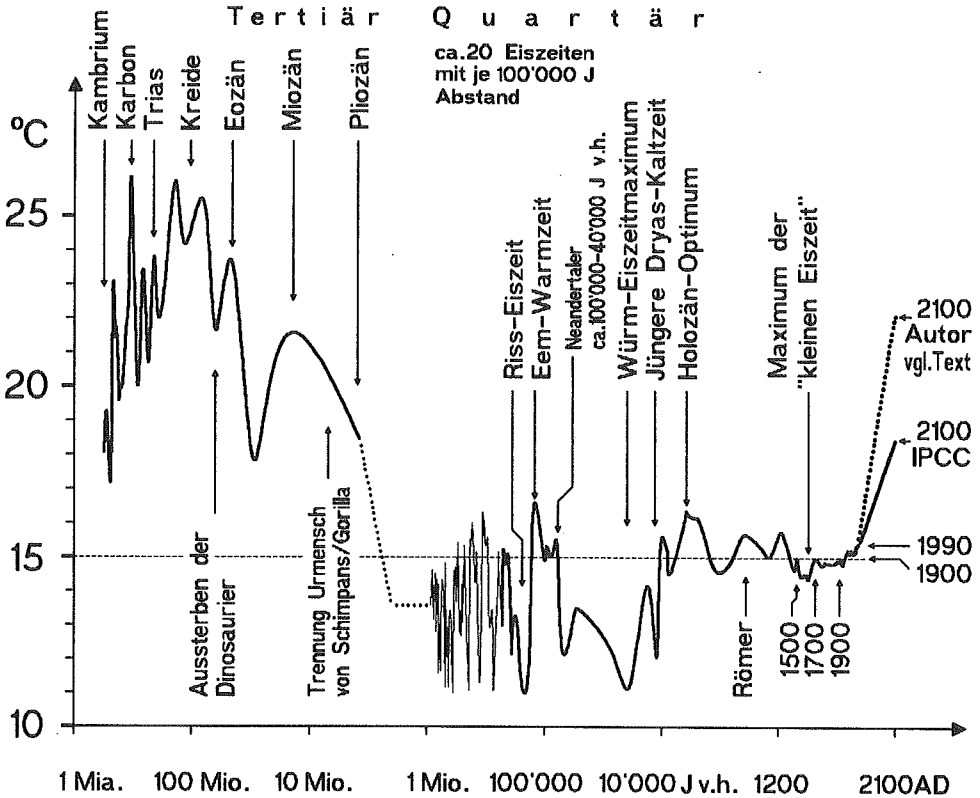


Bild 1 Verlauf der globalen Mitteltemperatur über die letzten 600 Mio. Jahre (Phanerozoikum) sowie mögliche Zunahme bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts (Daten nach M.I. Budyko, 1988, und IPCC, 1990, teilweise verändert und ergänzt durch weitere Quellen).

Fig. 1 Diagram of global mean temperature variations over the past 600 million years (Phanerozoicum) and possible increase until the end of the next century.

Neben dieser Beurteilungsgrundlage für Klimaveränderungen liefert die Paläoklimatologie auch gewichtige Hinweise zur Klimadynamik. Messungen der Kohlendioxid- und Methangehalte in Lufteinschlüssen des Vostok-Eisbohrkerns aus der Antarktis (J.M. Barnola, 1987) zeigen eine hohe Korrelation mit Temperaturbestimmungen aufgrund der Isotopen-Methode. Regressionsanalysen ergeben einen Wert für den Rückkoppelungsfaktor β um etwa 3 (Lorius et al., 1990), der im oberen Bereich des oben erwähnten Unsicherheitsintervalles

liegt. Die Korrelation zwischen Treibhausgasen und Temperatur gibt auch einen Hinweis darauf, dass die Rolle der Treibhausgase im Zusammenhang mit den Eiszeiten die eines Verstärkers war und mitgeholfen hat, die unbedeutenden Temperaturschwankungen, die durch die kleinen Veränderungen der saisonalen Sonneneinstrahlung aufgrund veränderter Erdbahnparameter hervorgerufen wurden, zu verstärken. Das Klimasystem scheint demnach so gestaltet zu sein, dass Temperaturschwankungen durch natürliche Prozesse, die den atmosphärischen Gehalt von Kohlendioxid und Methan steuern, verstärkt werden. Dies ist ein Hinweis darauf, dass das globale Klimasystem instabil ist und empfindlich auf kleine Störungen reagiert. Die Tatsache, dass bis heute kein Modell existiert,

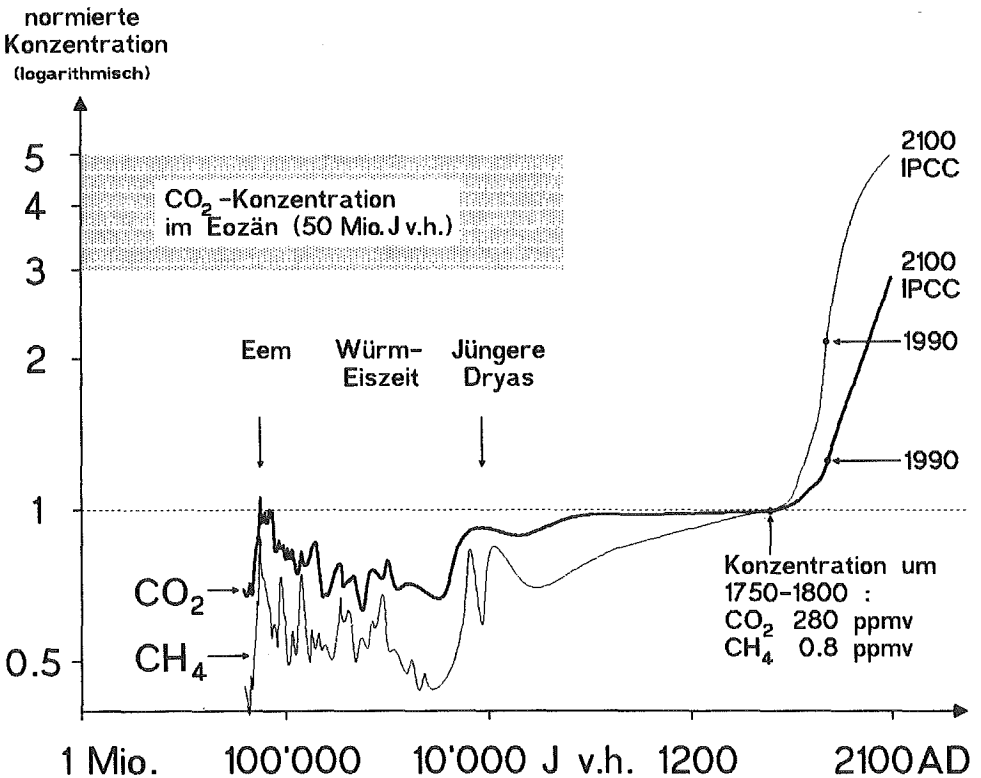


Bild 2 Verlauf der atmosphärischen Kohlendioxid- und Methankonzentration über die letzten 160 000 Jahre sowie mögliche Zunahme bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts. Die Konzentrationen wurden auf vorindustrielle Werte normiert; die logarithmische Aufzeichnung liefert für Kohlendioxid zum «climate forcing» proportionale Amplituden (Daten nach J. Chappellaz et al., 1990, und IPCC, 1990).

Fig. 2 Diagram of atmospheric carbon dioxide- and methane concentrations over the past 160 000 years and possible increase until the end of the next century. The concentrations have been normalized to preindustrial values; the logarithmic display shows climate forcing proportional amplitudes for carbon dioxide.

das die Eiszeiten befriedigend simulieren und damit erklären kann, zeigt aber auch, dass unsere wissenschaftlichen Kenntnisse über wichtige Teilprozesse des Klimasystems ungenügend sind. Es ist deshalb nicht auszuschliessen, dass Prozesse gefunden werden, die unsere heutigen Prognosen wesentlich korrigieren könnten, und diese Korrekturen dürften eher nach oben als nach unten zeigen.

Ein drittes wichtiges Resultat der Erforschung von Klimaarchiven ist die Grösse der Schwankungen des atmosphärischen Kohlendioxid- und Methangehaltes. Aus Messungen an Eisbohrkernen aus Gletschern sowie aus der Arktis und Antarktis kann der vorindustrielle Gehalt (um ca. 1750) auf 280 respektive 0,8 ppmv bestimmt werden. Ein Vergleich mit den heutigen (1990) Werten von 353 und 1,72 ppmv zeigt den markanten Anstieg um 26 resp. 270% (Bild 2), der in Anbetracht des etwa konstanten Verlaufes über die 10 000 Jahre der Nacheiszeit keiner vom Menschen unabhängigen Ursache zugeschrieben werden kann. Hierzu kommt noch, dass die Konzentrationen in der letzten Zwischeneiszeit vor 125 000–130 000 Jahren wiederum etwa den vorindustriellen Werten entsprechen. Obwohl weiter zurückliegende Angaben über Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre immer unsicherer werden, muss aufgrund heutiger Kenntnisse angenommen werden, dass Konzentrationen, wie wir sie am Ende des kommenden Jahrhunderts vorfinden könnten, zum letzten Mal vor rund 50 Mio. Jahren im Eozän aufgetreten sind (M.I. Budyko et al., 1988).

Ein viertes Resultat betrifft die Zeitspanne von rund 1 Mia. Jahren (Präkambrium), die gebraucht wurde, um die fossilen Energievorräte anzulegen, die wir im Begriffe sind, innerhalb weniger Jahrhunderte zu verbrennen und dadurch in die Atmosphäre, woher sie stammen, zurückzuführen. Der Vergleich dieser Aufbau- und Abbauperioden zeigt, dass die Abbaugeschwindigkeit heute rund zweimillionenmal schneller vor sich geht als die Aufbauprozesse. Mit anderen Worten, wir verbrauchen heute die in 1000 Jahren erzeugten Kohle- und Öllager innerhalb von etwa 4 Stunden, und in einigen Jahrzehnten wird dies nur noch 1–2 Stunden dauern!

4 Versuch einer Lagebeurteilung des Planeten Erde

Zu den oben erläuterten Tatsachen, die die kritische Lage des Planeten in kaum zu überbietender Deutlichkeit darstellen, kommt das Tabu der schrankenlosen Vermehrung der Bevölkerung (Bild 3), das den Blick selbst vieler Wissenschaftler für die wesentlichen Zusammenhänge verschleiert und zu beschönigenden Prognosen verleitet. Es ist eine unbestreitbare Tatsache, dass die Erdbevölkerung pro Stunde um 11 400 Individuen oder rund 100 Mio. pro Jahr zunimmt. Allein der Zuwachs innerhalb von 2 Jahren entspricht der gesamten Weltbevölkerung zur Zeit der römischen Hochkultur vor 2000 Jahren. Heute wird drei Viertel der Energie von rund einem Viertel der Menschheit in Anspruch genommen, ein Missverhältnis von einem Faktor 9, das aufgrund der

Möglichkeiten der modernen Nachrichtenübermittlung und Mobilität höchstens noch für kurze Zeit aufrechtzuerhalten ist. Ein «Aufholen» der Entwicklungsländer bis zum Energieverschleiss der Industrieländer, was vielfach als die einzige Möglichkeit zur Herabsetzung der Geburtenrate angesehen wird, würde jedoch eine Zunahme des Weltenergieverbrauches um einen Faktor 3 bedeuten, falls die Bevölkerungszahl augenblicklich stabilisiert würde. Aufgrund der bis zum Ende des 21. Jahrhunderts prognostizierten 14 Mia. Erdenbewohner würde jedoch der Energieverbrauch nach diesen Überlegungen um etwa einen Faktor 8 von 13 auf rund 100 TW ansteigen und das oben erwähnte «Business as usual»-Szenario um mindestens das Doppelte übertreffen. Ein wesentlich vergrössertes Energieangebot kann deshalb kaum als ein taugliches Mittel für die unbedingt notwendige Stabilisierung der Weltbevölkerung betrachtet werden. Langfristig haltbar trotz der ökologisch-ökonomischen Konsequenzen einer drastischen Klimaverschiebung wird einzig eine Kombination von Nord-Süd-Ausgleich des Energieangebotes, Stabilisierung der Erdbevölkerung auf einen Wert deutlich unterhalb von 10 Mia. und deutlichem Rückgang des Ausstosses von Treibhausgasen, in erster Linie von Kohlendioxid, durch die Industrieländer sein. Da kein rascher Durchbruch in der Kernfusion und keine genügend rasche Einführung der Solartechnik im grossen Massstab vorstellbar ist, bleibt für die Industrieländer nur der Ausweg einer markanten Herabsetzung des Energieverbrauches pro Kopf der Bevölkerung auf etwa die Hälfte im Laufe der kommenden Jahrzehnte bei gleichzeitiger massiver Unterstützung der Entwicklungsländer bei der Erreichung der ersten beiden Ziele (z.B. durch Schuldenerlass, Transfer emissionsarmer und energieeffizienter Technologie, Familienplanung). In Anbetracht dieser überwältigenden Aufgabe fällt die Antwort auf die Fragen nach der Verwendung der diskutierten und dringend notwendigen Kohlendioxid-Steuer von ca. 20% relativ leicht. Wichtig wäre jedoch anschliessend eine sukzessive Anhebung dieser Lenkungssteuer auf 100 bis 200%, einerseits um den gewünschten Spareffekt zu erzielen (dieses Ziel wird mit nur 20% nicht erreicht, da die Preiselastizität z.B. bei Benzin nur etwa $\frac{1}{4}$ beträgt; dies bedeutet einen anfänglichen Verbrauchsrückgang um ca. 5%, der jedoch durch die Verbrauchszunahme in wenigen Jahren wieder wettgemacht wird),

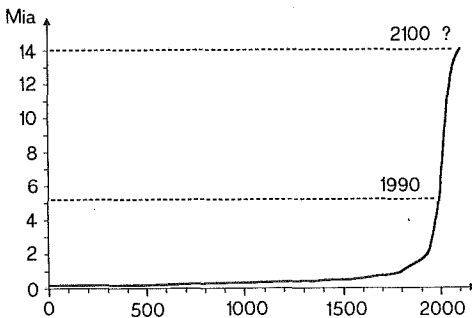


Bild 3 Die überexponentielle (hyperbolische) Zunahme der Erdbevölkerung innerhalb der vergangenen zwei Jahrtausende (Daten nach National Geographic, 1988).

Fig. 3 Overexponential (hyperbolic) growth of the world population over the past two millennia.

andererseits, um die Marktchancen der Solartechnologie zu verbessern und letztendlich, um genügend Geld für die Finanzierung der bevorstehenden immensen Aufgabe bereitstellen zu können (vgl. auch F. Gassmann, R. Weber, 1989).

Ob genügend gesichertes Wissen bereits heute vorhanden ist, um die erwähnten Massnahmen verantworten zu können? Diese Frage muss mit der Gegenfrage konfrontiert werden, ob es zu verantworten ist, mit sehr unvollständigen Kenntnissen ein einmaliges, irreversibles, globales «Klimalexperiment» durchzuführen, dessen Ausgang sich mit hoher Wahrscheinlichkeit verheerend auf die Biosphäre auswirkt und in Anbetracht der bestehenden Waffenarsenale äusserst gefährliche Konsequenzen für das Überleben der Menschheit haben dürfte. Also eine Einbusse von Bequemlichkeit auf der einen, eine existentielle Bedrohung auf der anderen Seite.

Schlussbemerkung: Ich habe die Brandrodung der tropischen Regenwälder im Zusammenhang mit globalen Klimaveränderungen nicht erwähnt, weil der atmosphärische Kohlendioxidgehalt bei deren vollständiger Verbrennung um nur 35–60 ppmv (IPCC, 1990) ansteigen würde, was im Lichte einer Multiplikation des äquivalenten Kohlendioxidgehaltes mit einem Faktor 5–7 nicht relevant ist. Der heute betriebene Raubbau an den artenreichsten Ökosystemen, die wir auf unserem Planeten finden, ist jedoch in der 600 millionenjährigen Evolutionsgeschichte der Land-Biosphäre das vermutlich schlimmste Extinktionsereignis, das je stattgefunden hat, und dies ist durch keine Argumente zu rechtfertigen.

5 Literatur

- Arrhenius, S. (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, *Phil. Mag. Ser. 5*, (251), 237–276.
- Barnola, J. M. et al. (1987): Vostok ice core provides 160 000-year record of atmospheric CO₂, *Nature* 329, 408.
- Budyko, M. I. et al. (1988): *Global Climatic Catastrophes*, Springer, New York.
- Chappellaz J. et al. (1990): Ice core record of atmospheric methane over the past 160 000 years, *Nature* 345, 127–31.
- Fourier, J.-B. J. (1824): Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France VII*, 569–604.
- Gassmann, F., Weber, R. (1989): Vom Menschen verursachte Klimaveränderungen, verfasst im Auftrag der Schweiz. Phys. Ges., c/o Physik-Institut der Univ. Zürich.
- IPCC (1990): *Scientific Assessment of Climate Change*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Report of Working Group I, WMO/UNEP, Geneva, 1990.
- Lorius, C. et al. (1990): The ice core record: climate sensitivity and future greenhouse warming, *Nature*, Vol. 347, 139–145.
- Mitchell, J.F.B. (1989): The «Greenhouse» effect and climate change, *Rev. Geophysics*, 27, 1, 115–139.
- National Geographic (Dec. 1988): Endangered Earth, Vol. 174, No. 6, Posterbeilage; Zukunftsszenario nach United Nations' Assessment.