

Carinthia II	186./106. Jahrgang	S. 153–161	Klagenfurt 1996
--------------	--------------------	------------	-----------------

Klima im Wandel

Von Siegfried J. BAUER

Mit 8 Abbildungen

Schriftliche Zusammenfassung eines Vortrages bei der
Jahreshauptversammlung im März 1995

Der Klimabegriff stammt schon aus dem Altertum und geht auf das Griechische zurück, wo das Wort sich auf die „Neigung“, d. h. auf die verschiedenen Einstrahlungswinkel der Sonne und die sich daraus ergebenden „Klimagürtel“, der Erde bezieht. Danach ist es heiß in den Tropen, kalt in den Polargebieten und gemäßigt in den mittleren Breiten. Dies entspricht auch den heutigen Vorstellungen der atmosphärischen Zirkulation und dem damit verbundenen Wettergeschehen (Abb. 1).

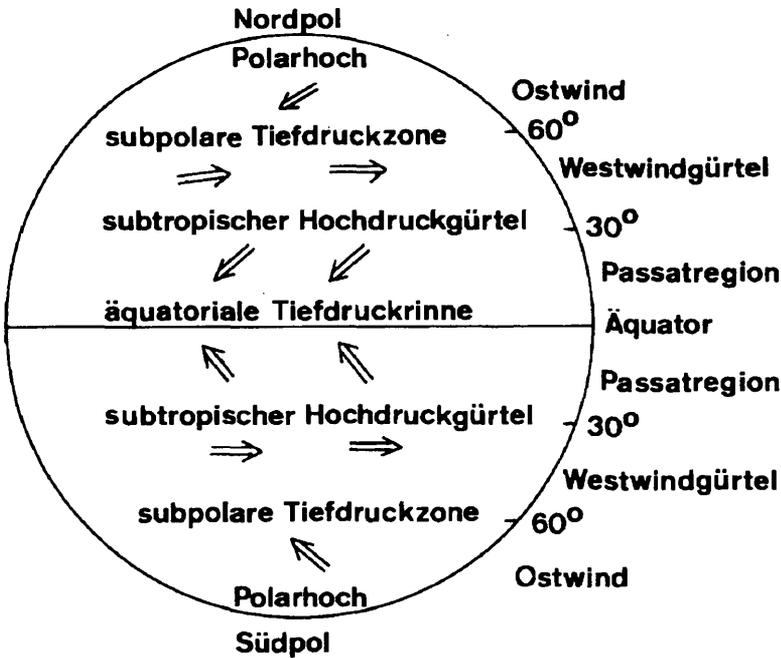


Abb. 1: Die Zonen der atmosphärischen Zirkulation, die den Klimaregionen zugrunde liegen.

Die aus den zwanziger Jahren stammende moderne Definition vom *Klima als dem mittleren Zustand und gewöhnlichen Verlauf der Witterung (Wetter innerhalb einer Jahreszeit) an einem gegebenen Ort* geht auf den Pionier der Klimatologie, W. KÖPPEN (der als Schwiegervater von Alfred WEGENER sein letztes Lebensjahrzehnt in Graz verbrachte), zurück. Eine ähnliche Vorstellung stammt bereits aus dem Ende des vorigen Jahrhunderts vom österreichischen Meteorologen Julius von HANN. Die Klimazonen der Erde sind jedoch auch von der Verteilung von Land und Wasser maßgeblich beeinflusst, wie überhaupt die Meereszirkulation für das Klima der Küstengebiete der Kontinente eine entscheidende Rolle spielt. (Es sei hier auch besonders auf den El-Niño-Effekt im Pazifik hingewiesen.) Da wir unter dem Begriff Klima eine bestimmte zeitliche Stabilität voraussetzen, sind Klimaänderungen erst über längere Zeiträume bemerkbar.

Die wohl drastischsten Klimaänderungen stellen die Perioden der „Eiszeitalter“ dar. Darunter verstehen wir längere Zeiträume (Millionen von Jahren), wenn die Vereisung der Erdoberfläche 10–30% ausmacht. Wir befinden uns derzeit im Quartär-Eiszeitalter, das vor über zwei Millionen Jahren begonnen hat und in dem man eine Aufeinanderfolge von Kaltperioden (Eiszeiten) und Warmperioden (Zwischeneiszeiten) nachweisen konnte; die Temperaturunterschiede zwischen diesen machen 6–8° C aus. Unser gegenwärtiges Klima seit ca. 10.000 Jahren entspricht einer Zwischeneiszeit (Abb. 2).

Die abwechselnden Eis- und Zwischeneiszeiten des Quartär-Eiszeitalters werden auf die Veränderung der astronomischen Elemente der Erdbahn bzw. der Erdachse zurückgeführt. Diesen Vorschlag hat bereits in den zwanziger Jahren M. MILANKOVITCH gemacht, der nachwies, daß die Exzentrizität der Erdbahn eine Periodizität von ca. 100.000 Jahren aufweist, die Neigung der Erdachse (zwischen 22° und 24,5°) eine von ca. 40.000 Jahren und die Jahreszeit, in der die Erde der Sonne am nächsten steht (dzt. Dezember), eine solche von ca. 22.000 Jahren hat. Damit verändert sich auch die Intensität der Sonnen-

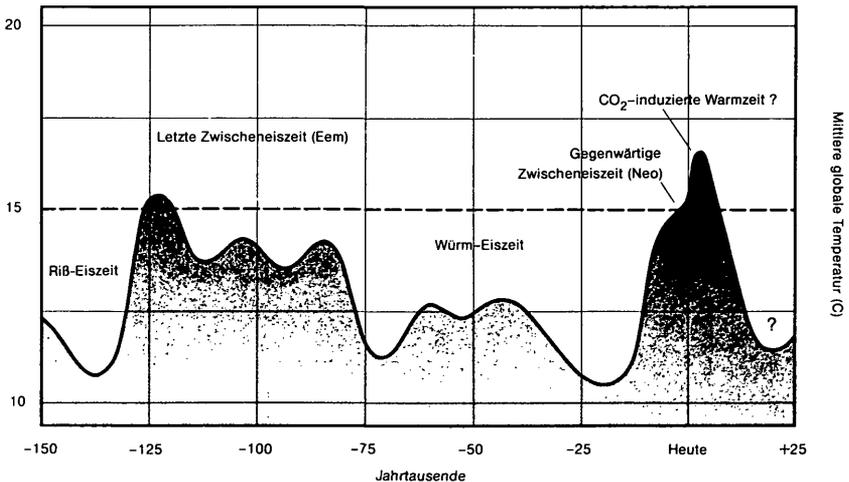


Abb. 2: Die letzten Eiszeiten (Würm und Riß) und Zwischeneiszeiten innerhalb des Quartären Eiszeitalters.

einstrahlung, und aus dieser ergeben sich Schwankungen der globalen Temperatur. Diese „MILANKOVITCH-Zyklen“ verursachen direkt jedoch nur Schwankungen von ca. 1° C bis 2° C, viel zu gering, um die Temperaturunterschiede zwischen Warm- und Kaltzeiten zu erklären, wodurch die MILANKOVITCH-Theorie wieder in Verruf geriet. Erst in den letzten zwei Jahrzehnten hat der Nachweis der MILANKOVITCH-Zyklen in Eisbohrkernen zu ihrer neuen Akzeptanz, allerdings in modifizierter Form geführt. Danach wirken die MILANKOVITCH-Zyklen als „Zeitgeber“ in einem nichtlinearen Klimasystem, wonach kleine Ursachen durch Verstärkung größere Wirkungen hervorrufen. Das Klimasystem wird anscheinend nichtlinear, wenn die Eisbedeckung zwischen 10–30% liegt; mit geringer Vereisung üben die MILANKOVITCH-Zyklen keine große Wirkung aus. Tatsächlich sind *Eiszeitalter* in der Erdgeschichte selten; insgesamt wurden ca. ein halbes Dutzend in den letzten 2,5 Millionen Jahren aus geologischen/paläontologischen Hinweisen identifiziert (Abb. 3). Das vorletzte Eiszeitalter liegt ca. 250 Millionen Jahren zurück, zu einer Zeit als der Urkontinent Pangäa sich in Nähe des Südpols befand. Aller Wahrscheinlichkeit nach ist die geographische Verteilung von

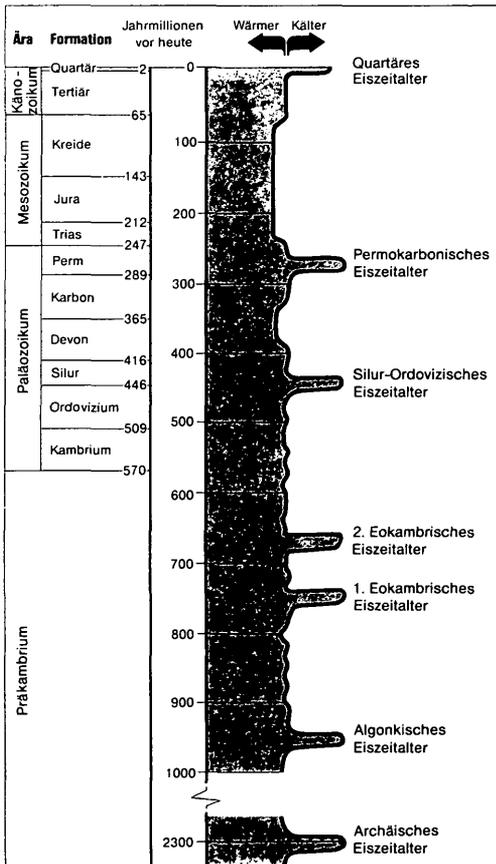


Abb. 3: Die Eiszeitalter in der Erdgeschichte.

Landmassen für das Auftreten von Eiszeitaltern von Bedeutung. In den letzten hundert Millionen Jahren war das Erdklima anscheinend bedeutend wärmer als heute. Während des Quartärs war die Temperatur nur vor ca. 6000 Jahren etwa ähnlich unserer heutigen (Klimaoptimum), um in der Zwischenzeit wieder teilweise abzunehmen.

Obwohl tatsächliche Temperaturmessungen erst in den letzten zwei Jahrhunderten durchgeführt werden konnten, sind die meisten Informationen über das Klimaverhalten der Vorzeit indirekter Natur (Bändertone = jahreszeitliche sedimentäre Ablagen, Binnenseesedimente, Pollen, Baumringe etc.). Darüber hinaus gibt es aber nun die Möglichkeit von Temperaturbestimmungen aus den Abweichungen des Verhältnisses der Sauerstoffisotope mit Massenzahl 16 und 18, welches temperaturabhängig ist. Analysen von sauerstoffhaltigem Material, wie polarer Eisablagerungen, Sedimente und im besonderen auch von kalkhaltigen Meerestieren, erlauben daher mit einhergehenden Altersbestimmungen Abschätzungen des Temperaturverlaufes. Die Sauerstoffisotopenanalyse von Eisbohrkernen umfaßt bereits den Zeitraum der letzten 200.000 Jahre.

Vor ca. 10.000 Jahren begann der Übergang von der letzten Kaltzeit zur Neowarmzeit, obwohl in der jüngeren Dryaszeit (vor ca. 9000–9500 Jahren) noch kurzzeitig Temperaturschwankungen von etlichen Graden innerhalb von nur 50 Jahren (!) aus Sauerstoffanalysen entdeckt wurden. (Dafür werden jetzt kurzzeitige Veränderungen der Meeresströmungen verantwortlich gemacht.) Vor 6000 Jahren, in der „Borealen Epoche“, war es im Sommer allgemein etwas wärmer als heute, mit milden, niederschlagsarmen Wintern, unterbrochen von einzelnen strengen Wintern. In den letzten zwei Jahrtausenden folgten häufig Perioden von „wärmerem“ und „kälterem“ Klima aufeinander, die auch kulturgeschichtliche Konsequenzen hatten. So entwickelte sich um 400–300 v. Chr. der Hochstand der griechischen Kultur, während in den vorhergehenden Jahrhunderten eine Kaltepoche mit verbreiteten Gletschervorstößen zur großen indogermanischen Völkerwanderung nach Süden führte. Von 200 v. Chr. bis 300 n. Chr. gab es dagegen das Klimaoptimum der Römerzeit, dem wieder eine kühlere, niederschlagsreiche Zeit mit Gletschervorstößen folgte, die mit der Völkerwanderung der germanischen Stämme nach Süden zusammenfällt. Zwischen 800–1000 n. Chr. ermöglichte die nächste Warmperiode mit europäischen Jahresmitteltemperaturen, ca. 1,5° C höher als heute, Weinbau in England sowie ausgedehnte Seefahrten der Normannen, wie die Besiedlung Islands und Grönlands und die Entdeckung Amerikas. Im 3. Jahrhundert bahnte sich eine Wende zu kälterem Klima an, das in der Kaltperiode der „Kleinen Eiszeit“ während des 17. und 18. Jahrhunderts, als in Europa die Temperaturen etwa 1° C tiefer als heute lagen, verbunden mit strengen Wintern und Gletschervorstößen. Erst Mitte unseres Jahrhunderts erleben wir wieder eine neue Warmperiode. Daraus folgt, daß viele Klimaschwankungen auf natürlichem Wege zustande kommen.

Die letzten hundertfünfzig Jahre fallen jedoch mit der Industrialisierung unserer Gesellschaft und dem damit verbundenen Energiebedarf der Menschheit zusammen. Bereits um die Jahrhundertwende hat der berühmte schwedische Chemiker und spätere Nobelpreisträger Svante ARRHENIUS die Warnung ausgesprochen, daß mit dem erhöhten Verbrauch von fossilen Brennstoffen (Kohle, Gas) der CO₂-Gehalt der Erdatmosphäre steigen würde und der

©Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

damit verbundene Treibhauseffekt zu einer Erhöhung der globalen Temperatur führen könnte. Die mittlere globale Temperatur kann und wird tatsächlich als repräsentativer Parameter für das globale Klima (mit seinen vorherrschenden) Klimazonen verwendet. Diese Temperatur läßt sich aus dem Strahlungsgleichgewicht zwischen Einstrahlung von der Sonne und Abstrahlung von der erwärmten Erde berechnen. Aufgrund von Satellitenmessungen ist der Energiefluß von der Sonne in Erdnähe, die Solarkonstante ca. 1.360 Wm^{-2} . Davon werden von der Erde aber nur ca. $1/6$ verwertet, etwa 30% wird von den Wolken und der Erdoberfläche reflektiert (planetare Albedo) und die Verteilung über die Kugeloberfläche der rotierenden Erde reduziert die effektive Einstrahlung um ein weiteres Viertel. Damit beträgt die für die Erderwärmung zur Verfügung stehende Energie nur ca. 240 Wm^{-2} . Im Gleichgewicht muß derselbe Betrag wieder in den Weltraum zurückgestrahlt werden. Aus diesem Gleichgewicht läßt sich die effektive Strahlungstemperatur der Erde von -18° bestimmen, die weit unterhalb der durchschnittlichen globalen Bodentemperatur von ca. 15° C liegt. Die Differenz von 33° C wird dem *Treibhauseffekt* zugeschrieben. Für diesen sind die Treibhausgase in der Atmosphäre, d. h. drei- und mehratomige Spurengase wie H_2O , CO_2 und CH_4 und N_2O (Lachgas) verantwortlich, welche die Eigenschaft besitzen, die „kurzwellige“ sichtbare Sonnenstrahlung nahezu ungehindert durchzulassen, die „langwellige“ (infrarote) Wärmestrahlung von der Erde aber zu absorbieren und sowohl nach oben wie nach unten zu reemittieren, wobei es zu einem Wärmestau, ähnlich einem Glashaushaus, kommt. Für den normalen Treibhauseffekt ist zu etwa $2/3$ der Wasserdampf verantwortlich; für den Rest CO_2 und die anderen Treibhausgase (Abb. 4).

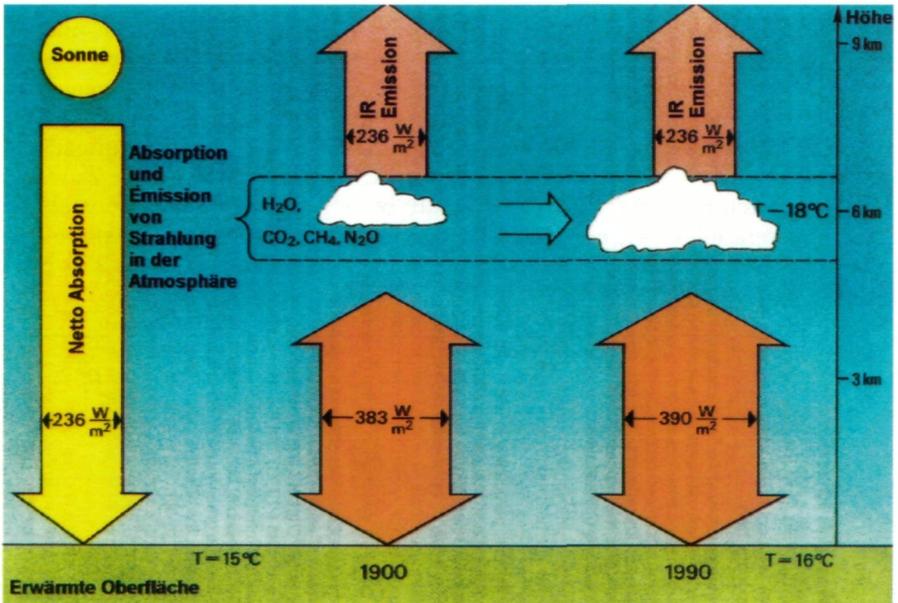


Abb. 4: Energiebilanz der Erde aufgrund der Einstrahlung von der Sonne und Abstrahlung von der Erde einschließlich des Treibhauseffektes und die sich daraus ergebende Strahlungstemperatur und Bodentemperatur der Erde.

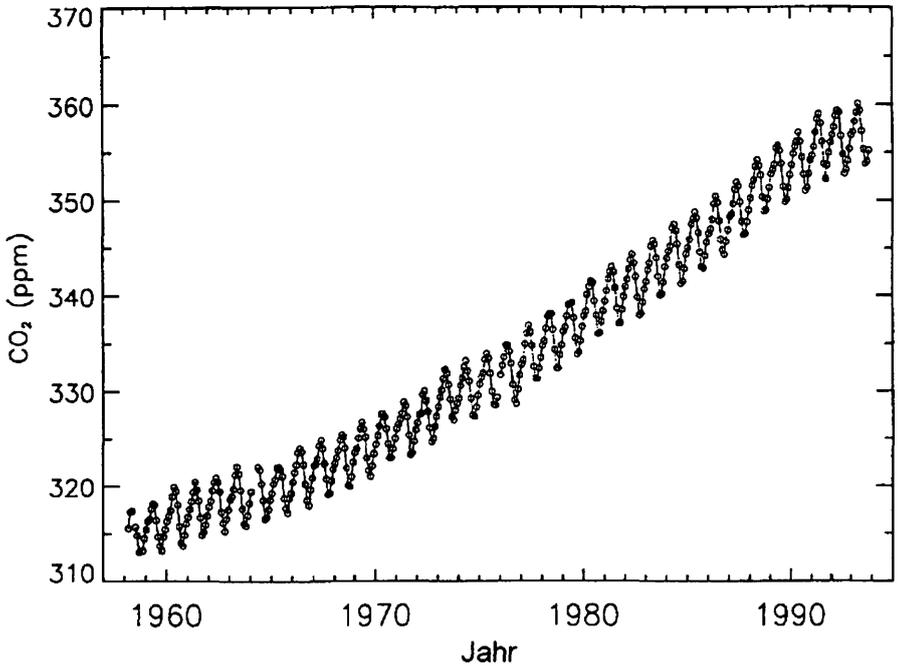


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf des CO₂-Gehaltes der Erdatmosphäre seit Beginn der direkten Messungen auf Mauna Loa, Hawaii. (Die jahreszeitliche Modulation beruht auf dem photosynthetischen Zyklus.)

Vor fast 40 Jahren haben zwei amerikanische Forscher, R. REVELLE und H. E. SUESS (ein gebürtiger Wiener und Enkel des berühmten Geologen Eduard SUESS), erneut auf das gefährliche „Experiment der Menschheit“ hingewiesen, durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen das Treibhausgas CO₂ in der Atmosphäre anzureichern und damit die Erde zu erwärmen. Messungen des atmosphärischen CO₂-Gehaltes zeigen tatsächlich einen stetigen Zuwachs (Abb. 5). Heute beträgt der CO₂-Gehalt bereits 360 ppm (Millionstel der Atmosphärenmoleküle), ein Zuwachs von ca. 30% seit vorindustriellen Zeiten, als dieser nach Messungen von Gasblasen im Polareis nur ca. 275 ppm

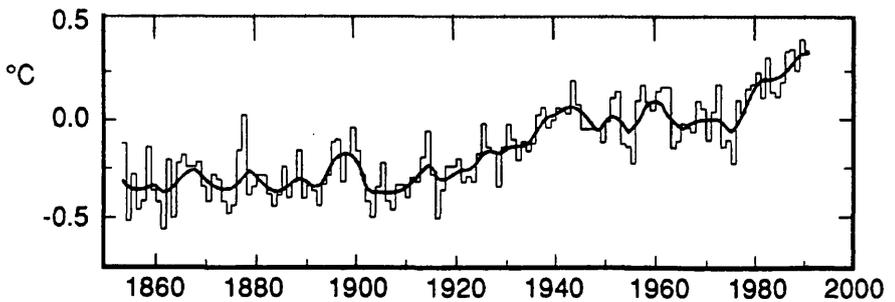


Abb. 6: Globale Abweichung der Jahrestemperatur vom Mittel 1950–1979 (Quelle: University of East Anglia und UK Met. Office).

betrug. Derzeit wird daher die mögliche Veränderung des Erdklimas durch menschliche Aktivitäten heftig diskutiert. Der Anstieg von CO_2 in der Atmosphäre resultiert aus der Tatsache, daß die Zufuhr über die Verbrennung von fossilem Material rascher erfolgt als die für die Erreichung eines Gleichgewichtes notwendige Zeit. Derzeit werden nur ca. 50% des anthropogenen CO_2 von den Meeren und der Erdoberfläche aufgenommen.

Die gemessenen Abweichungen der hemisphärischen und globalen Temperatur während der letzten 150 Jahre zeigen einen positiven Trend (wie die Zunahme des Treibhausgases CO_2) mit einer Erwärmung von ca. $0,6^\circ \text{C}$ (Abb. 6). Darüber hinaus gibt es aber auch beträchtliche Schwankungen um diesen Trend. Temperaturabnahmen können z. B. durch Vulkanausbrüche erfolgen, weil diese kleinste Aerosolteilchen in die Stratosphäre schleudern, die erst nach ca. 2 Jahren wieder ausfallen und in diesem Zeitraum zu einer Verringerung der Sonneneinstrahlung durch Reflexion und damit zu einer Abkühlung der Erdoberfläche führen können (Erhöhung der planetaren Albedo!). Die beobachteten Temperaturveränderungen kann man mit Hilfe von Modellen unter Berücksichtigung des CO_2 -Anstiegs, der Vulkantätigkeit und kleinen Änderungen der Solarkonstante einigermaßen gut simulieren (Abb. 7). Aufgrund von Modellvorstellungen, die auch die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Ozeanen (deren Tiefenzirkulation zu einer Entnahme von

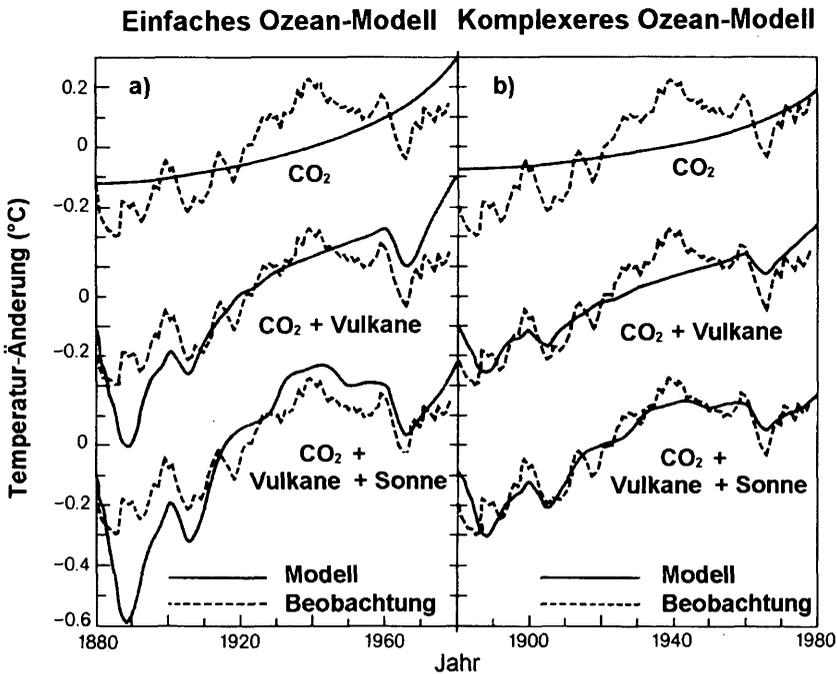


Abb. 7: Simulation der beobachteten Temperaturabweichung vom langjährigen Mittel durch Modelle, die sowohl den CO_2 -Anstieg, die Vulkantätigkeit sowie kleine Änderungen der Solarkonstante berücksichtigen als auch zwei verschiedene Zirkulationssysteme der Ozeane (nach J. E. Hansen, Goddard Inst. of Space Studies, N. Y.).

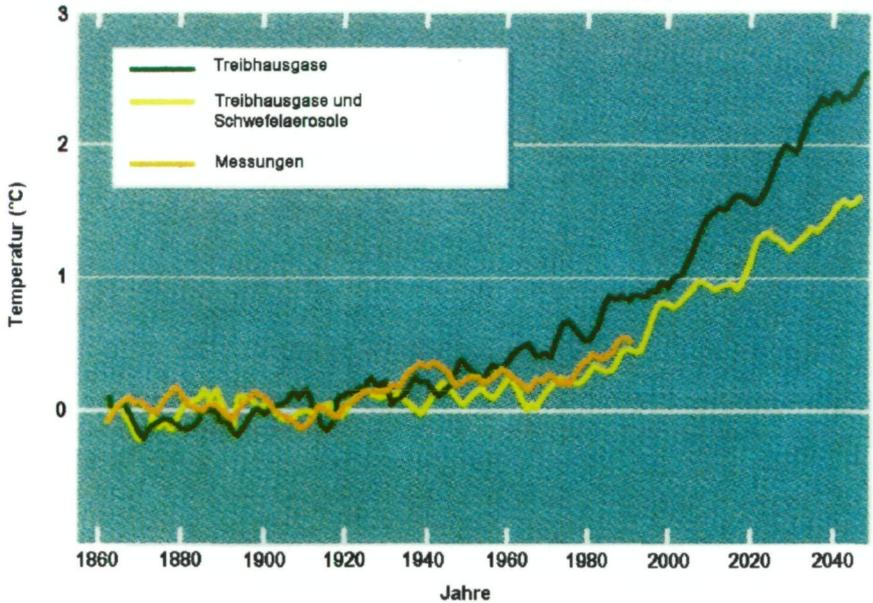


Abb. 8: Temperaturverlauf (Abweichungen vom langjährigen Mittel) von Messungen und Modellen unter Berücksichtigung der Treibhausgase bzw. dieser und Schwefelaerosole. Die Modelle für die nächsten Jahrzehnte sind „Prognosen“ (nach Arbeiten des UK Met. Office, 1995).

Wärme aus der Atmosphäre führt) berücksichtigt, wird heute prognostiziert, daß für eine Verdoppelung des CO_2 -Gehaltes die globale mittlere Temperatur um $1,5^\circ\text{C}$ bis $3,5^\circ\text{C}$ innerhalb des nächsten Jahrhunderts zunehmen könnte, was auch zu Veränderung der globalen Klimazonen führen würde, da sich Änderungen der Durchschnittstemperatur in höheren Breiten stärker auswirken könnten. Obwohl solche Temperaturen nicht für ein Abschmelzen des Polareises ausreichen würden (in diesem Falle würde der Meeresspiegel um ca. 60 m ansteigen), sind mögliche Konsequenzen doch eine Hebung des Meeresspiegels im Dezimeterbereich, Rückgang von Gletschern, der allerdings schon seit 1850 beobachtet wird, Variabilität der Niederschläge und ganz allgemein eine Veränderung des Klimas von größerer Dimension als im letzten Jahrtausend. Kürzlich wurden die Prognosen für eine globale Erwärmung aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes jedoch wieder reduziert, weil man fand, daß die Luftverschmutzung in der Troposphäre durch Schwefelaerosole, die das Sonnenlicht reflektieren, dem anthropogenen Treibhauseffekt entgegenwirkt (Abb. 8).

Obwohl sich das Klima der Erde im Laufe der Erdgeschichte mehrmals drastisch verändert hat, waren diese Änderungen in der bisherigen Menschheitsgeschichte nur im Bereich von einigen Graden und dann meist über viele längere Zeitspannen. Der gegenwärtige *anthropogene Treibhauseffekt* könnte dagegen in relativ kurzer Zeit (Skala von Jahrzehnten) wirksam werden, ein Grund für die Besorgnis um die mögliche Auswirkung auf die Menschheit und für Bemühungen auf politischer Ebene, den Verbrauch von fossilen Treibstoffen einzudämmen.

Literatur

DEUTSCHER Bundestag (1989): Schutz der Erdatmosphäre. – Bonner Universitätsdruckerei.

KREUZER, F. (1986): Der Komet, der Planet, der Orbit. – Franz KREUZER im Gespräch mit Siegfried J. BAUER u. a. – Franz Deuticke Verlag, Wien.

SCHÖNWIESE, C. D. (1979): Klimaschwankungen. – Springer Verlag.

SCHÖNWIESE, C. D., B. DIEKMANN (1990): Der Treibhauseffekt – Der Mensch ändert das Klima. – Rowohlt.

WARNECKE, G., M. HUCH, K. GERMANN (Hg.) (1992): Tatort Erde – menschliche Eingriffe in Naturraum und Klima. – Springer Verlag.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Carinthia II](#)

Jahr/Year: 1996

Band/Volume: [186_106](#)

Autor(en)/Author(s): Bauer Siegfried J.

Artikel/Article: [Klima im Wandel 153-161](#)