

Ein neues Verständnis des Klimas und seiner Veränderungen

Ulrich Wolff

Die unbestritten zu beobachtende Erwärmung der Erdatmosphäre kann nicht auf einen Zusammenhang zwischen der Klimaerwärmung und der Konzentration der als Treibhausgase bezeichneten Spurengase zurückgeführt werden. Die vorherrschende Meinung in Bezug auf den Klimawandel beruht auf einer Fehlinterpretation der Erwärmung im Treibhaus. Das hier vorgestellte alternative Konzept der Funktionsweise des Klimas versteht die Anomalie des Klimaverlaufs durchaus als menschengemacht. Die Umwandlung der Erdoberfläche in landwirtschaftliche und urbane Nutzflächen sowie der gewaltige Bevölkerungsanstieg haben auch beim Klima deutliche Spuren hinterlassen. Die weitere Entwicklung des Klimas wird vor allem durch die drei Parameter „Eingriff in die Landstrukturen, Schmelzen der Eisvorräte und Zeitverzögerung der Temperaturerhöhung“ bestimmt.

Das Klima auf der Erde entsteht aus der Absorption kurzweiliger Sonnenstrahlung, die als langwellige Wärmestrahlung wieder von der Erde emittiert wird. Die Rotation der Erdkugel und ihre Bestrahlung aus einer Richtung erzeugt dabei eine Zeitabhängigkeit der Erwärmungsvorgänge. Energieinhalt und Temperatur des Klimasystems werden von der Menge der absorbierten Sonnenenergie und ihrer Verweilzeit zwischen Absorption und Emission bestimmt. Die Größe dieser Verweilzeit hängt von der Kette ablaufender Energiewandlungsprozesse, dem Energietransport parallel zur Erdoberfläche und den relevanten Eigenschaften der beteiligten Flächen und Volumina ab.

Das Funktionssystem, das diese komplexen, zeitabhängigen Vorgänge beeinflusst, ist unterbestimmt, so dass die existierenden Randbedingungen von einer unendlichen Zahl von Lösungen für mittlere Temperaturen und ihre Verteilungen erfüllt werden. Dieser Sachverhalt erklärt das stochastische Verhalten des Wetters und seiner Integrale über Zeit und Raum, die das Klima charakterisieren. Im historischen Verständnis wird die Funktionsweise des Klimas mit einer stationären Betrachtung dieser Vorgänge erklärt. Aus dieser Vereinfachung entstehen Widersprüche zu den Beobachtungen, die sowohl die Hypothese eines atmosphärischen Treibhauseffektes als auch seine anthropogene Verstärkung durch die Wirkung von Spurengasen in Frage stellen. Versuche, einen signifikanten Einfluss solcher Effekte auf das Klima in den Daten zu erkennen und zu quantifizieren, schlagen fehl. Deshalb müssen diese Postulate aufgegeben werden.

Die Klimageschichte der letzten 600 000 Jahre lässt im zeitlichen Verlauf der mittleren Erdtemperatur Instabilitäten erkennen, wobei die Veränderungen Merkmale einer Schwingung zeigen. Faktum ist, dass sich die gegenwärtig beobachtete Anomalie des Klimas bereits vor 7 000 bis 8 000 Jahren in den Ergebnissen der Untersuchungen an

Eisbohrkernen zeigt. Alle Anzeichen deuten darauf hin, dass die beobachtete Abweichung vom historischen Klimaverlauf vor etwa 12 000 Jahren in der menschlichen Steinzeit mit der Strukturänderung der Erdoberfläche infolge von Waldrodungen begonnen hat. Der fortwährende Eingriff in die relevanten Eigenschaften der Erdoberfläche durch die wachsende Weltbevölkerung hat bis heute eine Erhöhung der mittleren Erdtemperatur um 0,75 K verursacht. Eine Fortsetzung dieses Trends lässt einen weiteren Anstieg der Temperatur um mindestens 0,10-0,15 K pro Milliarde zusätzlicher Menschen erwarten. Demzufolge werden die gegenwärtigen Eisvorräte schmelzen und einen starken Anstieg des Wasserspiegels der Ozeane verursachen. Auf lange Sicht ist deshalb zu erwarten, dass sich nach einer Beendigung der Strukturänderungen der Erdoberfläche der natürliche Klimaverlauf mit dem Übergang in eine nächste Eiszeit fortsetzen wird.

Zur Physik des Klimas

Das Klima wird durch Mittelwerte der Wetterparameter wie Temperatur, Regenmenge, Sonnenscheindauer und andere Größen beschrieben, die im Klimasystem über längere Zeitdauer beobachtet werden. Gewöhnlich werden Mittelwerte der Temperatur zur Charakterisierung benutzt. Der Begriff Klima beschreibt Prozesse an der Erdoberfläche und im unteren Teil der Atmosphäre, der Troposphäre. Diese Luftschicht erstreckt sich bis in eine Höhe von etwa 15 km und umschließt den menschlichen Lebensraum vollständig. Das Klima bestimmt den bewohnbaren Anteil der Landmassen der Erde.

Durch die von der Erde selbst produzierte Wärme von etwa 0,06 W/m² allein würde sich an der Erdoberfläche eine Temperatur von etwa 32 K einstellen. Erst die Kernfusion innerhalb der Sonne lässt die typische kurzweilige und hochenergetische elektromagnetische Strahlung entstehen, deren

Absorption, Wandlung und Speicherung die Erde erwärmt. Absorbierte Strahlungsenergie kann prinzipiell nur dann eine Erwärmung erzeugen, wenn die Temperatur der Strahlung größer ist als die eines Absorbers, der selbst aus der Umwandlung von Wärme Strahlung emittiert. Der Wert der absorbierten Energie wird bei diesem Vorgang reduziert, d. h. die Entropie als Maß für die Entwertung der Energie nimmt zu.

Die Strahlung der Sonne entsteht bei einer mittleren Temperatur von 5 900 K. Diese Temperatur kennzeichnet den Wert der enthaltenen Energie. Als eine vereinbarte Standardmenge erreichen gegenwärtig 1 367 W/m² die Atmosphäre. Diese Energiemenge verringert sich im Mittel auf 341,75 W/m² aufgrund der Kugelform der Erde und ihrer Rotation. Aus diesem Grund erfolgt die örtliche Bestrahlung nicht kontinuierlich und mit ständig wechselnder Intensität. Nach allgemeinem Verständnis werden gegenwärtig 30 % dieser Strahlung von Gasen der Atmosphäre, Wolken und der Erdoberfläche in den Weltraum reflektiert. Die besonders energiereiche kurzweilige Strahlung der Sonne wird bereits im oberen Teil der Atmosphäre durch Anregung und Ionisation von Gasatomen absorbiert. Das führt zu einer Erwärmung auf eine Temperatur von etwa 272 K in einer Höhe um 50 km und einer Emission von Infrarotstrahlung im ganzen Raumwinkel verbunden mit einem entsprechenden Wertverlust der absorbierten Energiemenge. Insgesamt 70 % der Sonnenstrahlung, im Mittel 240 W/m², werden absorbiert. Die absorbierte Energie wird dabei in unterschiedlicher Form z. B. als Wärmehalt von Materie, als Schmelz- und Verdampfungswärme, als chemische, mechanische und sogar als elektrische Energie umgesetzt und gespeichert. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Energie und Temperatur existiert dabei nicht.

Die Erwärmung lässt sich daher durch ein Funktionssystem beschreiben, das bezüglich

+++ CD-TIPP
AKTUELL +++



der Korrelation von Energie und Temperatur unterbestimmt ist und eine unendliche Zahl von Lösungen für die Temperatur und ihre Verteilungen erlaubt. In dieser Unterbestimmung des Systems liegt auch die Ursache für das im Wetter und Klima beobachtete stochastische Verhalten der zeitlichen Änderungen der Temperatur. Die gegenwärtige Erwärmung um 256 K über die von der Erdwärme erzeugte Temperatur hinaus entsteht in einem mehrstufigen Prozess von Energiewandlungen und Transporten längs der Erdoberfläche. Nach einer letzten Wandlung der Energie in langwellige Wärmestrahlung werden 240 W/m² wieder in den Weltraum abgegeben, wenn sich die Enthalpie des Klimasystems im Gleichgewichtszustand befindet und nicht verändert [1].

Im Gegensatz zu einer Reflexion von Strahlung löst ihre Absorption zeitabhängige Energiewandlungen aus. Damit verbunden ist wie beschrieben eine Abwertung der Energie, deren Größe vom Wirkungsgrad des Prozesses abhängt. Die Dauer der für das Klima wesentlichen Energiewandlungen variiert dabei zwischen Bruchteilen einer Sekunde (z. B. bei der Ionisation von Gasen mit folgender Emission von Strahlung) und Jahren (z. B. durch das Schmelzen von Eis). Am Ende dieser Vorgänge wird immer Energie niedrigeren Wertes als Infrarotstrahlung in den Weltraum emittiert. Die Erwärmung über das durch Erdwärme erreichbare Niveau hinaus wird nicht allein durch die absorbierte Energiemenge erzeugt, sondern erfolgt proportional zu ihrer Verweilzeit. Die Verweilzeit der absorbierten Energie erhöht die Enthalpie und die mittlere Temperatur des Klimasystems von 32 K auf den gegenwärtigen Wert von 288 K.

Die Menge der von der Erdoberfläche kontinuierlich emittierten Energie hängt allein von der räumlichen Temperaturverteilung ab. Diese entsteht aus der Einstrahlung, den Prozessen der Energiewandlung, dem Energietransport und der Energieemission selbst. Energiewandlung und Transfer parallel zur Erdoberfläche hängen von den Zustandsgrößen des Klimasystems ab. Antrieb sind im wesentlichen die stabilen Temperaturdifferenzen zwischen dem Äquator und den Polen, Sommer und Winter und Tag und Nacht mit dem Ergebnis einer Glättung ihrer Verteilung. Da die lokal abgestrahlte Energiemenge von der vierten Potenz der Temperatur abhängt, entsteht aus der Glättung der Verteilung eine Erhöhung der mittleren Temperatur. Diese Vorgänge sind ursächlich für die Differenz zwischen der gemessenen mittleren Temperatur an der Erdoberfläche von 288 K zu einem Rechenwert von 255 K,

der sich mit der Stefan-Boltzmann-Gleichung bei Vernachlässigung von Zeit- und Ortsabhängigkeit der Erwärmung errechnet.

Diese Rechnung ist zusammen mit dem Postulat von „Treibhauseffekten“ in der Atmosphäre eine wesentliche Grundlage der gegenwärtigen Lehrmeinung zur Erderwärmung. Die Rechnung unterstellt im gesamten Klimasystem eine konstante Temperatur von 255 K. Tatsächlich variiert die Temperatur jedoch orts- und zeitabhängig in einem Band von fast 150 K. Allein diese Differenzen zwischen Messung und Rechnung deuten auf die Unzulässigkeit der Vereinfachung beim Ansatz eines stationären Modells zur Beschreibung der Erderwärmung hin.

Zeitliche Änderungen der Erdtemperatur, die von Änderungen der vorgehend beschriebenen Mechanismen, funktionalen Abhängigkeiten und Randbedingungen eingeleitet werden, manifestieren sich erst mit erheblichen Verzögerungen, da die nacheilende Enthalpieänderung der Materie des Klimasystems eine entsprechende Hysterese erzeugt.

Der historische Versuch zur Erklärung der Erderwärmung

Die im Treibhaus beobachtete Erwärmung war der Ausgangspunkt des historischen Versuches, die Erwärmung der Erde zu erklären. Mit dem von Joseph Fourier 1824 und Swante Arrhenius 1896 postulierten atmosphärischen Treibhauseffekt entstand eine Hypothese, die gegenwärtig weitgehend akzeptiert wird. Grundlage ist die bereits genannte Berechnung der mittleren Erdtemperatur mit der Stefan-Boltzmann-Gleichung zu 255 K und die Abweichung um 33 K vom Messwert. Die Erklärung dieser Abweichung wird seither mit wissenschaftlicher Akribie im Bereich der Reaktion von dreiatomigen Gasen der Atmosphäre mit Strahlung gesucht.

Ausgangspunkt für diese Zuordnung ist eine Fehlinterpretation der Erwärmung im Treibhaus. Diese entsteht aus kurzweiliger Strahlung der Sonne, die Glaswände durchdringt, an inneren Oberflächen absorbiert und in Wärme gewandelt wird. Der Erwärmung folgend wird absorbierte Energie in Form von Wärmestrahlung von inneren Oberflächen emittiert und so im Innenraum verteilt. Die langwellige Wärmestrahlung kann Glaswände nicht durchdringen, die enthaltene Energie wird daher zeitverzögert mittels Wärmeübertragung durch die Glaswände abgeführt. Die Verweilzeit der Energie bzw. der dadurch erhöhte Wärmehalt ist Ursache der Erwärmung im Treibhaus. Der

Die „et“ Jahrgangs-CD 2008

- alle Seiten • alle Artikel
- alle Berichte
- alle Kommentare
- alle Interviews

Alle Artikel der 11 Ausgaben der Zeitschrift „et – Energiewirtschaftliche Tagesfragen“ liegen auf der CD im PDF-Format vor. Über die Inhaltsverzeichnisse der Einzelausgaben, aber auch über das Stichwortverzeichnis des Jahresinhaltsverzeichnis erhalten Sie Zugang zu den einzelnen Beiträgen, die Sie am Monitor lesen oder auch ausdrucken können. Da alle Beiträge vorindiziert wurden können sie auch über eine Volltextrecherche nach einzelnen Begriffen, Autoren etc. suchen lassen. Das System zeigt Ihnen alle Fundstellen an und leitet Sie per Klick direkt zum gesuchten Artikel. Die CD ist für PC- und Macintosh-Systeme geeignet.

Bestelleranschrift:

Bitte liefern Sie _____ Exemplare

et-Jahres-CD 2008

je € 49,50 (+ Porto),
an obige Anschrift.

Faxen oder per Post an:

etv Energiewirtschaft und Technik
Verlagsgesellschaft mBH, Postfach 18 53 54
D-45203 Essen, Fax o 20 54/95 32-60

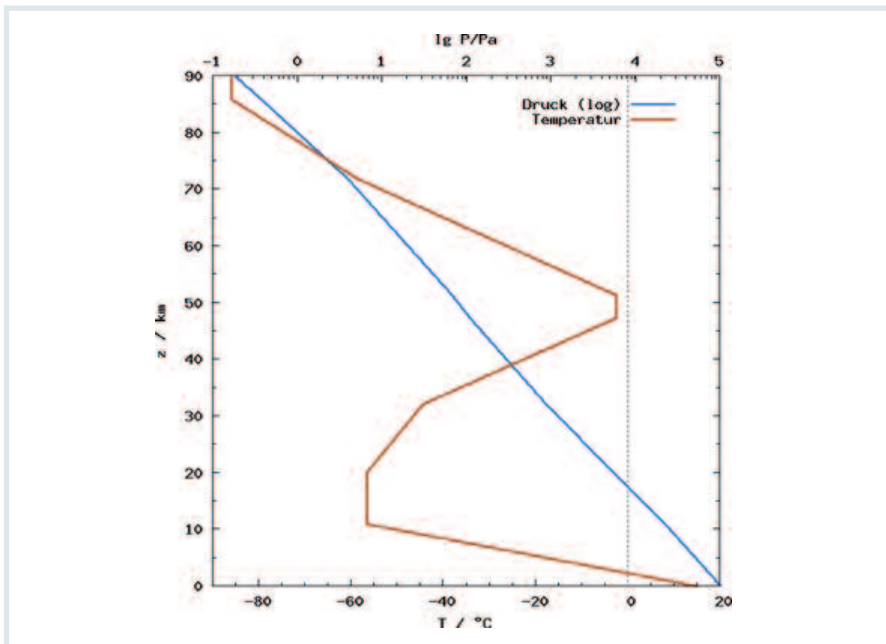


Abb. 1 Mittelwerte für Druck und Temperatur über der Erdoberfläche [5]

gleiche Effekt stellt sich auch bei einem evakuierten Innenraum ein, d. h. der Beitrag des Gasinhalts beschränkt sich auf eine Glättung der räumlichen Temperaturverteilung durch Wärmeleitung und Konvektion. Entscheidend für die Erhöhung des Wärmehaltes im Treibhaus ist die Verweilzeit der absorbierten Energie. Es sind analoge Vorgänge, die das Klima wesentlich beeinflussen.

Die Entstehung der mittleren Temperatur der Erde

Die Komplexität der Zusammenhänge und ihre Unterbestimmung machen eine mathematische Lösung des Problems unmöglich. Es bleibt deshalb nur die Möglichkeit, funktionale Zusammenhänge und Randbedingungen phänomenologisch zu registrieren und als Basis für den Versuch zu nehmen, aus den Beobachtungen Aussagen zu wahrscheinlichen Veränderungen zu gewinnen.

Die existierenden stabilen Temperaturdifferenzen verursachen entsprechende Luftdruck-Unterschiede, die Luftbewegungen bewirken. Die Rotation der Erde formt die bekannten Hoch- und Tiefdruckwirbel, die mit dem Transport von Energie und Masse die Temperaturdifferenzen im Klimasystem auszugleichen suchen. Luftfeuchtigkeit (Wasserdampf) verstärkt diesen Effekt. Über warmen Ozeanen kann der Dampfgehalt der Luft bis auf 50 g/m³ ansteigen. Abkühlung in anderen Bereichen reduziert diesen Wert bis auf Null durch Kondensation.

Diese thermomechanischen Vorgänge ähneln dem Funktionsprinzip einer Dampfmaschine. In der Troposphäre entstehen solche „Klimadampfmaschinen“ ständig in Form der Hoch- und Tiefdruckgebiete. Tropische Wälder erzeugen Kühlung am Boden, Erwärmung und Ableitung von Wasser und Luft oberhalb. Im Winter verhindert der Energiefluss parallel zur Erdoberfläche eine Abkühlung der Polargebiete auf 32 K und hält das Temperaturniveau oberhalb von 200 K. Angetrieben durch unterschiedliche Wasserdichten entsprechend unterschiedlicher Temperaturen wird dieser Temperatureausgleich durch warme Strömungen an der Oberfläche der Ozeane wesentlich verstärkt; kaltes Wasser führt in Gegenrichtung „Kondensat“ und „Speisewasser“ der Klimadampfmaschinen zurück.

Die Schlussfolgerung daraus ist: Die Energiewandlungsprozesse, die der Absorption von Sonnenenergie folgen, erhöhen die Temperatur der Erde gegenwärtig auf 288 K. Während dieser Vorgänge wird der Wert der absorbierten und emittierten mittleren Energie von jeweils 240 W/m² von 5 900 K auf 288 K reduziert, verbunden mit einer Erhöhung der Entropie.

Der Beitrag der Atmosphäre

Wie vorstehend gezeigt wurde, hat der in der Atmosphäre beobachtete kontinuierliche Energietransport parallel zur Erdoberfläche zwischen Äquator und Pol einen signifikanten Einfluss auf die Temperaturver-

teilung an der Erdoberfläche. Senkrecht zur Erdoberfläche (Abb. 1) erzeugt die durch diesen Wärmetransport in der Atmosphäre gebildete Wärmesenke in der Troposphäre einen Wärmefluss, der die mittlere Temperatur von 288 K an der Erdoberfläche auf 215 K in einer Höhe von 10-20 km absinken lässt.

Dieser Temperaturverlauf entsteht aufgrund der Wärmeleitfähigkeit der Luft mit einem Wärmefluss von $2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$. In diesem beobachteten und berechneten mittleren Temperaturverlauf sind die gegenläufigen, sich kompensierenden Beiträge der Konvektion und auch der Beitrag der Verdampfungs- und Schmelzwärme zum horizontalen Energietransport nicht erkennbar. Ohne eine Erwärmung der Atmosphäre durch Absorption von Strahlung der Sonne oberhalb einer Höhe von 10-20 km, der Tropopause, würde die Temperatur mit zunehmender Höhe weiter absinken und erst nach Durchlaufen eines Minimums wieder oberhalb von 90-120 km, der Mesopause, auf die dort gemessenen Werte ansteigen, weil in diesen Höhen der Energietransport parallel zur Oberfläche als Folge des sehr niedrigen Luftdrucks ausklingt. Oberhalb einer Höhe von 10-20 km bewirkt Energiezufuhr aus der Absorption von Sonnenstrahlung die Entstehung eines Maximums der Temperatur bei etwa 270 K, die Stratopause, in einer Höhe von 50 km.

Diese Erwärmung entsteht im Wesentlichen als Nebenprodukt aus der Ionisation von Atomen der Luft durch Absorption hochenergetischer Strahlung durch die damit bewirkte Erhöhung der kinetischen Energie betroffener Moleküle. Ein Temperaturmaximum entsteht, weil die Konzentration der ionisierten Atome beim Eintritt der Strahlung der Sonne in die Atmosphäre wegen des dort geringen Luftdrucks zunächst sehr klein ist und erst mit zunehmendem Druck ansteigt. Bei diesem Anstieg wird der reaktionsfähige Anteil der Strahlung zunehmend verbraucht, so dass die Energiezufuhr sich in einer Höhe von 10-20 km über der Erdoberfläche bis auf einen nicht signifikanten Beitrag verringert. Diese einfachen physikalischen Vorgänge erklären die Temperaturabsenkung in der Troposphäre, das Minimum der Temperatur in 10-20 km Höhe, die Tropopause, das Maximum in 50 km Höhe, die Stratopause, und das zweite Minimum der Temperatur in 90-120 km Höhe, die Mesopause.

Es gibt keinen Hinweis auf eine signifikante Reaktion der Gase der Troposphäre – weder mit der einfallenden Sonnenstrahlung noch mit der Wärmestrahlung der Erdoberfläche.

Eine Emission von Infrarotstrahlung solcher Gase könnte auch keine Erwärmung der Oberfläche bewirken, da ihre Strahlungstemperatur deutlich kleiner ist als die der Oberfläche. Die von Spurengasen in der Atmosphäre ermittelten „Strahlungsantriebe“ [2] liegen um zwei Größenordnungen unter Werten, die einen signifikanten Erwärmungsbeitrag bewirken könnten.

Es verbleibt der Einfluss von Wolken. Wolken entstehen, wenn sich durch Kondensation Wassertröpfchen bilden. Grundsätzlich bestimmt die Größe des Winkels der einfallenden Strahlung auf die Oberfläche des Tröpfchens über Reflexion, Brechung oder Durchstrahlung. Der Anteil der Reflexion wird mit 20 % der Gesamtstrahlung angegeben [1]. Eine starke Bewölkung kann so eine Durchstrahlung zur Erdoberfläche auf Null reduzieren. Für die Absorption von Strahlung durch Wolken wird ein Anteil von 3 % der Gesamtstrahlung der Sonne angegeben [1]. Diese Absorption führt aber lediglich zur Verdampfung von Wasser. Es ist zu erwarten, dass das Gesamtvolumen der Wolken einem Anstieg der mittleren Erdtemperatur folgt. Allerdings wird eine dadurch zunehmende Reflexion ankommender Sonnenstrahlung dem Anstieg entgegenwirken. Die genannten Sachverhalte zeigen, dass Wolken in jedem Fall das Klima signifikant beeinflussen.

Die Versuche zur Erklärung der seit 1750 beobachteten Erwärmung

Der Lehrmeinung zur Existenz eines atmosphärischen Treibhauseffektes folgend hat eine Mehrheit der Mitglieder des Intergovernmental Panel on Climate Change [2] zusätzlich das Postulat eines anthropogenen Treibhauseffektes in der Atmosphäre aufgestellt. Danach ist die gegenwärtig beobachtete Erwärmung eine Folge der Freisetzung von sog. „Klimagasen“ wie Kohlendioxid, Methan, Stickoxiden und anderen mehr als zweiatomigen Gasen. Die erhöhte Konzentration dieser Gase soll die Absorption und die Rückstrahlung von Sonnenenergie verstärken. In Ergänzung zu den vorherigen Ausführungen stehen auch die folgenden Beobachtungen im Widerspruch zum Postulat: Während der Wechsel zwischen warmen und kalten Perioden im Verlauf der vergangenen 600 000 Jahre variierte die mittlere Temperatur um etwa 10-12 K [3]. Die Konzentration des CO₂ in der Luft folgte mit einer Variation zwischen 180 ppm (T ≈ 276 K) und 280 ppm (T ≈ 288 K) nach, entsprechend der Abhängigkeit seiner Löslichkeit im Wasser der Ozeane von der Temperatur. Seit 1750 ist in dem klimageschichtlich extrem kurzen Zeitraum von

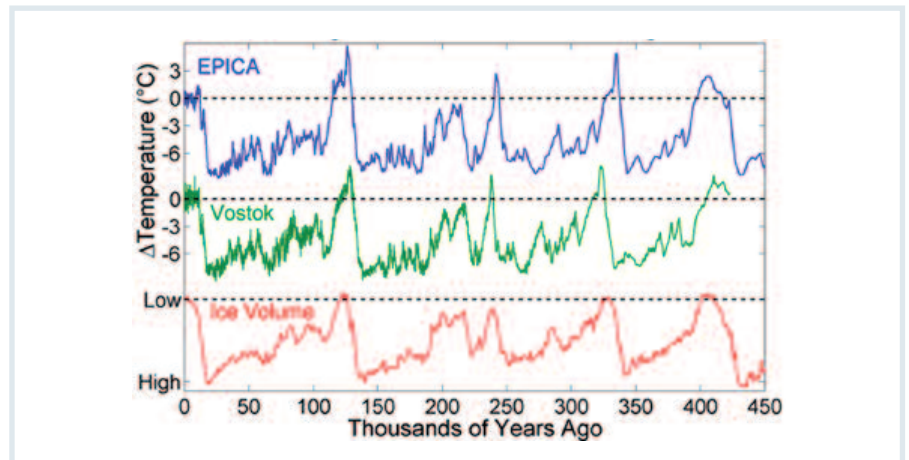


Abb. 2 Temperatur und Eisvolumen über einen Zeitraum von 420 000 Jahren (Vostok und EPICA Eisbohrkerne) [6]

250 Jahren der CO₂-Gehalt um 100 ppm auf 380 ppm angestiegen, die Erdtemperatur dagegen nur um 0,75 K [2]. Ein Anstieg der CO₂-Konzentration ging also niemals einem Anstieg der mittleren Temperatur voraus, sondern folgte ihr.

Der historische Versuch, die Entstehung des Klimas als stationären Vorgang zu betrachten, und der dazu postulierte Treibhauseffekt sollten aufgegeben werden. Die Änderungen der Konzentration von Spurengasen lassen keine Wirkung auf das Klima erkennen. Es bedarf auch nicht der Annahme einer Rückstrahlung durch Spurengase in der Atmosphäre, um die tatsächliche Erdtemperatur zu erklären. Daher ist auch der vom IPCC vorgeschlagene anthropogene Treibhauseffekt [2] zurückzuweisen.

Die historische Entwicklung des Klimas

Im Verlauf der Geschichte hat sich das Klima ununterbrochen verändert. Das „Vostok-Programm“ war einer der ersten Versuche, aus Messungen an Eisbohrkernen Informationen über die Klimageschichte zu gewinnen, die bis 420 000 Jahre in die Vergangenheit reichen [3]. Weitere Untersuchungen bestätigten den Befund und erweiterten den untersuchten Zeitraum inzwischen auf 620 000 Jahre. Die Daten zeigen das Auftreten einer Reihe ähnlicher aber nicht identischer Variationen zwischen Eiszeiten und warmen Perioden. Abb. 2 veranschaulicht die Änderungen der Temperatur im Vergleich zu ihrem zeitlichen Mittelwert. Die Dauer der Perioden schwanken um etwa 100 000 Jahre. Die Erwärmung erfolgte stets wesentlich schneller als die Abkühlung. Die letzte Eiszeit endete vor 15 000 Jahren gefolgt von einem Übergang zum gegenwärtigen Zu-

stand. Bei einem „regelmäßigen“ Ablauf der Veränderungen müsste sich die Temperatur gegenwärtig bereits um etwa 1,3 K verringert haben. Die Warmzeit dauert jedoch an und hat sich sogar verstärkt.

Aus den klimahistorischen Daten lässt sich eine Systematik ablesen, die Ähnlichkeit mit einer Schwingung hat. Die Verläufe in Abb. 2 zeigen, dass ein Wendepunkt jeweils bei Annäherung an eine Temperatur von 272 K, dem Gefrierpunkt des Wassers, auftritt. In diesem Zustand haben sich der Wirkungsgrad der thermomechanischen Prozesse und der Energietransport wesentlich verringert. Vermutlich hat sich dadurch die Stabilität des Klimazustandes soweit verringert, dass schon ein kleiner Anstoß genügte, eine Umkehr des zeitlichen Verlaufes einzuleiten. Anschließend schreitet die Erwärmung fort, bis eine zunehmende Glättung der Temperaturverteilung die Stabilität wieder verringert. Mit dieser Annahme lassen sich die Variationen des Klimas zwischen zwei instabilen Zuständen vergleichbar mit der Schwingung eines Pendels verstehen. Ein weiterer Hinweis, der diese Annahme bestätigt, ergibt sich aus dem unterschiedlichen Zeitverlauf von Erwärmung und Abkühlung. Aufgrund der stabilen Temperaturdifferenzen folgt der Energietransport bei der Erwärmung der Hauptwindrichtung, bei der Abkühlung muss die Schmelzwärme jedoch in der Gegenrichtung abgeführt werden.

Bisher wurden die Milancovic-Zyklen als eine wesentliche Ursache dieser Variationen des Klimas angesehen [4]. Zweifel an dieser Erklärung entstehen aus den vorstehenden Überlegungen. Selbst die größtmöglichen Änderungen der Intensität der eintreffenden Sonnenstrahlung, die durch Variationen der

Bahngeometrie der Erde insbesondere saisonal entstehen, reichen nicht zur Erklärung einer Temperaturänderung um 10 K aus.

Die menschliche Einwirkung auf das Klima

Trotz der grundsätzlichen Instabilität des Klimas und trotz der stochastischen Phänomene ist doch eine gewisse Systematik des Klimaverhaltens zu erkennen. Folgt man der gegebenen qualitativen Erklärung zur Entstehung des Klimas, kann man den Beginn des anomalen Klimaverhaltens und den seit 1750 beobachteten Anstieg der Temperatur auf menschliche Einwirkung zurückführen. In der Steinzeit vor etwa 12 000 Jahren hatte der Mensch Ackerbau und Viehzucht entdeckt und in diesem Zusammenhang begonnen, Wälder zu roden und Sümpfe trocken zu legen, um sie in landwirtschaftliche Nutzfläche umzuwandeln. Diese Umwandlungen in landwirtschaftliche und später zusätzlich in urbane Nutzflächen verursachen eine Erwärmung der Atmosphäre durch Steigerung der Effizienz der thermomechanischen Energiewandlungsvorgänge. Die Veränderung der klimarelevanten Eigenschaften der Erdoberfläche spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle.

Diese Entwicklung hat die bis heute andauernde exponentielle Zunahme der Bevölkerung ausgelöst und möglich gemacht. Von ursprünglich etwa 5 Mio. Menschen war die Bevölkerung vor 4 000 Jahren schon auf ca. 100 Mio. angewachsen, die erste Milliarde wurde 1804 erreicht; heute leben 6,7 Mrd. Menschen auf der Erde, bei einem Zuwachs von 100 bis 150 Mio. jährlich.

Zu Beginn dieser Entwicklung war der Flächenbedarf zur Ernährung mit etwa 2 ha pro Kopf wesentlich größer als der heutige mit nur 0,2 ha, der sich aufgrund verbesserter Methoden der Landwirtschaft und dadurch erzielter höherer spezifischer Erträge ergibt. Von den 510 Mio. km² der Erdoberfläche wurden inzwischen 20 Mio. km² in landwirtschaftliche Nutzfläche und etwa 6,5 Mio. km² in urbane Flächen umgewandelt.

Der Anstieg der Weltbevölkerung auf 6,7 Mrd. hat damit eine Strukturänderung von 25 % der gesamten Landfläche der Erde verursacht, die entsprechend einer stetigen Zunahme der Bevölkerung weiter fortschreiten wird. Eine weitere Folge dieser Entwicklung ist die vermehrte Freisetzung von CO₂ durch landwirtschaftliches und später industrielles Wirken. Regelmäßige Messun-

gen seit 1950 bestätigen einen Anstieg des CO₂-Gehaltes in der Luft um 100 ppm. Die schon seit 7 000 bis 8 000 Jahren andauernde Anomalie ist damit aber nicht zu erklären.

Es ist deshalb anzunehmen, dass die Veränderungen der Landstruktur durch den Menschen schon in der Zeit vor 7 000 bis 8 000 Jahren dazu geführt haben, dass der natürliche Klimaverlauf mit dem Eintreten einer nächsten Eiszeit ausgeblieben ist. Die wachsende Weltbevölkerung hatte das Klima bereits zu diesem Zeitpunkt soweit stabilisiert, dass ein Absinken der Temperatur um ca. 1,3 K bei „regulärem“ Klimaverlauf verhindert wurde. Im Gegensatz dazu ist die mittlere Erdtemperatur bis heute um 0,75 K angestiegen. Parallel dazu haben sich die Eismassen auf dem Land entsprechend verringert, was einen Anstieg der Meeresspiegel um mehr als 8 cm seit 1960 mit steigender Tendenz zur Folge hatte [2]. Die Menge des schwimmenden Eises hat sich ebenfalls verringert. Gegenwärtig bedeckt Eis eine Fläche von etwa 15 Mio. km², das sind 2,9 % der gesamten Erdoberfläche. Es ist wahrscheinlich, dass die mit dem Schmelzen des Eises verbundene Verkleinerung der Temperaturdifferenzen auf der Erde einem weiteren Temperaturanstieg entgegenwirken wird. Die Verringerung der Reflexion von Sonnenstrahlung durch in der Fläche reduzierte Eisflächen dürfte dagegen angesichts eines mit nur 4 % angegebenen Anteils der Gesamreflexion der Erdoberfläche an der Solarstrahlung nur geringe Auswirkungen zeigen [1].

Ausblick auf die Klimaänderung der Zukunft

Die Instabilitäten des Klimas erlauben lediglich den Versuch einer Extrapolation der beobachteten Veränderungen. Nach den obigen Ausführungen hat die Einwirkung des Menschen wahrscheinlich die seit 7 000-8 000 Jahren zu beobachtende Anomalie des Klimaverlaufs ausgelöst und damit den natürlichen Klimaverlauf unterbrochen. Für zukünftige Veränderungen des gegenwärtigen Zustandes sind drei Parameter von besonderer Bedeutung: die Fortsetzung des Eingriffes in die Landstrukturen, das Schmelzen der Eisvorräte und die Zeitverzögerung der Temperaturerhöhung, die durch das zeitliche Nachlaufen der damit verbundenen Enthalpieänderung des Klimasystems entsteht.

Ausgehend von einer Temperaturerhöhung von 0,75 K zur Schaffung der Lebensgrundlage für 6,7 Mrd. Menschen ist die Fortsetzung des Bevölkerungsanstiegs wahr-

scheinlich mit einem weiteren Anstieg der Temperatur um 0,10-0,15 K für jede zusätzliche Milliarde Menschen verbunden. Eine Beendigung der Zunahme der Weltbevölkerung würde ein Fortschreiten der Erwärmung ausklingen und den Übergang zur Eiszeit entsprechend früher beginnen lassen. Das fortschreitende Schmelzen der Eisvorräte wird wahrscheinlich den Meeresspiegel in der Größenordnung von einigen Metern ansteigen lassen und damit zu einer der größten Herausforderungen des Klimawandels werden. Die zusätzliche Wirkung der zeitlichen Verzögerung der Erwärmung lässt sich wegen der Komplexität der damit verbundenen Vorgänge nicht abschätzen.

Die Langzeitentwicklung hängt von der Dauer der fortschreitenden Änderung der Struktur der Landflächen ab. Es ist wahrscheinlich, dass die menschliche Einwirkung den typischen Klimaverlauf nicht qualitativ ändern wird. Nach Beendigung der Energiezufuhr wird sich der natürliche Verlauf ausgehend von einem höheren Niveau in eine nächste Eiszeit fortsetzen.

Literatur

- [1] „Earth's Energy Budget“, NASA. <http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/components2.gif>
- [2] IPCC: „Summary for Policymakers“. In: Solomon, S. et al: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, US.
- [3] Petit, J. R. et al: „Climate and Atmospheric history of the last 420 000 years from the Vostok ice core“. *Antarctica Nature* 399 (1999), S. 429-436.
- [4] Ruddiman, W.: „The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago“ in: *Climate Change* 61 (2003), S. 261-293.
- [5] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cf/Standardatmosphäre_1976_90km.png; das Bild steht unter der Gnu free documentation licence 1.1, einsehbar unter: <http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>
- [6] http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Ice_Age_Temperature.png; das Bild steht unter der Gnu free documentation licence 1.1, einsehbar unter: <http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>

U. Wolff, Diplomphysiker, Essen
ulrichwolff@mac.com

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. H.-J. Böhme, Essen, für konstruktive Mitarbeit, wertvolle Diskussionen und eine kritische Durchsicht der Arbeit.