

Karl Lanius

## Globaler Wandel

Vortrag, gehalten im Plenum der Leibniz-Sozietät am 24. Juni 1993<sup>1</sup>

Wir sind zu Zeitzeugen eines gesellschaftlichen Wandels geworden, der völlig unerwartet die Grenze zwischen den Machtblöcken der NATO und der Warschauer Vertragsstaaten und damit auch die DDR verschwinden ließ. Zahlreiche Analysen des Geschehens versuchen im Nachhinein den Wandel zu erklären, aber auch sie können nicht glauben machen, daß der Zeitpunkt vorhersehbar war. Eine relativ stabile Phase, der kalte Krieg, ist zu Ende. Wir befinden uns am Beginn einer chaotischen Phase, in der sich viel verändert. Das komplexe System der menschlichen Gesellschaft hängt in dieser Phase empfindlicher von Veränderungen der Anfangsbedingungen ab als in der metastabilen Phase des Kalten Krieges.

Im allgemeinen Verständnis ist eines der bemerkenswertesten Kennzeichen einer exakten Naturwissenschaft wie der Physik, daß sie aus der Kenntnis der wirkenden Naturgesetze und der Anfangsbedingungen eines Systems Vorhersagen gestattet.

Mit der klassischen Mechanik verfügte die Wissenschaft erstmals über eine Theorie, die zu fundierten Voraussagen fähig war. Sie legte den Schluß nahe, daß die Zukunft eines Systems eindeutig durch die Ausgangssituation festgelegt ist. Von nun an wurde der Wert einer wissenschaftlichen Theorie daran gemessen, in welchem Umfang sie den Bewegungsablauf realer Systeme voraussagen konnte. Erinnerung sei an die Vorausberechnungen der Konstellation der Himmelskörper im Sonnensystem. Im gleichen Maße, wie sich im 19. Jahrhundert dieses Wissenschaftsverständnis durchgesetzt hatte, wurde das Paradigma „Wissen um Vorherzuwissen“ (A. Comte) zum Wertmaßstab der Wissenschaft.

Im Gegensatz zu einfachen physikalischen Systemen, die sich exakt oder in guter Näherung durch physikalische Gesetze beschreiben lassen und eine gute Vorhersage erlauben, gelten für komplexe Systeme, wie z.B. das Sonnensystem, deterministische physikalische Gesetze, die wir zwar kennen, aus denen wir jedoch nicht das zeitliche Verhalten des Systems vorhersagen können. Die näherungsweise Lösungen der nichtlinearen Bewegungsgleichungen komplexer physikalischer Systeme erweisen sich längs der sie charakterisierenden Zeitskalen als nicht vorhersagbar.

---

<sup>1</sup> Überarbeitete Fassung des Plenarvortrages vor der Leibniz-Sozietät. Teile des Textes sind, mit freundlicher Genehmigung des Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg/Berlin/Oxford, dem Buch „Die Erde im Wandel“, 1995, entnommen.

So wissen wir heute, daß es eine unbegrenzte, gleichförmige periodische Bewegung der Himmelskörper des Sonnensystems nicht gibt. Sie verläuft chaotisch. Charakteristisch für diese Art des Bewegungsablaufs ist es, daß winzige Änderungen der Anfangsbedingungen des Systems zu ganz unterschiedlichen Bewegungsabläufen führen können. Das Studium solcher Systeme ist Gegenstand der Chaostheorie. Sie ermöglicht mittels geeigneter Modelle die Untersuchung des Bewegungsablaufs in komplexen Systemen.

## I. Die Planetenbahnen

Zur Berechnung der Bahn eines Planeten um die Sonne beschränkt man sich in einem ersten Schritt auf ein Zweikörperproblem. Das Newtonsche Bewegungsgesetz beschreibt die Geschwindigkeitsänderung des Planeten bei seiner Bewegung um die Sonne. Sie wird der Gravitationskraft zwischen den beiden Himmelskörpern gleichgesetzt. Zur Lösung der entsprechenden Differentialgleichung ist noch die Angabe von Ort und Geschwindigkeit des Planeten zu einem beliebigen festen Zeitpunkt erforderlich. Die mathematisch exakt angebbare Lösung der Gleichung ist die Kepler-Ellipse als Bahnkurve des Planeten, auf der er sich periodisch für alle Zeiten bewegt.

Die Gravitation gilt aber für alle massiven Körper. Jede Masse muß jede andere Masse anziehen und selbst angezogen werden. Wegen der gegenseitigen Einwirkung aller Himmelskörper des Sonnensystems aufeinander mußten Astronomen und Mathematiker geeignete Berechnungsverfahren erfinden, um den wahren Bahnverlauf bestimmen zu können. Da die Sonnenmasse gegenüber der Masse aller Planeten außerordentlich groß ist, kann man in guter Näherung annehmen, daß die Störung der Bahn eines Planeten auf seinem Weg um die Sonne durch alle anderen Planeten nur gering ist. Der aus der Lösung des Zweikörperproblems folgende Bahnverlauf - die Kepler-Ellipse - wird mithin als erster Schritt zur Bestimmung der wahren Bahn betrachtet. Unter dem Einfluß der Störung erfährt die Ellipse Änderungen.

Der klassische Determinismus, das Credo der Newtonschen Mechanik, postuliert eine gesetzmäßig vorhersagbare Verknüpfung von Ursache und Wirkung. Implizit schließt das die Vorstellung ein, daß auch ähnliche Ursachen zu ähnlichen Wirkungen führen. Jede Messung, etwa die Positionsbestimmung eines Planeten auf seiner Bahn, ist mit einem Meßfehler behaftet. Trotzdem waren die Astronomen von der Vorhersagbarkeit des Bahnverlaufs überzeugt. Kleine unvermeidliche Abweichungen in den Anfangsbedingungen konnten nur zu kleinen, in der Regel vernachlässigbaren Wirkungen im Bahnverlauf führen.

Diese Überzeugung brachte der Mathematiker Henri Poincaré ins Wanken. Er zeigte, daß bereits beim Dreikörperproblem keine exakte Lösung der Bewegungsgleichungen angebbar ist. Für drei massive Körper, etwa das System Son-

ne, Erde, Mond, die sich gegenseitig anziehen, sind ihre Anfangspositionen und -geschwindigkeiten bekannt. Beim Versuch, für beliebige Zeiten in Vergangenheit und Zukunft die Konfiguration des Dreikörpersystems zu berechnen, fand Poincaré, daß eine berechenbare Lösung für alle Zeiten nicht existiert. Obwohl eine Beziehung zwischen der Konfiguration der Körper und der Zeit besteht, und diese Beziehung die Konfiguration auch vollständig bestimmt, entzieht sie sich jedoch der Berechenbarkeit und damit Vorhersagbarkeit. Vorausbestimmtheit bedeutet nicht in jedem Fall auch Voraussagbarkeit.

Eine kleine Variation in den Werten der Parameter, die zur Beschreibung der Bewegung des Zweikörpersystems bzw. der Störung benutzt werden, kann gelegentlich zu „chaotischen“ Bewegungsabläufen führen. Obwohl die Bewegung dem Newtonschen Gravitationsgesetz gehorcht, zeigt ihr Ablauf einen zufallsähnlichen Charakter. Der Determinismus bleibt nach wie vor bewahrt, aber eine Kausalität in dem erweiterten Sinne „Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen“ gilt nicht mehr. Ein Systemverhalten dieser Art bezeichnet man als „deterministisches Chaos“, das auch bei einfachen deterministischen Systemen auftreten kann. Für viele der in der Natur ablaufenden Vorgänge hat sich diese empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen als die Regel erwiesen.

Poincaré hat bewiesen, daß das Mehrkörperproblem der klassischen Mechanik allgemein nicht integrierbar ist. Damit wurden Regularität und Stabilität des Bewegungsablaufs von Himmelskörpern in Frage gestellt. In den achtziger Jahren unseres Jahrhunderts ermöglichten leistungsstarke Computer die Modellierung der Bewegung der Körper im Sonnensystem. Zumindest für die kleinen Planeten, die Kometen und die unregelmäßig geformten Planetenmonde erschien ein nichtregulärer, chaotischer Bahnverlauf möglich. In neueren Untersuchungen über die Entwicklung des Sonnensystems wird gezeigt, daß nicht nur einzelne Himmelskörper, sondern die Entwicklung des Sonnensystems als Ganzes chaotisch verläuft.<sup>2</sup> Ein interessanter Befund, der jedoch wegen der dazu notwendigen Beobachtungszeiten für die Spezies *Homo sapiens* irrelevant ist.

Neben den Planeten und ihren Monden sind im Sonnensystem Kleinkörper in großer Zahl zu finden. Bereits Kepler vermutete zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter einen weiteren Himmelskörper. Giuseppe Piazzi entdeckte 1801 „Ceres“, den ersten kleinen Planeten. Zum Anfang der neunziger Jahre unseres Jahrhunderts war der Bahnverlauf von rund 5'000 kleinen Planeten, Asteroiden, bekannt. Etwa 200 davon haben einen Durchmesser von mehr als 100 Kilometern, bei weiteren 1'000 liegt er zwischen 30 und 100 Kilometern und für alle anderen ist er kleiner als 30 Kilometer. Die Gesamtzahl der Asteroiden wird auf mehr als 1 Million geschätzt. Die Bahnen der kleinen Planeten liegen im

<sup>2</sup> Sussmann, G. S.; Wisdom, T. *Science*. 257 (1992), S. 56.

Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Die Umlaufzeiten der Asteroiden liegen zwischen 2 und 4 Jahren. Trägt man in einem Diagramm die Zahl der kleinen Planeten in Abhängigkeit von ihrer Umlauffrequenz, dem Kehrwert der Umlaufzeit, auf, so zeigt diese Häufigkeitsverteilung eine Struktur mit ausgeprägten Maxima und Minima (siehe Abb. 1). Störungen im Bahnverlauf der Asteroiden um die Sonne werden überwiegend durch den benachbarten Jupiter verursacht. Bildet man das Verhältnis der Umlauffrequenzen um die Sonne von Asteroiden  $\omega_A$  zu Jupiter  $\omega_J$ , so zeigt sich, daß die Minima in der Häufigkeitsverteilung der Asteroiden bei  $2/1$ ,  $7/3$ ,  $5/2$  und  $3/1$  liegen. Bei anderen Resonanzverhältnissen wie  $1/1$  und  $3/2$  erkennt man Maxima. Unter einer Resonanz verstehen die Astronomen ein Verhältnis von Umlaufzeiten, das sich durch ganze Zahlen ausdrücken läßt. Eine  $3/1$  Resonanz bedeutet daher, daß der Asteroid dreimal um die Sonne läuft, während Jupiter einen Umlauf vollendet.

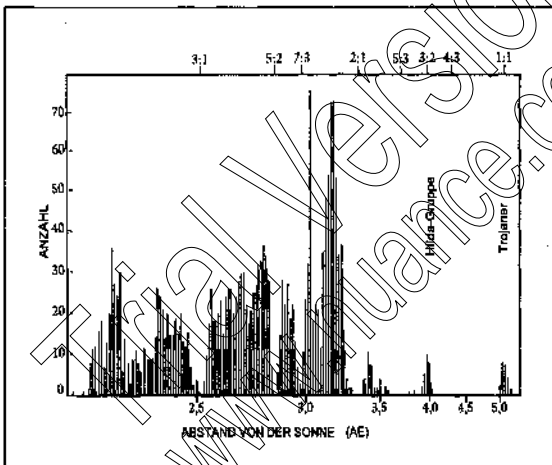


Abbildung 1

Erst vor einigen Jahren wurden geeignete Näherungsverfahren erfunden, die es ermöglichen, auf leistungsstarken Computern den Bahnverlauf von Himmelskörpern über hunderte Millionen Jahre zu verfolgen. Jack Wisdom, Astronom am MIT in Cambridge (USA), hat in einem Modell die Bahnen von Asteroiden untersucht.<sup>3</sup> Die Anfangsbedingungen wurden

so gewählt, daß die Asteroiden, deren Bahnverlauf simuliert werden sollte, im Bereich der  $3/1$  Lücke der Häufigkeitsverteilung lagen. Ein typisches Bild des irregulären chaotischen Bahnverlaufs eines Asteroiden ist in Abb. 2 gezeigt. In ihr ist die Exzentrizität der Ellipse gegen die Zeit in Jahrillionen aufgetragen. Über rund 200'000 Jahre bewegt sich der kleine Planet auf irregulären, kreisähnlichen Ellipsen kleiner Exzentrizität, die dann in langgestreckte irreguläre Ellipsen großer Exzentrizität springen. Nach rund 800'000 Jahren gehen die Bahnen wieder auf Ellipsen kleiner Exzentrizität zurück, die durch Ausbrüche großer Exzentrizität unterbrochen werden.

<sup>3</sup> Wisdom, J. *Chaotic behavior in the Solar System*. Proc. R. Soc. London A 413 (1987). S. 109.

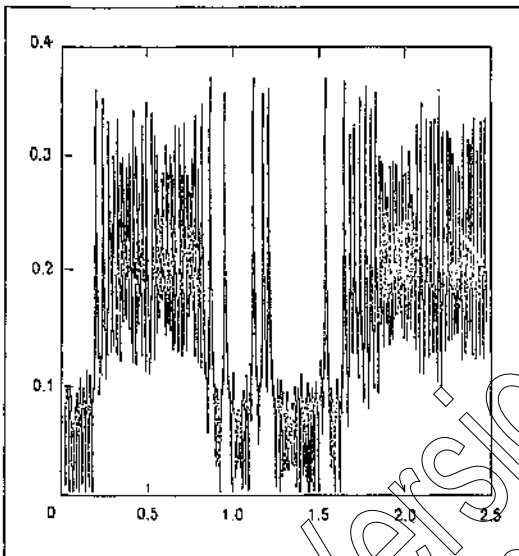


Abbildung 2

Durch Modellierung des Bahnverlaufs für einige hundert Asteroiden, deren Anfangsbedingungen der 3/1-Lücke in der Häufigkeitsverteilung entsprechen zeigt, Wisdom, daß bei allen chaotische Ausbrüche auftreten. Die Exzentrizitäten der irregulären Bahnellipsen werden so groß, daß die Asteroiden die Umlaufbahnen von Mars und Erde kreuzen. Durch deren gravitative Anziehung werden sie aus ihrer Bahn gelenkt. Das erklärt nicht nur die Lücken im Asteroidengürtel, sondern läßt uns auch

die Herkunft der Meteoriten verstehen. Deterministisches Chaos im Verhalten kleiner Himmelskörper wird zur Ursache für den Transport von Asteroiden zur Erde, ein bis in die Gegenwart wirkender Prozeß. Astronomen registrieren jährlich den „nahen“ Vorbeiflug von Asteroiden. So wurden beispielsweise in den siebziger Jahren 15 Asteroiden mit einem Durchmesser zwischen 1 und 10 Kilometern entdeckt, die sich der Erde in einigen Fällen bis auf wenige hunderttausend Kilometer näherten. Daß auch die Erde und ihr benachbarter Trabant zum Ziel eines Zusammenstoßes mit einem Asteroiden werden kann, war für Geologen und Biologen bis zum Ende der 70er Jahre kein Thema. Weltweite Aufmerksamkeit fand diese Möglichkeit erst, als Luis und Walter Alvarez die Ursache des Aussterbens der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren in den katastrophalen Folgen eines Zusammenstoßes mit einem Asteroiden oder Kometen vermuteten.

Der Einschlag eines Meteoriten mit einem Durchmesser von 10 Kilometern würde einen Krater mit einem Durchmessers von 150-200 Kilometern erzeugen und die nahezu unvorstellbar große Energie von  $10^{23}$  Joule freisetzen. Das entspricht der Explosion von 20 Billionen Tonnen TNT. Was noch 1980 eine begründete Vermutung war, ist heute gesichertes Wissen. Der Aufschlagkrater wurde entdeckt. Der Zeitpunkt des Aufschlags wurde gemessen. Er stimmt mit dem Ende der Kreidezeit vor 65 Millionen Jahren überein. Wir sind damit dem Erkennen eines komplizierten historischen Ereignisablaufs, der von nachhaltigem Einfluß auf die Evolution des Lebens war, einen Schritt näher gekommen.

Was heute die Physik mit der historischen Naturwissenschaft verbindet, ist die Nichtvorhersagbarkeit. Der Weg des Himmelskörpers, der vor 65 Millionen Jahren die Erde traf, war prinzipiell nicht vorausberechenbar, obwohl wir die Bewegungsgesetze kennen. Also waren auch die Folgen für das Leben nicht vorhersagbar. Wäre der Asteroid auf Grund einer winzigen Abweichung im Bahnverlauf an der Erde vorbeigeflogen, so hätte das Leben einen anderen Verlauf genommen. Alles komplexe Geschehen in der Natur, also auch die Evolution des Lebens, ist in seinem historischen Verlauf einmalig.

## II. Das Erdmagnetfeld

Auch heute, rund 4,6 Milliarden Jahre nach ihrer Entstehung, ist die Erde ein ruheloser Planet. Erdbeben und Vulkanausbrüche mit ihren häufig verheerenden Folgen sind spektakuläre Zeugnisse dynamischer Prozesse unter der Erdoberfläche. Erinnert sei an die beiden gewaltigen Vulkanausbrüche des Jahres 1991: in Japan der Unzen und auf den Philippinen der Pinatubo.

Neben diesen episodischen Ereignissen beobachten die Geowissenschaftler auch langsame, während eines Menschenalters kaum wahrnehmbare Vorgänge, die das Aussehen der Erdoberfläche verändern. So hat sich beispielsweise nach der letzten Eiszeit seit rund 11.500 Jahren Skandinavien schildförmig um mehr als 300 Meter gehoben. Auch gegenwärtig steigt es jährlich um 2-12 Millimeter. Für die Geowissenschaften, in erster Linie die Geologie, Geophysik und Geochemie, sind die im System Erde ablaufenden Vorgänge nur auf der Außenhaut, der Erdkruste, unmittelbar wahrnehmbar. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Erde mit ihren schalenförmig aufeinanderfolgenden Komponenten Kern, Mantel, Kruste, Hydrosphäre und Atmosphäre ein komplexes System bildet, dessen Teile wechselseitig aufeinander wirken. Zum Beispiel läßt sich die Hebung des skandinavischen Schildes nach dem Zurückweichen des Eises durch die dabei auftretende Entlastung der Erdkruste deuten. Aus der Geschwindigkeit, mit der die Hebung verläuft, kann man die Zähigkeit des Materials schätzen, das unter der Erdkruste im Erdmantel fließt.

Sichtbares Zeugnis der dynamischen Vorgänge im Erdmantel ist das zeitlich veränderliche Erscheinungsbild der Ozeane und Kontinente mit seinen Folgen, wie Vulkanismus und Erdbeben: Also auch die aus menschlicher Sicht vermeintlich unveränderliche Verteilung der Kontinente und Ozeane auf dem Globus ist nur eine Momentaufnahme.

Heute weiß man, daß die Erdkruste, deren Oberfläche die Kontinente und Ozeane bilden, keine geschlossene starre Kugelfläche ist. Sie wird von fünfzehn größeren und kleineren Platten gebildet, die sich gegeneinander bewegen. Ihre Bewegung wird durch das plastisch verformbare Material des Erdmantels bewirkt, das mit einer Geschwindigkeit von wenigen Zentimetern pro Jahr strömt.

Die Plattentektonik ist der erkennbare Ausdruck der konvektiven Strömung im Erdmantel.

Sichtbares Zeugnis der dynamischen Vorgänge im Erdkern ist das Erdmagnetfeld mit seinen wechselnden Polaritäten. Ein vergleichendes Studium magnetischer Einschlüsse im Erzgestein zeigt, daß die Erde seit mindestens 3,5 Milliarden Jahren ein Magnetfeld besitzt. Eisenoxide im Gestein konservieren die Feldrichtung im Moment des Erstarrens der Lava. Radioaktive Einschlüsse ermöglichen eine Datierung.

Die in den Gesteinen eingefrorenen Magnetfeldstrukturen beweisen, daß in geologischen Zeiten Umpolungen häufig auftraten. Radiometrisch datierte Lavagesteine zahlreicher Fundstellen belegen, daß allein in den letzten 3,6 Millionen Jahren neun Umpolungen stattgefunden haben. Die jüngste Umpolung, bei der der gegenwärtige Nordpol aus einem Südpol entstanden ist, trat vor 730'000 Jahren auf. Die paläomagnetischen Untersuchungen zeigen, daß die Polarität des Feldes nicht schlagartig kippt; sie findet in einer Übergangsperiode statt, die einige tausend Jahre dauern kann.

In der ozeanischen Kruste des auseinanderdriftenden Ozeanbodens sind die magnetische Umpolungen der zurückliegenden 170 Millionen Jahre dokumentiert (siehe Abb. 3). Augenfällig in der Abfolge der Umkehrungen ist die Ungleichmäßigkeit, mit der die Umpolungen stattgefunden haben. In den zurückliegenden 35 Millionen Jahren erfolgten 79 Umpolungen, während in der Mitte der Kreidezeit im gleichen Zeitraum keine Feldumkehr aufgetreten ist. Die zeitliche Abfolge der Umkehrungen der Feldpolarität erweckt den Eindruck einer zufälligen Folge.

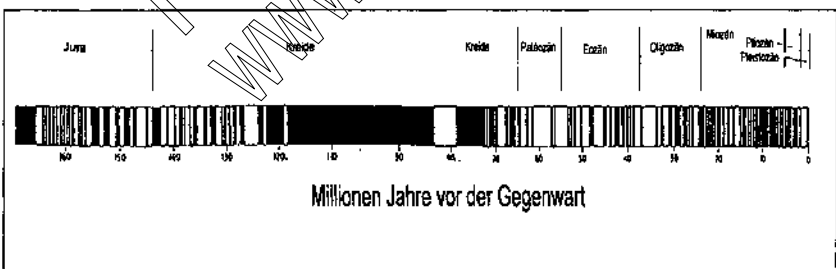


Abbildung 3

Unter den Geophysikern besteht grundsätzlich Einigkeit über die Ursache des Erdmagnetfeldes. Es wird durch Bewegungen im äußeren quasiflüssigen Erdkern hervorgerufen. Die mechanische Energie der durch die Temperaturdifferenz an den Grenzen des äußeren Erdkerns hervorgerufenen Strömung des elektrisch leitfähigen Materials erfährt eine Umwandlung in die elektromagnetische Energie des Feldes. Im Vergleich zum plastisch verformbaren Material des

Mantels strömt das quasiflüssige Material des äußeren Erdkerns schnell. Es legt einige Zentimeter bereits in der Minute zurück.

Konvektionsströme sind auf der Erde allgegenwärtig. Im Erdmantel bewirken sie das Wandern der Kontinente. Die großen ozeanischen Strömungen, wie beispielsweise der Golfstrom und der Nordatlantikstrom, erfolgen durch Konvektion. Die Bewegung gewaltiger Luftmassen, die Winde, sind Konvektionsströme. Die Wolkenbildung beim Aufsteigen warmer, feuchter Luft erfolgt ebenfalls durch Konvektion, einer speziellen Art des Wärmetransports. Dabei wird Wärme durch die bewegten Flüssigkeits- oder Gasmassen selbst transportiert. Eine systematische Untersuchung der Konvektion, die bereits im 18. Jahrhundert beschrieben wurde, begann 1900 mit den Experimenten des Naturforschers Henry Bénard. Bei der Untersuchung des Wärmetransports durch eine dünne Flüssigkeitsschicht entdeckte er einen strukturierten Bewegungsablauf. In den folgenden Jahrzehnten wurde die Konvektion von Theoretikern und Experimentatoren studiert. Obwohl beachtliche Fortschritte im Verständnis des Phänomens erzielt wurden, ist die Konvektion bis heute mathematisch nicht exakt beschreibbar. Da der Wärmetransport durch Konvektion im System Erde eine essentielle Bedeutung hat, soll diese Art der Bewegung im folgendem etwas detaillierter betrachtet werden.

Zwischen zwei waagerechten ebenen Platten befindet sich eine dünne Flüssigkeitsschicht. Haben untere und obere Platte gleiche Temperatur, ist das betrachtete System im Gleichgewicht. Die Moleküle der Flüssigkeit führen ungeordnete, zufällige Bewegungen aus. Das System befindet sich in einem Zustand, den die Physiker als unstrukturierten Zustand minimaler Ordnung bezeichnen.

Läßt man die geometrische Anordnung des Versuchs ungeändert, erwärmt aber die untere Platte, so beginnt ein Wärmetransport durch die Flüssigkeit. Bei kleiner Temperaturdifferenz erfolgt der Wärmetransport durch Wärmeleitung. Sie ist ein reiner Energietransport. Flüssigkeitsmoleküle, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft zur unteren Platte befinden, erhalten durch Stöße mit der erwärmten Platte eine höhere mittlere Geschwindigkeit und damit auch eine höhere Bewegungsenergie. Stoßen sie mit Molekülen in der darüberliegenden Flüssigkeitsschicht zusammen, übertragen sie die erhöhte Bewegungsenergie. Auf diese Weise wird die Wärme Schicht für Schicht zur oberen Platte transportiert.

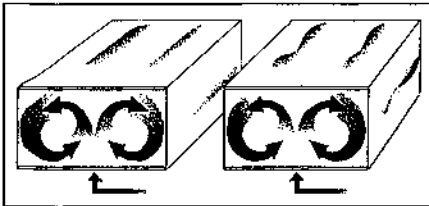


Abbildung 4

Übersteigt die Temperaturdifferenz zwischen unterer und oberer Platte dagegen einen durch die Versuchsanordnung bestimmten kritischen Wert, schlägt der Wärmetransport durch Wärmeleitung in einen Wärmetransport durch Konvektion um. In der dünnen Flüssigkeits-



schicht bilden sich walzenförmige Zellen. Die an der unteren, erhitzten Platte aufgenommene Wärme wird durch eine walzenförmige Strömung nach oben transportiert. Dort gibt die Flüssigkeit die Wärme an die kühlere Platte ab. Dadurch verringert sich die Dichte der Flüssigkeit und sie strömt wieder nach unten. In benachbarten Walzen zirkuliert die Flüssigkeit in entgegengesetzten Richtungen (siehe Abb. 4).

Bei kontinuierlicher Steigerung der Temperaturdifferenz beobachtet man Veränderungen in der Konvektionsströmung. Die Geschwindigkeit, mit der die Walzen umlaufen, wächst. Längs der Walzen bilden sich Wellen aus, die mit variierender Frequenz vor und zurück schwingen. Das einfache Walzenmuster der Konvektionsströmung geht in kompliziertere Formen über. Mit dem weiteren Anwachsen der Temperaturdifferenz werden die Bewegungsmuster der Flüssigkeit so komplex, daß sie als turbulent oder chaotisch bezeichnet werden.

Die spontane Entstehung der kooperativen Bewegung von Milliarden und Abermilliarden Molekülen ist ein erstaunlicher Vorgang. Das System nimmt eine hochorganisierte Struktur an. Ohne jede Steuerung von außen entsteht durch Selbstorganisation eine neue molekulare Ordnung.

Naturprozesse, die weitab vom Gleichgewicht verlaufen, lassen sich mathematisch nicht durch lineare Gleichungen beschreiben. Um diese Prozesse theoretisch-mathematisch zu erfassen, müssen die zu ihrer Beschreibung gewählten Variablen in nichtlinearen Gleichungen miteinander verknüpft werden. Für den Fall der konvektiven Strömung, wie sie in der Bénard-Zelle, aber auch bei der Zirkulation der Luftmassen in der Atmosphäre auftritt, wurde von dem Meteorologen Edward Lorenz ein einfaches mathematisches Modell angegeben. Es ist ein System von drei Differentialgleichungen für drei Unbekannte  $(x, y, z)$ , das von drei Parametern  $(a, b, c)$  abhängt:

$$\frac{dx}{dt} = -ax + ay \qquad \frac{dy}{dt} = bx - y - xz \qquad \frac{dz}{dt} = -cz + xy$$

Die Nichtlinearität ist in den gemischten Ausdrücken, den Produkten aus zwei Variablen  $x \cdot y$  und  $x \cdot z$ , enthalten. Diese Gleichungen lassen sich nicht exakt lösen, d.h. man kann die Variablen  $x, y$  und  $z$  nicht explizit als Funktion der Zeit berechnen.

Im ersten Abschnitt wurde das Dreikörperproblem der klassischen Mechanik betrachtet. Auch für dieses Problem gibt es keine für alle Zeiten exakt berechenbare Lösung. Näherungsrechnungen mit Hilfe leistungsfähiger Computer ergaben, daß die irregulären Bewegungsabläufe im Dreikörpersystem sogar chaotisch werden können. Am Beispiel der Asteroidenbahnen wurde der Übergang ins deterministische Chaos betrachtet.

Auch für das mathematische Modell der konvektiven Strömung läßt sich mittels Computer eine numerische Simulation vornehmen. Dazu wählt man die Anfangswerte  $x_0, y_0, z_0$  für die drei Variablen und berechnet bei festen Parameterwerten  $(a, b, c)$  die Werte  $x_1, y_1, z_1$  der Variablen zur Zeit  $t = 1$ . Mit diesen Werten werden dann die Variablen zum Zeitpunkt  $t = 2$  berechnet usw.

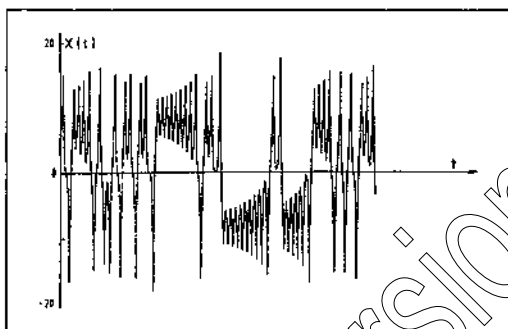


Abbildung 5

Im Resultat der Simulationsrechnung zeigt sich, daß die Lorenz-Gleichungen ein System beschreiben, das instabil gegenüber den Anfangswerten der Variablen ist. Eine mikroskopisch kleine Störung der Anfangswerte verstärkt sich rasch und verändert das makroskopische Verhalten des Systems. Führt man die

Computer-Rechnungen eine genügend lange Zeit durch, so findet man ein irreguläres, chaotisches Verhalten des Systems. In Abb. 5 ist die chaotische zeitliche Entwicklung der Variablen  $x$  des Lorenz-Modells als Funktion der Zeit  $t$  gezeigt.

Obwohl das Modell nicht eine adäquate Beschreibung der strömenden Flüssigkeit darstellt, erfaßt es doch das Wesentliche: das Verhalten beliebiger natürlicher Systeme fern vom Gleichgewichtszustand ist nicht vorausberechenbar. Es kann zum Chaos führen.

Nach diesem Exkurs über das Verhalten von Systemen, deren Zustand weitab von einem stabilen Gleichgewichtszustand liegt, kehren wir zum äußeren Erdkern und Erdmagnetfeld zurück. Die Bénard-Zelle ist eine ebene Versuchsanordnung, die Erde dagegen eine rotierende, leicht abgeplattete Kugel. Der äußere Erdkern ist eine mit einer metallischen Flüssigkeit gefüllte Schale. An ihrem inneren Rand grenzt sie an den festen Erdkern. Am äußeren Rand grenzt die Schale an den vergleichsweise festen Erdmantel. Die große Temperaturdifferenz bewirkt einen Wärmetransport durch Konvektion im äußeren Erdkern. Der Zustand dieses Systems liegt fern von einem stabilen Gleichgewicht.

Zur Beantwortung der Frage nach den Strömungsverhältnissen in einer rotierenden Kugelschale, die von festen Flächen begrenzt ist, wurde von den Geophysikern Berechnungen und Modellversuche durchgeführt. Sie ergaben das in Abb. 6 skizzierte Strömungsmuster. Um eine feste innere Kugel bilden sich walzenförmige Strudel in einer mit Flüssigkeit gefüllten Schale. Die Achsen der Walzen stehen parallel zur Drehachse. Die Stirnflächen der Walzen sind oben

und unten abgeschrägt, da sie die Neigung der begrenzenden Kugelfläche haben. Die Abschrägung an den Walzenenden bewirkt, daß die in Richtung auf

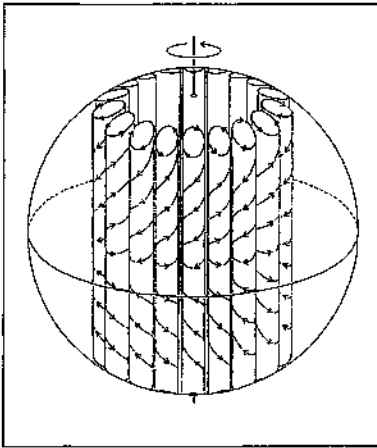


Abbildung 6

die äußere Kugelfläche strömende Flüssigkeit in der oberen Halbkugel nach unten und in der unteren Halbkugel nach oben gedrückt wird. Nur in der Äquatorebene verläuft die Strömung horizontal. Die Neigung der Endflächen hat noch eine weitere Wirkung. Die Konvektionsrollen sind nicht stationär. Sie wandern in Richtung der Rotationsbewegung relativ zur rotierenden Kugel.

Diese vielversprechende Hypothese über den Strömungsverlauf der Schmelze und die Gestalt des Magnetfeldes erklärt nicht die zeitlichen Schwankungen und das Umklappen des Feldes. Nach dem, was die Physiker über das Verhalten

komplexer Strömungen weitab vom Gleichgewicht gegenwärtig wissen, scheint es möglich zu sein, daß Schwankungen im Strömungsverlauf zum instabilen Verhalten des Systems und damit zum Umpolen des Magnetfeldes führen. Der Geodynamo braucht für seine Umkehr keinen äußeren Anstoß. Er kann von selbst aperiodisch umklappen.

### III. Das Klimasystem

Mit einer mittleren Lufttemperatur von 20,8 Grad Celsius war der Sommer des Jahres 1992 der bisher wärmste dieses Jahrhunderts in Deutschland. In Berlin zeigte das Thermometer an 67 Tagen eine Temperatur von mindestens 25 Grad Celsius an: doppelt so viele Tage wie im langjährigen Jahresdurchschnitt. Ist diese Abweichung ein Indiz für eine Klimaänderung, oder liegt sie noch im Bereich der üblichen wetterhaften Schwankungen? Ungewöhnlich warme oder kalte Jahreszeiten, deutlich über oder unter dem langjährigen Mittelwert liegende Niederschlagsmengen und ungewöhnlich starke Stürme hat es wiederholt gegeben. So verursachten sintflutartige Regenfälle im Sommer des Jahres 1993 riesige Überschwemmungen im mittleren Westen der USA. Das zeitweilige Auftreten extremer Witterungserscheinungen ist allerdings kein Beweis für eine Klimaänderung. Erst wenn dieses Wetter zur Norm wird, können wir von einer Klimaänderung sprechen. Was Wetter und Klima unterscheidet, sind die verschiedenen Zeitmaßstäbe.

Eine Schönwetterwolke existiert einige Stunden. Ein Hochdruckgebiet kann seine Lage über Tage nahezu unverändert erhalten. Beides sind typische Wettervorgänge, also Bewegungsabläufe in der Atmosphäre, die zu ihrer zeitlichen Beschreibung Zeitmaßstäbe von Stunden oder Tagen erfordern.

Beim Klima hat der Zeitmaßstab eine Skalenteilung von Jahren. Zum Beispiel ist der annähernd stetige Rückzug der Alpengletscher in den letzten 130 Jahren die Folge einer Klimaänderung. Eine andere Klimaerscheinung, das Kommen und Gehen der Warm- und Kaltzeiten in den zurückliegenden 200'000 Jahren, läßt sich längs einer Zeitskala mit einer Schrittfolge von 1'000 Jahren beschreiben. Im Vergleich zum Wetter sind klimatische Abläufe in der Atmosphäre Langzeitvorgänge. Sie umfassen das langjährige Mittel einer Region. Will man über Klimaänderungen gesicherte Aussagen machen, bedarf es in der Regel einer mindestens 20jährigen Mittelung klimarelevanter Parameter.

Zum Klimasystem zählen neben dem Träger des Klimas - der Atmosphäre - die Hydrosphäre, die Kryosphäre, die Biosphäre und die Landoberfläche. Jede Komponente des Klimasystems folgt in ihrem Verhalten den sie charakterisierenden Naturgesetzen mit einer typischen Zeitskala. So lassen sich die großräumigen Bewegungsabläufe in der Atmosphäre und im Ozean zwar durch die gleichen physikalischen Gesetze beschreiben, doch die Zeiten, in denen die Vorgänge ablaufen, betragen in der Atmosphäre Wochen, während sie sich in den Ozeanen über Jahrhunderte hinziehen können.

Durch die Änderung eines der klimarelevanten Faktoren, z.B. der Umstellung des Strömungsmusters im Ozean, entsteht ein Antrieb (forcing) auf das Klimasystem. Infolgedessen versucht sich das System, durch Anpassung, also durch Änderung seiner charakteristischen Parameter, darauf einzustellen. Die Atmosphäre reagiert auf einen Antrieb innerhalb von Stunden oder Tagen. Die Zeitskala, längs der die Ozeane auf einen Antrieb reagieren, reicht für die oberen Wasserschichten von Tagen bis zu einigen Jahrtausenden für große Tiefen. Die Kryosphäre reagiert bezüglich des Meereseises längs einer Zeitskala von Tagen, bei den Eiskappen der Pole bis zu Jahrtausenden. Prozesse an Land folgen einem Antrieb in einem Zeitraum von Tagen bis zu Monaten, während die Biosphäre beim Wachstum des Planktons innerhalb von Stunden reagiert, beim Wachstum der Bäume innerhalb von Jahrhunderten.

Auf einen Anpassungsdruck kann das Klimasystem über unterschiedliche innere Rückkopplungsmechanismen verstärkend oder abschwächend reagieren. Ausgehend von Messungs- und Beobachtungsdaten lassen sich die ablaufenden Prozesse nur in wenigen Fällen durch geeignete Modelle annähernd beschreiben. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems mit ihren spezifischen Prozessen und Zeitskalen führen zu einem komplizierten Verhaltensmuster, das gegenwärtig erst in Bruchstücken bekannt ist.

Systematische Wetterbeobachtungen gibt es seit rund 100 Jahren. Auf zuverlässigen instrumentellen Messungen begründete Aussagen über eingetretene Änderungen im Klimasystem beschränken sich daher nur auf einen relativ kurzen Zeitraum. Um das Klima früherer Zeiten erkennen zu können, ist daher nach Erscheinungen zu suchen, die durch das Klima merklich beeinflusst wurden und die dokumentiert blieben. Dazu zählen beispielsweise Baumringe und Pollenfolgen in Mooren und in Ablagerungen am Boden von Seen sowie Sedimente am Boden der Ozeane und Schichtfolgen in den Eiskappen der Pole.

Der Energiehaushalt der Erde wird durch zwei Faktoren entscheidend bestimmt: durch die Zusammensetzung der Atmosphäre und durch die Energie, die von der Sonne kommend, in die Atmosphäre eintritt.

Da die annähernd kugelförmige Erde und ihre Atmosphäre der einfallenden Sonnenstrahlung eine gekrümmte Oberfläche darbietet, beträgt die im Mittel je Quadratmeter und Sekunde einfallende Energie nur 34,2 Watt. Gegenwärtig werden annähernd 31 Prozent der eingestrahelten Leistung wieder reflektiert, so daß von der Atmosphäre und der Erdoberfläche im Mittel 237 Watt je Quadratmeter absorbiert werden. Die wichtigsten für die Reflektion verantwortlichen Bestandteile sind die Wolken, der Staub und die Gasmoleküle der Atmosphäre sowie schnee- oder eisbedeckte und vegetationslose Teile der Erdoberfläche. Jede Änderung der Eisbedeckung oder der Vegetationszonen, z.B. eine Ausdehnung der Wüsten, ändert den Anteil der reflektierten Sonnenstrahlung des Planeten - die Albedo. Eine Zunahme der Albedo würde eine Abkühlung der Erde bewirken.

Von den 237 Watt je Quadratmeter werden 68 Watt durch die in der Atmosphäre befindlichen Gase, Wassertröpfchen und Aerosole absorbiert. Die Absorption der Strahlung bewirkt eine in verschiedenen Höhen unterschiedliche Aufheizung der Atmosphäre. Von der Erdoberfläche werden im Mittel 169 Watt je Quadratmeter absorbiert. Dadurch wird den Böden und der obersten Schicht der Ozeane Wärme zugeführt. Wenn aber 237 Watt je Quadratmeter von der Erde und ihrer Atmosphäre absorbiert werden, so muß im thermischen Gleichgewicht pro Sekunde die gleiche Energie wieder abgestrahlt werden. Durch Satellitenmessungen wurde die Abstrahlung von 237 Watt je Quadratmeter bestätigt<sup>4</sup>.

Jeder erwärmte Körper strahlt Energie ab. Die von der Erde abgegebene Strahlung liegt nur im infraroten Bereich mit einem Maximum bei einer Wellenlänge von 15 Mikrometern. Das Strahlungsmaximum der Sonne liegt im Bereich des sichtbaren Lichts. Die von der Erdoberfläche im infraroten Bereich abgestrahlte Energie wird zum größten Teil durch Wasserdampf und einige Spurengase in

<sup>4</sup> Der Energiefluß pro Sekunde aus dem Erdinnern ist mit rund 0,1 Watt je Quadratmeter in dieser Bilanz vernachlässigbar.

der Atmosphäre wieder absorbiert. Nimmt ein Kohlendioxid-Molekül ein Lichtquant aus dem infraroten Teil des Strahlungsspektrums auf, beginnt es zu schwingen und zu rotieren. Nach sehr kurzer Zeit wird die aufgenommene Schwingungs- und Rotationsenergie wieder abgestrahlt. Das angeregte Molekül fällt in seinen energetischen Grundzustand zurück. Da die reemittierte Strahlung aber gleichmäßig in alle Richtungen geht, kann ein Teil erneut vom Erdboden oder der Atmosphäre absorbiert werden. Nur ein geringer Teil wird also direkt in den Weltraum entweichen. Im Wechselspiel von Absorption und Emission der Strahlung im infraroten Bereich stellt sich in der Atmosphäre in Erdbodennähe ein Zustand des thermischen Gleichgewichts ein. Ihm entspricht gegenwärtig eine globale mittlere Temperatur in Erdbodennähe von 15 Grad Celsius.

Der Anteil der im Infrarot absorbierenden Gase wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon, Distickstoffoxid und Methan bestimmt die Höhe der Gleichgewichtstemperatur der Atmosphäre in Erdbodennähe. Ändert sich der Anteil der klimarelevanten Spurengase und des Wasserdampfes, stellt sich ein neues thermisches Gleichgewicht bei einer anderen Temperatur ein. Die Erde hat ein neues Klima.

Die Zunahme eines klimarelevanten Spurengases, wie des Kohlendioxids, trägt zur Erwärmung der Erde bei. Die Zunahme des Kohlendioxids in der Atmosphäre vergrößert sowohl die Absorptionsrate im infraroten Bereich der einfallenden Sonnenstrahlung wie auch die Absorption der von der Erde reemittierten infraroten Strahlung. Für die Absorption der von der Erde ausgehenden Strahlung durch einige Spurengase hat sich der Begriff des Treibhauseffektes eingebürgert. In einem Treibhaus kann das Sonnenlicht im sichtbaren und im infraroten Bereich durch das Glasdach ungehindert eintreten. Das Dach verhindert, daß im Treibhaus entstandene warme Luft durch Konvektion verloren geht. In der Atmosphäre dagegen verhindern Wasserdampf und einige Spurengase das Entweichen der Strahlung und bewirken die Erwärmung der bodennahen Atmosphäre auf gegenwärtig 15 Grad als Gleichgewichtstemperatur im globalen Mittel.

Auf Grund der „Kugelgestalt“ der rotierenden Erde ist die von der Erdoberfläche absorbierte Strahlungsenergie ungleichmäßig verteilt. Durch den nahezu senkrechten Strahlungseinfall findet man am Äquator die wärmsten Gebiete. An den Polen ist die Erde am kältesten, da die Strahlung fast streifend einfällt und einen vergleichsweise langen Weg in der Atmosphäre zurücklegt. Neben diesem globalen Ungleichgewicht treten regionale Schwankungen auf.

Globale und regionale Temperaturunterschiede der Erdoberfläche werden durch Luft- und Meeresströmungen ausgeglichen. Die atmosphärischen Zirkulationen umfassen die Winde, die Luftbewegungen in horizontalen und vertikalen Richtungen, wobei in Tiefdruckgebieten Luft aufsteigt, während sie in Hochdruckgebieten absinkt.

Bei der Atmosphäre handelt es sich um ein offenes System, das durch die von der Sonne kommende Energie angetrieben wird. Es ist zur Selbstorganisation fähig. Die unterschiedlichen Bewegungsformen der Luftmassen und die Phasenübergänge - z.B. von Gas zu Flüssigkeit bei der Wolkenbildung - hängen kritisch von bestimmten, den Systemzustand beschreibenden Größen - etwa der Temperatur - ab.

Bereits im vorhergehenden Abschnitt über den Geodynamo wurde die Bénard-Zelle erwähnt. In ihr läßt sich das raum-zeitliche Verhalten eines offenen Systems als Funktion der Temperaturdifferenz studieren. Wächst die Temperaturdifferenz in der Zelle über einen bestimmten kritischen Wert, verliert die Strömung plötzlich ihre Periodizität, sie wird turbulent.

Dieser Übergang von einer regulären Strömung der Luftmassen in Turbulenzen charakterisiert beispielsweise den Temperaturengleich zwischen den subtropischen Hochdruckzonen und den Polargebieten. In einer in mittlerer Breite liegenden Zone kann sich auf der Nordhalbkugel eine glatte Westströmung nur so lange halten, wie die Temperaturdifferenz unterhalb eines kritischen Wertes bleibt. Übersteigt das horizontale Temperaturgefälle diesen Grenzwert, so erfolgt vorübergehend der Wärmetransport durch turbulente Wirbel. Diese großräumigen Wirbel werden als Zyklone oder Tiefdruckgebiet bezeichnet, wenn in ihrem Zentrum der tiefste Luftdruck herrscht, anderenfalls spricht man von einer Antizyklone oder einem Hochdruckgebiet. Beide großräumigen Wirbel, die in gemäßigten Breiten der Nordhalbkugel zumeist paarweise ostwärts wandern, bewirken einen schnelleren Abbau des Temperaturgefälles. Polarluft gelangt unter Erwärmung in die Tropen und tropische Luftmassen unter Abkühlung zu den Polen. Sinkt die Temperaturdifferenz unter ihren kritischen Wert im Gefolge des beschleunigten horizontalen Luftmassenaustauschs, lösen sich die Wirbel auf. Der Prozeß des Auf- und Abbaus des Temperaturgefälles kann erneut beginnen.

Das entscheidende Problem jeder Vorhersage der Bewegungsabläufe in der Atmosphäre ist die zeitliche Grenze, bis zu der eine Vorhersagbarkeit möglich erscheint, wie sie weit von einem Gleichgewichtszustand entfernte, komplexe, offene Systeme charakterisiert. Edward Lorenz veröffentlichte im Jahre 1979 eine wissenschaftliche Arbeit mit dem Titel „Kann das Schlagen eines Schmetterlingsflügels in Brasilien einen Tornado in Texas auslösen?“. Lorenz bejahte die Frage. Auch eine derart geringfügige Änderung der Anfangsbedingungen, die durch kein meteorologisches Meßsystem erfäßbar ist, kann zu einem irregulären Verhalten des Systems führen. Kein Computer wird jemals in der Lage sein, eine langfristige, hinreichend realitätsnahe Prognose für das chaotische System Wetter zu liefern.

Wie bei Erdkern und Erdmantel handelt es sich auch bei der Atmosphäre der Erde um ein offenes System, in dem der Ablauf der Bewegungsvorgänge nur

eingeschränkt vorhersagbar ist. Was beide Systeme jedoch unterscheidet, sind die unterschiedlichen Zeitmaßstäbe. So können im äußeren Erdkern bis zum Umschlag in einen qualitativ neuen Bewegungszustand Jahrtausende vergehen, während es in der Atmosphäre höchstens einige Wochen dauert. Wie paläoklimatische Daten belegen, erfolgte der Wechsel zwischen Phasen eines kälteren und eines wärmeren Klimas innerhalb einiger Jahre.

Die Gattung Homo, aus der vor ca. 250'000 Jahren der Homo sapiens hervorgeht, ist Zeitszeuge einer Klimaepoche, die als Quartäres Eiszeitalter bezeichnet wird. Sie währt seit etwa 2 bis 3 Millionen Jahren. Im Verlauf der 4 Milliarden Jahre Erdgeschichte, aus welcher Zeugnisse vorliegen, waren Klimaepochen, in denen ein mehr oder weniger großer Teil der Erdoberfläche von Eis bedeckt war, ausgesprochen selten. So vergingen zwischen dem gegenwärtigen Eiszeitalter und dem davor liegenden Permokambrischen Eiszeitalter rund 250 Millionen Jahre. In dieser Zeit war die Erdoberfläche weitgehend eisfrei.

Als Kryosphäre bezeichnet man das Eis, das Landflächen und Ozeane bedeckt. Gegenwärtig sind im Jahresmittel ungefähr 16 Millionen Quadratkilometer von Inlandeis und Gletschern überzogen. Das sind mehr als 10 Prozent der Landfläche der Erde. Die von Meereis bedeckten Flächen nehmen im Jahresmittel eine Fläche von 26 Millionen Quadratkilometern ein. Das sind etwa sieben Prozent der Meeresoberfläche.

Wie die zahlreichen noch vorhandenen Spuren des gegenwärtig anhaltenden Eiszeitalters zeigen, ist diese Klimaepoche eine Folge relativ kalter Perioden, der Kaltzeiten (Glaziale) und relativ warmer Perioden, der Warmzeiten (Interglaziale). Beherrschendes Kennzeichen einer Kaltzeit ist das Anwachsen der Eismassen. In Europa und Nordamerika bildeten sich in den Kaltzeiten des Quartären Eiszeitalters gewaltige Decken von Inland- und Gletschereis - die Berge und Täler überziehend - weit über die Grenzen ihrer Nährgebiete vordrangen.

Innerhalb der letzten 2 Millionen Jahre hat es in einem Abstand von ungefähr 100'000 Jahren Kaltzeiten gegeben. Den bisher genauesten Aufschluß über den zeitlichen Verlauf im Wechsel von Kalt- und Warmzeiten während des Quartären Eiszeitalters verdanken wir Isotopenanalysen an Bohrkernen.

Wie sich aus der zeitlichen Variation von Isotopenverhältnissen bei zahlreichen Bohrproben erkennen läßt, erlebte die Erde in den vergangenen 700'000 Jahren sieben oder acht Kaltzeiten. Um jedoch mit einer weitaus höheren zeitlichen Auflösung den Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten aufklären zu können, bedurfte es der wissenschaftlichen Erschließung eines weiteren Klimaarchivs, der Eisschilde Grönlands und der Antarktis. Die in der Kryosphäre archivierten Informationen umfassen mit mehr als 200'000 Jahren die letzten beiden Glazial-Interglazial-Zyklen der Klimageschichte unseres Planeten. Diese Informationen



ermöglichen eine vertiefte Einsicht in die Dynamik des Klimasystems, in das komplexe Zusammenspiel seiner physikalischen, chemischen und biologischen Komponenten.

Eine Gruppe von Geowissenschaftlern aus acht europäischen Staaten (das Greenland Ice-core Project, GRIP), führte in den Jahren 1990 bis 1992 eine Bohrung im zentralen Teil Grönlands (Station Summit) durch, die in einer Tiefe von 3'028 Metern den Fels erreichte. Gruppen aus den Vereinigten Staaten (das Greenland Ice-Sheet Project, GISP2), führten 28 Kilometer westlich von GRIP eine zweite Bohrung durch, die im Sommer 1993 den Fels traf. Von verschiedenen Bohrungen im Eis der Antarktis erhielt man die umfassendsten Informationen von der Wostok-Bohrung, die bis in eine Tiefe von 2'546 Metern reichte.

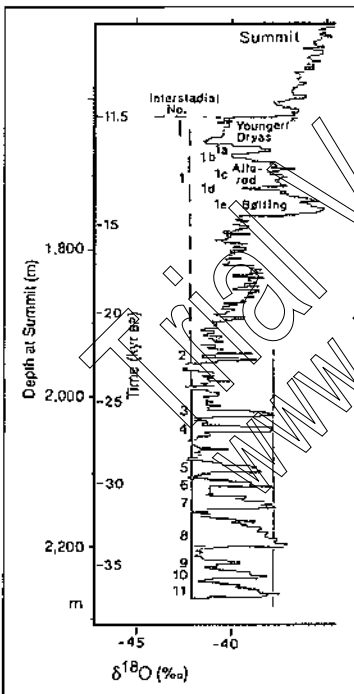


Abbildung 7

Die Metamorphose von Schnee zu Eis konservierte Klimazeugnisse vergangener Perioden in einer Vielzahl von Spuren: natürliche und künstliche radioaktive Isotope, stabile Isotope, wie die beiden Sauerstoffisotope und die beiden Isotope des Wasserstoffs, vulkanischen Staub, Aerosolteilchen und schließlich die Luft mit all ihren Komponenten, also auch die klimarelevanten Spurengase. Mit verfeinerten Meßtechniken in Speziallabors gelang es, immer mehr Spuren immer genauer zu identifizieren.

Das Problem der Datierung der Eisschichten längs eines Bohrkerns ist für die Erkennung rasch verlaufender Klimaänderungen von entscheidender Bedeutung. Erst das wachsende zeitliche Auflösungsvermögen der neueren Bohrkernanalysen ermöglichte die Entdeckung immer feinerer Strukturen im Klimaverlauf.

Das bemerkenswerteste Resultat der neuen Bohrkernanalysen sind häufige in der zeitlichen Aufeinanderfolge irreguläre Klima-

masprünge während der letzten Kaltzeit zwischen relativ kalten Phasen, den Stadien, und relativ milden, den Interstadialen. Allein in den letzten 25'000 Jahren der Würm/Wisconsin-Kaltzeit ereigneten sich elf Klimawechsel, die in Abb. 7 beziffert sind. Beim Wechsel zwischen Stadal und Interstadial änderte

sich die Temperatur um fünf bis sieben Grad Celsius<sup>5</sup>. Die Dauer der Interstadiale variierte zwischen 500 und 2'000 Jahren. Besonders bemerkenswert ist der steile Temperaturanstieg beim Übergang von einer kalten zu einer warmen Phase, der nach diesen Messungen stets nur einige Jahrzehnte dauerte. Die Abkühlung vom Interstadial zum Stadial erfolgte schrittweise über einen längeren Zeitraum.

Während des Höhepunktes der letzten Kaltzeit vor 18'000 Jahren lag die Oberflächentemperatur im jährlichen Mittel um rund 10 Grad Celsius niedriger als heute. Die mittlere Wintertemperatur in Nordwesteuropa lag 15 ÷ 20 Grad unter den gegenwärtigen Werten. Diese starke winterliche Abkühlung war bedingt durch die Meeresvereisung, die sich bis in eine Breite von 45 Grad Nord erstreckte. Die Temperatur des Oberflächenwassers der tropischen Ozeane ging um rund vier Grad zurück.

Die Würm/Wisconsin-Kaltzeit endete vor 11'500 Jahren mit dem Übergang vom Stadial der Jüngerer Dryas zur präborealen Phase, dem Beginn der Neowarmzeit. Die klimatischen Verhältnisse änderten sich im Bereich des Nordatlantiks drastisch innerhalb weniger Jahrzehnte. Die mittlere Temperatur stieg um sieben Grad Celsius. Die Grenze des Wintereises, die während der Jüngerer Dryas noch in der Biskaya lag, verschob sich nordwärts in die Norwegensee.

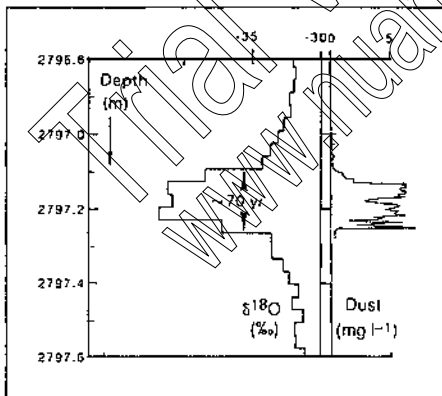


Abbildung 8

Insgesamt zeigt das Klima während der Neowarmzeit einen bemerkenswert stabilen Verlauf, wenn man ihn mit den abrupten Klimasprüngen der letzten Kaltzeit vergleicht. Daraus jedoch zu folgern, daß ein bistabiles Klima nur während einer Kaltzeit auftreten kann, wäre ein voreiliger Schluß. Das belegt die Analyse des GRIP-Bohrkerns aus einer Tiefe von 2'790 bis 2'870 Metern.<sup>6</sup> Diesem Abschnitt entspricht die Eem-Warmzeit vor 115'000 bis 135'000 Jahren.

<sup>5</sup> Die Relation zwischen dem Verhältnis der Sauerstoffisotope  $^{16}\text{O}$  und  $^{18}\text{O}$  die Größe  $\delta^{18}\text{O}$ , gemessen in Promille, und der Temperatur  $T$ , bei der ein Niederschlag fällt, ist komplex. Sie hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, z.B. dem Isotopenverhältnis im Ozean, aus dem Wasser verdunstete. Man verwendet daher eine empirisch ermittelte Relation, die über einen längeren Zeitraum gemessen wurde. Für Grönland hat diese Beziehung folgende Form:  $\delta^{18}\text{O} = 0.67T - 13.7$ .

<sup>6</sup> Greenland Ice-core Project Members: Ankin, M. et al. *Nature*. 364 (1993) 203.

Das bemerkenswerteste Resultat der Untersuchungen sind die abrupten, irregulären Klimasprünge während der Eem-Warmzeit. Abb. 8 zeigt den letzten Temperatursprung während dieser Warmzeit. Innerhalb von 10 Jahren sank die Temperatur um 14 Grad Celsius. Die kalte Phase im Bereich des Nordatlantik dauerte rund 70 Jahre. Die Variation der Staubkonzentration verdeutlicht, daß die Rückkehr in die warme Phase etwas langsamer erfolgte als der Temperatursturz.

Wir wissen, welche Faktoren eine Klimaänderung beeinflussen können. Wir wissen nicht, wie diese Faktoren zusammenwirken. Bei der Diskussion der Ursachen sollten wir uns stets vor Augen halten, daß eine relativ geringfügige Änderung eines klimarelevanten Antriebsfaktors in einer sich selbst verstärkenden Reaktionsfolge zu einem Klimaumschlag führen kann.

Angesichts der neuen Erkenntnisse erscheint es unzulässig, das globale Klimasystem als annähernd stabil zu betrachten und bei Klimaänderungen mit einem Zeitmaßstab von Jahrhunderten zu rechnen. Es ist nicht auszuschließen, daß neben dem Wetter auch das Klima einen chaotischen Verlauf nehmen kann, daß also längs einer Zeitskala von wenigen Jahrzehnten Übergänge zwischen verschiedenen Klimazuständen auftreten werden.

#### IV. Mensch und Umwelt

Vermutlich begann die bisher unaufhaltsame weltweite Vorherrschaft des anatomisch modernen Menschen mit dem Ende der letzten Kaltzeit. Innerhalb einiger tausend Jahre drang er bis in die letzten Winkel der Erde vor. Lebte er zunächst noch in einem annähernden Gleichgewicht mit seiner Umwelt, beschränkt er spätestens mit den ersten Hochkulturen den Weg der Dominanz gegenüber allen anderen Lebensformen.

Eine weitere bedeutende Etappe der Entwicklung begann mit der Industrialisierung. Der einsetzende Prozeß hat inzwischen ein Ausmaß erreicht, das den Gleichgewichtszustand zwischen Mensch und Umwelt zerstört hat. Wir bewirken nicht nur ein in seiner Geschwindigkeit und Gründlichkeit einmaliges Massenaussterben unter allen Lebensformen der Erde, sondern sind auch auf dem besten Weg, das Klimasystem der Erde zum Kippen zu bringen.

Alle Arten, von den Bakterienarten bis zum Homo sapiens, vermehren sich durch Selbstreproduktion. Je mehr fortpflanzungsfähige Organismen es gibt, um so mehr Nachkommen zeugen sie. Das Wachstum der Population ist stets der Zahl der bereits vorhandenen Organismen proportional. Dem entspricht die Definition eines exponentiellen Wachstumsgesetzes: Der Zuwachs in einem bestimmten Zeitintervall - also die Wachstumsrate - ist der schon vorhandenen Menge proportional. Ein exponentielles Wachstum wird häufig auch mit dem

Begriff der Verdopplungszeit beschrieben: Sie ist die Zeitspanne, in der sich eine exponentiell wachsende Menge verdoppelt.

Wir kennen die Größe der Population des eiszeitlichen Menschen nicht. Indirekte Hinweise sprechen dafür, daß sie nicht groß gewesen war. Für die weitere Entwicklung der menschlichen Population liegen Schätzungen vor, die um so zuverlässiger werden, je mehr sie sich der Gegenwart nähern. Um 300 v.u.Z. erreichte die Weltpopulation 100 Millionen Individuen. Sie wuchs bis zur Mitte des 17. Jahrhunderts auf 500 Millionen an. Die jährliche Wachstumsrate betrug zu dieser Zeit rund 0,3 Prozent. Das entspricht einer Verdopplungszeit von 250 Jahren. Bis 1900 war die Weltbevölkerung auf 1,65 Milliarden angestiegen. Die Verdopplungszeit war auf 140 Jahre gesunken.

Allein in den Jahren von 1950 bis 1990 hat sich die Weltbevölkerung mehr als verdoppelt. Sie stieg von 2,52 auf 5,29 Milliarden Menschen. Auch in diesen 40 Jahren blieb die jährliche Wachstumsrate nicht konstant. Mittelt man über die Jahre von 1950 bis 1955, beträgt ihr Wert 1,79 Prozent. Die jährliche Wachstumsrate stieg für die Periode von 1965-1970 auf 2,06 Prozent. Das entspricht einer Verdopplungszeit von nur 34 Jahren. In den sebziger Jahren fiel die jährliche Wachstumsrate. Für die Periode 1975-1980 betrug sie 1,73 Prozent. Ungefähr bei diesem Wert, der einer Verdopplungszeit von rund 40 Jahren entspricht, ist sie in den achtziger Jahren stehen geblieben.

Die Daten zeigen, daß die Weltbevölkerung seit dem Mittelalter weit stärker als exponentiell wächst. Die Verdopplungszeit blieb nicht konstant, sondern reduzierte sich von 250 auf 40 Jahre. Die Ursachen dieser Entwicklung sind bekannt. Die Geburtenrate blieb bei knapp 40 Geburten auf 1'000 Menschen bis in die fünfziger Jahre nahezu konstant, während die Sterberate seit Mitte des 19. Jahrhunderts ständig abgenommen hat.

Prognosen über die weitere Entwicklung der Weltbevölkerung werden in regelmäßigen Abständen durch die Vereinten Nationen vorgelegt. Die Vorhersage aus dem Jahre 1990 prognostiziert, daß im Jahre 2025 die Erde von 8,504 Milliarden Menschen bevölkert sein wird.<sup>7</sup> Diese mittlere Schätzung wird durch eine obere bzw. untere Variante in Höhe von 9,444 bzw. 7,591 Milliarden Menschen eingegrenzt.

Seit einigen Jahren wird einer breiten Öffentlichkeit zunehmend bewußt, daß ein exponentielles Wachstum der Weltbevölkerung mit den oben geschilderten Besonderheiten nicht ohne Einfluß auf unseren Lebensraum bleiben wird. Der wachsende Verbrauch natürlicher Ressourcen, wie Wasser, Brennstoffe, Wälder und landwirtschaftliche Nutzflächen, aber auch die durch Menschen produzierten Abfälle in fester, flüssiger und gasförmiger Form hat ein Ausmaß angenom-

<sup>7</sup> *World Population Prospects 1990*, United Nations, New York 1991.

men, das unseren Lebensraum nachhaltig verändert und auch in Zukunft weiter verändern wird.

Das Problem einer anthropogen bedingten Änderung des Klimas hat eine breite Öffentlichkeit erreicht. Dabei werden die Begriffe „Treibhauseffekt“ und „globale Erwärmung“ als Synonyme verwendet. Ob und in welchem Umfang diese Gleichsetzung berechtigt ist, bedarf einer Prüfung.

Experten aus aller Welt wurden durch die UNO in einem „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) zusammengeführt. Auf Grundlage von Modellrechnungen kam eine Arbeitsgruppe des IPCC zu folgenden Vorhersagen<sup>8</sup>:

- Wenn sich die Emission klimarelevanter Treibhausgase im gleichen Maße wie bisher fortsetzt (business as usual), wird die globale Temperatur in Erdbodennähe im Laufe des kommenden Jahrhunderts um  $0,2 \div 0,5$  Grad Celsius pro Jahrzehnt steigen.
- Die Landoberflächen werden sich schneller erwärmen als die Ozeane. Die Erwärmung in hohen nördlichen Breiten wird im Winter stärker sein als im globalen Mittel.
- Regionale Klimaänderungen werden vom globalen Mittel abweichen. Die Verlässlichkeit der Vorhersage regionaler Änderungen ist gering.
- Wenn sich die Emission der klimarelevanten Treibhausgase unverändert fortsetzt, wird der Meeresspiegel im globalen Mittel um  $3 \div 10$  Zentimeter pro Jahrzehnt ansteigen.

Diese Vorhersagen sind einer breiten Öffentlichkeit bekannt. Weit weniger kennt die Allgemeinheit die vom IPCC formulierten Einschränkungen:

- Die Voraussagen sind mit vielen Unsicherheiten belastet, insbesondere was Eintrittszeit, Ausmaß und regionale Verteilung der vorhergesagten Klimaänderungen betrifft. Dies beruht auf unserem unvollständigen Verständnis der
  - Quellen und Senken der Treibhausgase,
  - Wolken, die das Ausmaß der Klimaänderungen stark beeinflussen,
  - Ozeane, die den zeitlichen Verlauf und die regionale Verteilung der Klimaänderungen beeinflussen,
  - polaren Eiskappen, die für die Vorhersage des Meeresspiegels von Bedeutung sind.
- Die Komplexität des Klimasystems bringt es mit sich, daß Überraschungen nicht auszuschließen sind.

Der am häufigsten verwendete Parameter, welcher den Zustand des Klimasystems charakterisiert, ist die mittlere globale Temperatur in Erdbodennähe. In der Prognose des IPCC steht die Vorhersage ihres Anwachsens an erster Stelle.

<sup>8</sup> Houghton, I. T.; Jenkins, G. I.; Ephraums, J. S. (eds.). *Climate Change*. The IPCC Scientific Assessment. Cambridge 1990.

In zehnjähriger Arbeit haben die Klimatologen Philip Jones, Tom Wigley und Peter Wright aufgezeichnete Temperaturwerte zu Land und zur See kritisch gesichtet, gewertet und die ausgewählten Daten systematisch auf Fehlerquellen korrigiert.<sup>9</sup> Das Resultat ihrer Analyse, ergänzt durch die Meßwerte der letzten Jahre, ist in Abb. 9 dargestellt.

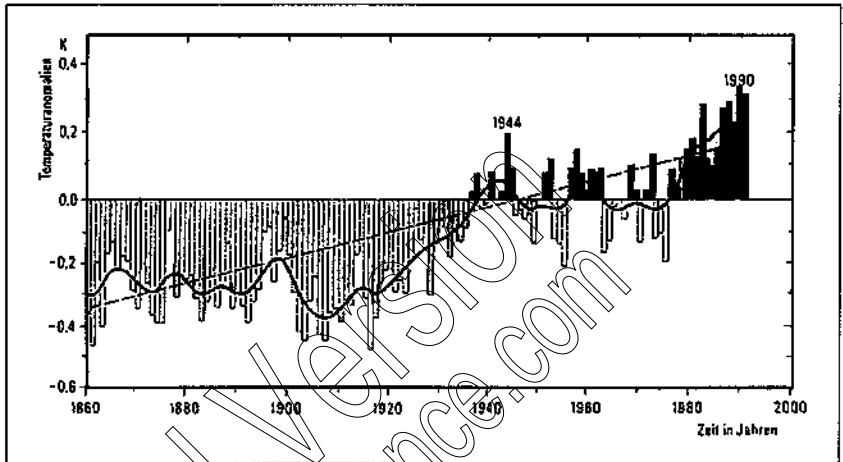


Abbildung 9

Die mittlere Temperatur in Bodennähe zeigt eine ausgeprägte Variation von Jahr zu Jahr. Betrachtet man die über jeweils zehn Jahre gemittelten Kurven, erkennt man, daß die globale mittlere Temperatur in Erdbodennähe bis zum Jahre 1910 auf einem einheitlichen Niveau geblieben ist, dem wellenförmige Schwankungen mit Amplituden von zehntel Grad überlagert sind. Zwischen 1910 und 1945 ist die Temperatur fast monoton angestiegen, um dann bis in die siebziger Jahre unter Schwankungen leicht abzunehmen. Um 1980 setzte ein deutlicher Anstieg ein. Die sechs wärmsten Jahre der Meßperiode waren in aufsteigender Reihenfolge die Jahre 1989, 1987, 1983, 1988, 1991, 1990. Insgesamt zeigt der globale Temperaturverlauf einen Trend zu höheren Temperaturen. Seine Berechnung ergibt einen Anstieg von  $0,45 \pm 0,15$  Grad Celsius während der zurückliegenden 100 Jahre.

Bei der Diskussion der gegenwärtig ablaufenden Klimaänderung befinden sich die als Antriebsfaktoren wirkenden klimarelevanten Spurengase im Mittelpunkt des allgemeinen Interesses. Ihr Anwachsen durch anthropogene Aktivitäten ist sicher. Im folgenden wollen wir die zeitliche Entwicklung der Konzentration zweier Spurengase betrachten.

<sup>9</sup> Jones, P. D.; Wigley, M. L.; Wright, P. B. *Nature*. 322 (1986) 430 und Jones, P. D.; Wigley, M. L. *Spektrum der Wissenschaften*. 10 (1990) 108.

Abgesehen vom Wasserdampf ist Kohlendioxid das klimarelevante Gas mit der höchsten Konzentration. Das troposphärische  $\text{CO}_2$  wird regelmäßig in einer wachsenden Zahl von Stationen gemessen. Nach Daten aus Gletscherbohrkernen lag die  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Luft um 1800 bei rund 280 ppm. Danach stieg sie zunächst um ca. 0,7 ppm pro Jahr. Der jährliche Anstieg liegt gegenwärtig bei 1,8 ppm.

Der exponentielle Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre veranschaulicht die Diskrepanz zwischen dem Aufnahmevermögen der Senken und der Ergiebigkeit der Quellen (siehe Abb. 10). Selbst wenn alle zusätzlichen anthropogenen Quellen sofort versiegen würden, könnte sich ein neues Gleichgewicht erst in Jahrhunderten wieder einstellen.

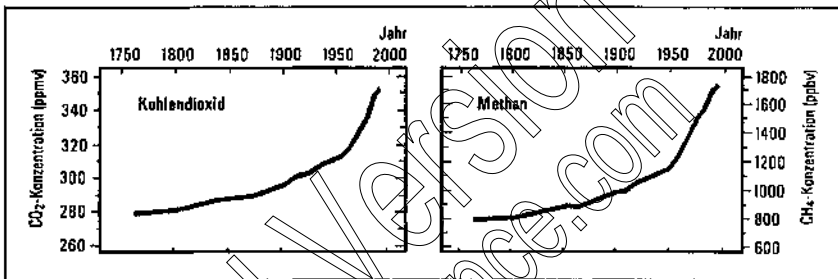


Abbildung 10

Wie beim bio-geochemischen Kohlenstoffkreislauf wurde in den letzten 200 Jahren auch das Gleichgewicht zwischen Quellen und Senken im Methankreislauf durch menschliche Aktivitäten gestört. Während seit Beginn der Industrialisierung die  $\text{CO}_2$ -Konzentration um 25 Prozent angewachsen ist, hat sich die  $\text{CH}_4$ -Konzentration der Atmosphäre mehr als verdoppelt. Sie stieg von ca. 800 ppb im Jahre 1800 auf einen global gemittelten Volumenanteil von 1720 ppb im Jahre 1990. Der jährliche Anstieg der Methankonzentration beträgt gegenwärtig  $15 \div 18$  ppb. Ihm entspricht eine in der Atmosphäre verbleibende Methanmenge von  $45 \pm 10$  Millionen Tonnen pro Jahr. Rund die Hälfte des jährlichen Methanaufkommens lassen sich mehr oder weniger direkt auf die Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung zurückführen. Vergleicht man die stärker als exponentiell wachsende Weltbevölkerung mit dem zeitlichen Verlauf des Methananstiegs, erweisen sich beide Kurven als nahezu deckungsgleich.<sup>10</sup>

Die absorbierende Wirkung eines Spurengases in der Atmosphäre hängt einerseits davon ab, welche Menge dieses Gases sich in der Atmosphäre befindet, andererseits davon, in welchem Umfang sich der Wellenlängenbereich, in dem es absorbiert, mit dem anderer Treibhausgase überdeckt. Die in der Atmosphäre vorhandene  $\text{CO}_2$ -Menge ist bereits so groß, daß ihr weiteres Anwachsen nur zu

<sup>10</sup> Nach neuesten Messungen verringert sich ungefähr seit Mitte 1992 der Anstieg der Methankonzentration. Eine Erklärung für diese Überraschung gibt es noch nicht.

einer geringfügigen Erhöhung des Absorptionsvermögens führt. Im Gegensatz dazu absorbiert Methan in den Bereichen des Spektrums der Infrarotstrahlung, die sich kaum mit denen anderer Gase überdecken. Hinzu kommt, daß die bisherige Methankonzentration nicht ausreicht, um eine Abstrahlung in diesem Spektralbereich völlig zu verhindern. Bezogen auf ein  $\text{CO}_2$ -Molekül der Atmosphäre hat daher ein  $\text{CH}_4$ -Molekül gegenwärtig ein 21mal höheres Treibhauspotential.

Vergleicht man die Anteile der verschiedenen Spurengase am zusätzlichen Treibhauseffekt entfällt auf das Kohlendioxid allein 50 Prozent. Berücksichtigt man auch die anderen Spurengase, ist ihre Wirkung einer  $\text{CO}_2$ -Konzentration der gleichen Größe äquivalent. Die Konzentration des  $\text{CO}_2$  ist seit Beginn der Industrialisierung um 25 Prozent gestiegen. Berücksichtigt man die anderen Spurengase, ausgedrückt durch ihr  $\text{CO}_2$ -Äquivalent, so beträgt der Anstieg 50 Prozent.

Vergleichen wir die Klimaänderungen - wie sie sich im Anstieg der mittleren globalen Temperatur in Erdbodennähe um  $0,45 \pm 0,15$  Grad Celsius erkennen läßt - mit dem Anstieg von 50 Prozent des  $\text{CO}_2$ -Äquivalents. Obwohl wir den halben Weg zur äquivalenten Verdoppelung des Kohlendioxids bereits zurückgelegt haben, lassen die bisher erkennbaren Trends bei der Änderung der Klimaparameter keinen eindeutigen Schluß bezüglich einer Klimaänderung zu.

Die bisher beobachteten Trends liegen im Bereich der natürlichen Klimaschwankungen, wie sie im Holozän einige Male aufgetreten sind. Alternativ ist es auch möglich, daß eine durch uns bewirkte globale Klimaänderung durch natürliche Vorgänge verringert und damit verschleiert wird. Ein beobachteter Klimatrend kann durch Überlagerung vieler klimarelevanter Antriebsfaktoren zustande kommen. Es ist daher zunächst nicht möglich, aus wenigen unsicheren Trends auf einen bestimmten Antriebsfaktor zu schließen. Wir wissen allerdings, welche bisher identifizierten Antriebsfaktoren eine Klimaänderung beeinflussen können. Wir wissen nicht, wie diese Faktoren zusammenwirken. Bei der Bewertung bisheriger Vorhersagen von Klimamodellen sollten wir stets bedenken, daß eine relativ geringfügige Änderung eines klimarelevanten Faktors in einer sich selbst verstärkenden Reaktionsfolge zu einem Klimaumschlag führen kann.

Fassen wir zusammen:

- Die klimarelevanten Spurengase zeigen ein anhaltendes exponentielles Wachstum ihrer Konzentration in der Atmosphäre. Zum Ende der achtziger Jahre hat sich ihr Anteil, ausgedrückt durch das  $\text{CO}_2$ -Äquivalent, gegenüber der vorindustriellen Zeit um 50 Prozent vergrößert.
- Eingetretene Änderungen von Klimaparametern, wie der mittleren globalen Temperatur in Erdbodennähe, lassen sich nicht eindeutig dem Anwachsen der klimarelevanten Spurengase zuordnen.



- Durch die Vorhersagen der globalen, gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodelle ist die Erwartung der Öffentlichkeit auf eine allmähliche Erwärmung der Atmosphäre in Erdbodennähe fixiert. Erinnern wir uns an die Mahnung des IPCC: »However, the complexity of the system means that we cannot rule out surprises.« Die Berechtigung dieser Warnung beweisen das Ozonloch und der Klimaverlauf auf der Nordhemisphäre während der zurückliegenden 135'000 Jahre.
- Das Klimasystem der Erde ist ein offenes System in einem vom thermodynamischen Gleichgewicht weit entfernten Zustand. Eine Prognose über das Langzeitverhalten solcher Systeme ist unmöglich.
- Eine geringfügige Änderung der Anfangsbedingungen solcher Systeme führt über periodische und quasiperiodische Zustände zum Chaos bei der Lösung der nichtlinearen Gleichungen, durch die das komplexe System modelliert wird.
- Wie uns der Klimaverlauf der Würm/Wisconsin-Kaltzeit und der Eem-Warmzeit zeigt, sind unetwige Klimasprünge möglich. Wann sie jedoch auftreten, ist nicht vorhersagbar.

Viele Menschen haben begonnen, mit wachsendem Umweltbewusstsein ihre Verhaltensweisen und ihre Wertvorstellungen zu verändern. So wichtig ein individuelles Umdenken ist - das allein reicht nicht aus. Als Art haben wir uns über die ganze Erde verteilt. Unsere Zahl wächst bisher ungebremst exponentiell an. Die Menschheit muß, über alle Gruppeninteressen hinweg versuchen, die globalen ökologischen Auswirkungen ihres Handelns wahrzunehmen. An der Schwelle zum 21. Jahrhundert steht die Menschheit vor der Herausforderung, ein bewußt durchdachtes und künftigen Generationen verpflichtetes Management ihres Handelns und ihres Wachstums zu suchen, um einen katastrophalen Umbruch des Systems zumindest hinauszuzögern. Zu vermeiden ist er vermutlich nicht mehr.