

Wir wollten den Ausdruck dieses Beitrags gerade zur Endkorrektur verschicken, als wir die Nachricht vom unerwarteten Tod des Autors erhielten. Nun wird dies der letzte Beitrag von Karl Lanius in den „Sitzungsberichten“ bleiben. Noch einmal hat er seine Stimme zur Warnung vor einem nicht mehr beeinflussbaren Wandel, einem „Umkippen“ in Natur und Gesellschaft erhoben. Nehmen wir seine Warnungen ernst, suchen wir nach Lösungen, solange es nicht zu spät ist. So wird Karl Lanius noch lange in unseren Gedanken weiter wirken. Die Redaktion

Karl Lanius †

Tippling Points-Beispiele aus Natur und Gesellschaft

Vortrag im Plenum der Leibniz-Sozietät am 10. Dezember 2009

Eine der bedeutendsten Motivationen für das Streben nach wissenschaftlicher Erkenntnis ist, aus der Kenntnis der Naturgesetze Prognosen über den Ablauf von Prozessen geben zu können. Wenn ein Pilot zu einem Atlantikflug startet, will er wissen, welches Wetter ihn während des Fluges erwartet; wenn menschliche Aktivitäten einen weltweiten Anstieg klimarelevanter Spurengase, z.B. Kohlendioxid, in der Atmosphäre bewirken, wollen wir wissen, welche Auswirkungen dieses auf das Klimasystem der Erde haben wird.

In beiden Fällen haben wir es mit kausal determinierten Prozessen zu tun, für die wir im Wesentlichen sowohl die wirksamen Naturgesetze als auch die Anfangsbedingungen der Systeme kennen. Wie wir heute wissen, sind für solche komplexen Systeme über eine gewisse Zeit hinaus keine Vorhersagen möglich – auch keine Wahrscheinlichkeitsaussagen. Ursache dieses Verhaltens sind Eigenschaften, die bewirken, dass winzige Differenzen in den Anfangsbedingungen zu gewaltigen Differenzen in den Folgeprozessen führen können. Selbst bei voller kausaler Determiniertheit aller Einzelprozesse erweisen sich komplexe Systeme über eine charakteristische Zeit hinaus nicht nur praktisch, sondern auch theoretisch als unvorhersehbar. Im Falle des Wet-

ters liegt dieses Zeitintervall bei mehreren Tagen, im Falle des Klimas vermutlich bei einigen Jahrzehnten.

Ein tipping point – oder Kippunkt – bezeichnet eine kritische Schwelle, an der eine winzige Veränderung zu einer qualitativen Änderung in der weiteren Entwicklung des Systems führen wird. Nicht nur komplexe natürliche Systeme können kippen. Auch das sozialökonomische System, das gegenwärtig unser Leben bestimmt, befindet sich in einer tiefen Krise. Wir können nicht vorhersagen, ob es sich einem tipping point soweit nähern wird, dass bei seinem Überschreiten eine Rückkehr zu den bisherigen gesellschaftlichen Verhältnissen unmöglich sein wird.

1. Wissenschaft und das komplexe System Erde

Als das erste Jahrtausend unserer Zeitrechnung zu Ende ging, erwarteten Millionen Menschen die in der Offenbarung des Johannes vorhergesagte Apokalypse. Sie hat nicht stattgefunden. Zum Ausgang des zweiten Jahrtausends beunruhigt viele Menschen erneut eine mögliche Katastrophe. Sie ist unserem Umgang mit den Grundlagen des Lebens zuzuschreiben. Die Wissenschaft kann einen Beitrag zum Erhellern der Probleme leisten. Vor der Gemeinschaft aller Menschen steht die Aufgabe, Entscheidungen zu treffen.

Mit der klassischen Mechanik verfügte die Wissenschaft erstmals über eine Theorie, die zu fundierten Voraussagen befähigte. 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 kann. Erinnert sei an die Vorausberechnungen der Konstellation der Himmelskörper im Sonnensystem. Im gleichen Maße wie sich im 19. Jahrhundert dieses Wissenschaftsverständnis durchgesetzt hat, wurde das Paradigma „Wissen um Vorherzuwissen“ 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 komplexere 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.

Wir wissen heute, dass es eine unbegrenzte, gleichförmige periodische Bewegung aller Himmelskörper des Sonnensystems nicht gibt. Sie verläuft chaotisch. Es ist charakteristisch für diese Art des zeitlichen Verlaufs, dass winzige Änderungen der Anfangsbedingungen des Systems zu ganz unterschiedlichen Bewegungsabläufen führen. Das Studium solcher Systeme ist Gegenstand der Chaostheorie.

Die physikalischen Gesetze, die die Bewegung der Körper des Sonnensystems beschreiben, lassen sich angeben. Es ist ein vergleichsweise einfaches System, das aus einer bestimmten Menge von Himmelskörpern besteht, zwischen denen nur die Schwerkraft wirkt. Eine numerische Integration der Bewegungsgleichungen ermöglicht Aussagen über den Verlauf der Bahnen von Himmelskörpern – wenn ein ausreichend langer Zeitraum gewählt wird. So ändern sich die Bewegungen einiger Himmelskörper sprunghaft, in einem für sie charakteristischen Zeitmaßstab von Millionen Jahren.

Quantitative Untersuchungen des chaotischen Verhaltens eines komplexen Systems sind nur möglich, wenn wir die Dynamik des Systems kennen. Dieses Wissen beruht in der Regel auf der Kenntnis der Bewegungsgleichungen, die die zeitliche Entwicklung des Systems beschreiben. Wir kennen die Bewegungsgleichungen für einfache physikalische Systeme, wie das Sonnensystem, aber auch für weit komplexere Systeme wie Atmosphäre und Hydrosphäre. Für andere Systeme, z.B. für biologische Prozesse, sind uns die Bewegungsgleichungen unbekannt. Wie auch immer die Bewegungsgleichungen biologischer Systeme beschaffen sind, sie haben eine bemerkenswerte Besonderheit. Sie verändern sich im Laufe der Zeit, da die Systeme „lernfähig“ sind. Für reale biologische Systeme, von denen wir vermuten, dass sie sich chaotisch verhalten, befindet sich unser gegenwärtiges Wissen mehr auf dem Niveau philosophischer Überlegungen als auf dem einer quantitativen Naturwissenschaft.

Unser Einwirken auf das Klimasystem der Erde hat ein Ausmaß angenommen, welches bereits eine Störung des Gleichgewichts im System bewirkt hat. Die Menschheit führt gegenwärtig ein Experiment großen Maßstabs durch, wie es nie zuvor möglich gewesen wäre. Es steht zu befürchten, dass die anthropogenen Einflüsse die Antriebsfaktoren des Klimasystems bereits so stark verändert haben, dass ein unumkehrbarer Prozess eingeleitet worden ist. Sein Ausgang ist nicht vorhersagbar.

Alle bisherigen Klimamodelle prognostizieren eine allmähliche, kontinuierlich fortschreitende Erwärmung der Atmosphäre. Diese Vorhersagen beruhen auf starken Vereinfachungen, die dem nichtlinearen Charakter der Bewe-

gungsgleichungen des komplexen Klimasystems nur ungenügend Rechnung tragen. Der Klimaverlauf der zurückliegenden 150 000 Jahre ist durch das aperiodische Auftreten gewaltiger Klimasprünge charakterisiert, wie sie für komplexe chaotische Systeme die Regel und nicht die Ausnahme darstellen.

Die Frage, die viele Menschen zum Beginn des 21. Jahrhunderts bewegt, ist die nach ihrer Zukunft und nach der ihrer Kinder. Aus unterschiedlichen, teils objektiven, teils subjektiven Gründen hat das Vertrauen der Öffentlichkeit in die Prognosen der Wissenschaftler abgenommen. Insbesondere in den letzten Jahren hat die zunehmende Erkenntnis der Komplexität des Klimasystems, in das unsere Existenz untrennbar eingebettet ist, unter den Wissenschaftlern die Einsicht wachsen lassen, dass auch das Klimasystem eine prinzipiell unvorhersagbare Entwicklung nimmt. Wir sind außerstande, das Eintreten des nächsten Klimasprungs zu prognostizieren. Wir wissen nicht, ob er in 10, 100 oder 1000 Jahren eintreten wird; aber dass er eintreten wird, erscheint sicher.

Die Wissenschaft komplexer Systeme vermag uns einige Antworten zu geben. Sie hängen vom Kenntnisstand der wirkenden Naturgesetze, von den geltenden Anfangsbedingungen und von der Komplexität des Systems ab. Die Antworten sind bisher zumeist unzureichend und vorläufig. Trotzdem oder gerade deswegen hat die Öffentlichkeit einen Anspruch auf Information. Das Risiko betrifft uns alle und nicht nur einen kleinen Kreis von Eingeweihten.

Wir sind eine Spezies unter vielen. Wir verfügen jedoch über eine Intelligenz, die uns die Auswirkungen unseres Handelns erkennen lässt. Das Ökosystem, zu dem wir gehören, ist ein komplexes Gebilde, widerstandsfähig und zerbrechlich zugleich. Unter Umständen reicht eine kaum wahrnehmbare Störung, um es zum Umschlagen zu bringen. Die katastrophalen Folgen betreffen auch unsere Art.

Wir tragen die Verantwortung, denn wir besitzen die Fähigkeit und das Wissen, durch einzuleitende Gegenmaßnahmen die drohende Katastrophe, wenn nicht aufzuhalten, so zumindest zu verzögern. Je schneller Rohstoffe zu Abfall werden, und je mehr Energie wir in Schadstoffe umsetzen, für umso erfolgreicher gilt das gesellschaftliche System. Solange jedoch Wachstum als Sinnbild des Fortschritts und Konsum als Inbegriff von Lebensqualität gilt, ist kein Wandel zu erwarten. Dabei ist jedem mit ein wenig mathematischem Verständnis begreiflich, dass in einem geschlossenen System, wie dem der Erde, ein unbegrenztes Wachstum mit einer annähernd konstanten Wachstumsrate unmöglich ist. Ein Fortschreiben dieser Entwicklung führt uns an eine Schwelle, an der auch das gegenwärtige sozialökonomische System kippen wird.

2. Das Klimasystem

Die Chaostheorie untersucht das Wesen des Zufalls, wie man ihn in bestimmten physikalischen, chemischen, biologischen, ökonomischen und sozialen Systemen findet. Sie betrachtet die Entwicklung komplexer Systeme, die mehr oder weniger gut durch Modelle beschreibbar sind. Charakteristisch für diese Systeme ist ihr einsinniger zeitlicher Verlauf. Am Beispiel eines vergleichsweise einfachen Systems, des Sonnensystems, zeigt sich das Auftreten sprunghafter Veränderungen, wenn man die Bahnrechnungen genügend lange auf einem Computer laufen lässt. Die Chaostheorie gestattet aber auch die Prüfung seit langem untersuchter Systeme in Natur und Gesellschaft, um zu ermitteln, ob in ihnen eine chaotische Komponente vorhanden ist.

Auch weit komplexere Systeme als das Sonnensystem, wie das Wetter und das Klima, zeigen in ihrem zeitlichen Verlauf ein chaotisches Verhalten. Das Studium dieser Systeme ergibt eine empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen. Um sie sichtbar werden zu lassen, muss man die ablaufenden Prozesse des beschreibenden Modells – bei variierenden Anfangsbedingungen –, genügend lange auf einem Computer laufen lassen.

Konvektion ist eine spezielle Art des Wärmetransports. Dabei wird Wärme durch die bewegten Flüssigkeits- oder Gasmassen selbst transportiert. Konvektionsströme sind auf der Erde allgegenwärtig. Im Erdmantel bewirken sie das Wandern der Kontinente. Die großen ozeanischen Strömungen erfolgen durch Konvektion, wie beispielsweise der Golfstrom und der Nordatlantikstrom. Die Bewegungen gewaltiger Luftmassen, die Winde, sind Konvektionsströme.

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 der gleichmäßig von unten erwärmten Schicht beobachtete er walzenförmige Konvektionszellen. In den folgenden Jahrzehnten wurde die Konvektion von Theoretikern und Experimentatoren studiert. Obwohl beachtliche Fortschritte im Verständnis des Phänomens erzielt wurden, erwies sich die Konvektion als 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 die 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. Ist die Temperaturdifferenz klein, 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. Die Wärmeleitung ist beendet, wenn beide Platten wieder die gleiche Temperatur haben.

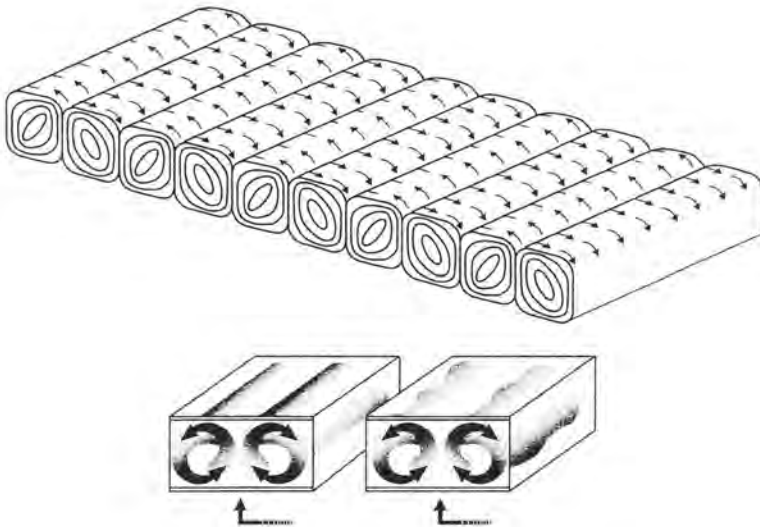


Abb. 2.1: Bei der Untersuchung des Wärmetransports in einer dünnen Flüssigkeitsschicht zwischen zwei Metallplatten beobachtet man einen strukturierten Bewegungsablauf. In der von unten gleichmäßig erwärmten Schicht bilden sich walzenförmige Konvektionszellen. In benachbarten Zellen zirkuliert die Flüssigkeit in entgegengesetzten Richtungen. Wird die Wärmezufuhr verstärkt, setzt längs der Rolle eine Oszillation ein.

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 Flüssigkeitsschicht 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 verändert sich die Dichte der Flüssigkeit und sie strömt wieder nach unten. In benachbarten Walzen zirkuliert die Flüssigkeit in entgegengesetzten Richtungen (siehe Abb. 2.1).

Ist die Temperaturdifferenz klein, ist auch die Abweichung vom stabilen Gleichgewichtszustand des Systems gering. Nach Beendigung der Wärmeleitung kehrt das System in den Zustand der minimalen Ordnung zurück. Erreicht die Temperaturdifferenz einen für die Versuchsanordnung charakteristischen Wert, so kann eine winzige Schwankung im Zustand des Systems den Wärmetransport ändern. Er kann von der Wärmeleitung in die Konvektion kippen – das System erreicht einen tipping point. Im Bereich der kritischen Temperaturdifferenz existiert kein stabiler Zustand. Die Physiker sprechen von einem indifferenten Gleichgewicht. Übersteigt die Temperaturdifferenz den kritischen Wert, wird der Auftrieb zur beherrschenden Kraft der Flüssigkeitsbewegung. Der Wärmetransport erfolgt durch Konvektion. 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.

Als Maß für die Abweichung vom Gleichgewicht, also vom Zustand der geringsten Ordnung, haben wir die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Platten gewählt. Beim Erreichen eines kritischen Wertes wird das System instabil. Durch Selbstorganisation entsteht spontan im komplexen System der Flüssigkeit eine hochorganisierte Struktur, die durch kooperative Bewegungen der Flüssigkeitsmoleküle erzeugt wird. Wesentlich für die Strukturbildung sind folgende zwei Bedingungen: Das System befindet sich in einem

Zustand fern vom stabilen Gleichgewicht, und ein äußerer Systemparameter, hier die Temperaturdifferenz, überschreitet einen kritischen Wert.

2.1 Der Lorenz-Attraktor

Naturprozesse, die weitab vom Gleichgewicht verlaufen, lassen sich mathematisch nicht durch lineare Gleichungen beschreiben. Um diese Prozesse 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. Lorenz untersuchte die atmosphärische Konvektion. Durch Sonneneinstrahlung werden die oberen Bodenschichtungen erwärmt und mit ihnen die anliegenden Luftschichten. Eine Aufwärtsbewegung der warmen und damit leichteren Luft und eine Abwärtsbewegung der dichteren kalten Luft stellen sich ein. In einer groben Näherung beschrieb Lorenz die zeitliche Entwicklung der konvektiven Luftzirkulation in drei Dimensionen. Er wählte ein System von drei Differentialgleichungen für drei Unbekannte (x,y,z) , das von drei Parametern (a,b,c) abhängt:

$$\frac{dx}{dt} = -ax + ay$$

$$\frac{dy}{dt} = bx - y - xz$$

$$\frac{dz}{dt} = -cz + xy$$

Die Nichtlinearität ist in den gemischten Gliedern, den Produkten aus zwei Variablen x y und x 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.

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.

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 Zeiten durch, so findet man ein irreguläres, chaotisches Verhalten des Systems.

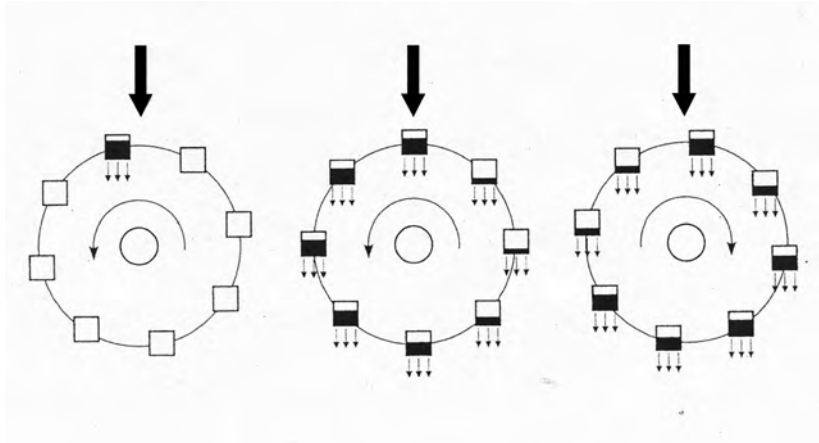


Abb. 2.2: Das Wasserrad als mechanisches Analogon der Lorenz-Gleichungen. Die Behälter längs des Umfangs des Rades haben an der Unterseite Löcher. Bei einem stetigen Wasserfluss dreht sich das Wasserrad gleichmäßig. Durch Erhöhen der Zuflussmenge wächst die Geschwindigkeit der Drehung. Wegen der erhöhten Drehgeschwindigkeit können sich die Behälter bei absteigender Bewegung nicht mehr merklich leeren. Die volleren Behälter können beim Aufstieg die Bewegung verlangsamen, sie zum Stillstand bringen und umkehren.

Das durch die drei Lorenz-Gleichungen beschriebene System entspricht einem mechanischen System: dem Wasserrad. Den Bewegungsablauf des Wasserrads kann man als eine mechanische Analogie zur Bewegung des Konvektionsstroms ansehen. Am Umfang eines Rades sind in gleichen Abständen Behälter befestigt. Jeder Behälter hat an der Unterseite Löcher, durch die das Wasser langsam auslaufen kann. Der Wasserzulauf ist außerhalb des Wasserrades regulierbar. Ist er gering, kann ein merklicher Teil des in den obersten Behälter fließenden Wassers wieder ausfließen. Das Rad bleibt in Ruhe, da das Gewicht des obersten Behälters nicht ausreicht, um die Reibung in den Lagern des Wasserrades zu überwinden. Erhöht man den Zufluss auf einen kritischen Wert, beginnt die Drehung (der kritische Wert der Zufluss-

menge entspricht der kritischen Temperaturdifferenz, bei deren Überschreiten die Konvektion einsetzt). Bei einem stetigen Zufluss wenig oberhalb des kritischen Wertes dreht sich das Wasserrad gleichförmig.

Erhöht man die Zuflussmenge, wächst zunächst die Geschwindigkeit des Wasserrades. Wegen der hohen Drehgeschwindigkeit des Rades können die Behälter sich bei absteigender Bewegung nur unmerklich leeren. Im Resultat können die noch stark gefüllten Behälter beim Aufstreben die Drehung verlangsamen, sie zum Stillstand bringen und umkehren. Bei Versuchen mit dem Wasserrad beobachtet man häufige Umkehrungen. Sie erfolgen unregelmäßig. Der Bewegungsablauf des Wasserrades erfolgt chaotisch. Das vergleichsweise einfache Modell des Wasserrades veranschaulicht die zentrale Aussage der Chaostheorie: Unsicherheit tritt nicht nur in sehr komplexen Systemen auf. Auch einfache Systeme erzeugen den Zufall aus sich selbst heraus, ohne einen äußeren Eingriff.

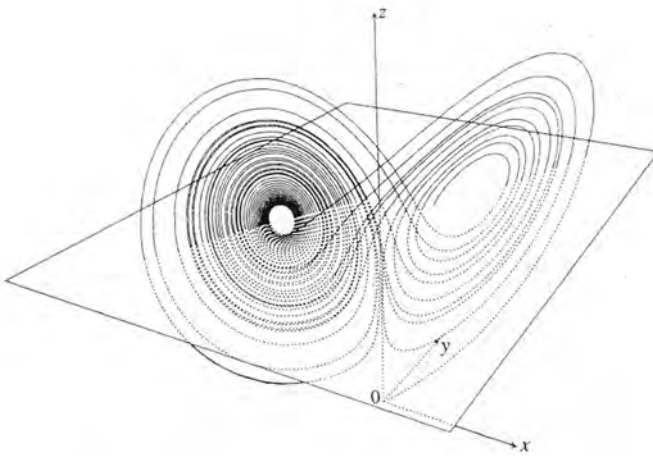


Abb. 2.3: Der Lorenz-Attraktor, der Prototyp eines seltsamen Attraktors. Für jede gewählte Ausgangsposition wiederholt das durch die drei Lorenz-Gleichungen beschriebene Zeitverhalten des Systems unendlich oft die kreisenden Bewegungen, einige Runden nach links, dann einige nach rechts. Vom gesamten Raum erkundet die Bewegung immer nur denselben Teil. (Quelle: D. Ruelle, Zufall und Chaos)

Das Resultat der Zeitreihe, die Lorenz bei der schrittweisen Näherung der drei Gleichungen erhielt, zeigt Abb. 2.3. Beginnend in der Nähe des Koordi-

naturursprungs beginnt der Punkt, der die zeitliche Veränderung der Konvektion beschreibt, entlang der gezeichneten Kurven zu wandern. Aus dem gewählten Anfangspunkt entwickelt sich eine Trajektorie, die in den zunächst leeren Raum ein zweifach gebogenes Objekt zeichnet, das in nichts an bekannte geometrische Figuren erinnert. Einmal schwingt die Trajektorie um den linken Bogen, dann wieder um den rechten. Dabei lässt sich nicht vorhersagen, in welchem Zeitpunkt die Bahn von der einen auf die andere Seite wechselt.

Eine geringfügige Änderung der Anfangsposition führt zu einem völlig verschiedenen zeitlichen Bahnverlauf. Da die Abweichungen sich exponentiell vergrößern, laufen die Trajektorien innerhalb von „Tagen“ auseinander. Lorenz zog aus diesem Resultat den Schluss, dass eine längerfristige Wettervorhersage unmöglich ist. In den Vorausberechnungen kann der kleinste Beobachtungsfehler, die geringfügigste Veränderung der Anfangsbedingungen zu einem völlig verschiedenen Wetterverlauf führen. Das ist es, was Lorenz als Schmetterlingseffekt bezeichnete. Das System ist chaotisch.

Wie man auch den Ausgangspunkt wählt, alle Bahnen steuern in den gleichen Raumbereich, den Attraktor. Er wird unter der Dynamik, die das betrachtete System beschreibt, nicht mehr verlassen. Wegen seines seltsamen Aussehens und weil er keine ganzzahlige Dimension besitzt, bezeichnet man den Lorenz-Attraktor als seltsam. Seltsame Attraktoren weisen eine fraktale Struktur auf.

Obwohl die beiden Lorenzschen Modelle, das mathematische und das mechanische, keine adäquate Beschreibung der Konvektion darstellen, erfassen sie doch das Wesentliche: das Verhalten beliebiger natürlicher Systeme fern vom Gleichgewichtszustand lässt sich nicht vorausberechnen. Es kann zum Chaos führen.

2.2 Der Klimawandel

Geowissenschaftler haben in den zurückliegenden Jahrzehnten detaillierte Erkenntnisse über den Klimawandel während der zurückliegenden 800 000 Jahre gewonnen. Die weltweit durchgeführten Analysen von Bohrkernen aus Ozeanen, vom Grund der Seen in verschiedenen Breiten und aus den Eisschilden Grönlands und der Antarktis zeigen wiederholte Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten. Gegenwärtig befinden wir uns im Holozän, der Neo-Warmzeit, die vor 11 700 Jahren begann. Die letzte davor liegende Warmzeit, die

Eem-Warmzeit, begann vor 128 000 Jahren und dauerte 13 000 Jahre. Die dazwischen liegende Kaltzeit zeigt eine Folge kalter und warmer Phasen, sogenannter Stadiale und Interstadiale

Ein detailliertes Bild vom Wechsel zwischen Stadialen und Interstadialen während der zurückliegenden Kaltzeit ergaben Bohrkerne aus Grönland. Abb. 2.4 zeigt den Wechsel zwischen warmen und kalten Phasen während der zurückliegenden 100 000 Jahre. Die sprunghaften Klimawechsel werden nach ihren Entdeckern als Dansgaard-Oeschger-Ereignisse bezeichnet. Die im Laufe der Jahre verbesserten Analyseverfahren erlauben, ähnlich wie an Baumringen, die jahreszeitlichen Wechsel der Temperaturen und der Niederschlagsmengen zu ermitteln. Messungen von Staub und Meersalz in den Schichten erlauben Rückschlüsse über Stärke und Richtung vorherrschender Winde. Eingeschlossene Luftbläschen geben Auskunft über die Zusammensetzung der Atmosphäre. Die übereinstimmenden Resultate der Analysen an drei Bohrkernen vom Hochplateau Grönlands zeigen eine Folge irregulärer Klimasprünge während der letzten Kaltzeit. Zwischen dem Ende der Eem-Warmzeit vor 115 000 Jahren und dem Beginn der Neo-Warmzeit vor 11 500 Jahren ereigneten sich 25 Wechsel zwischen relativ kalten (Stadialen) und relativ milden Phasen (Interstadialen).

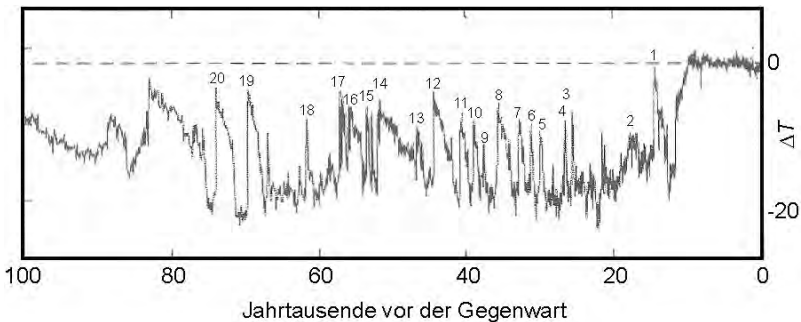


Abb. 2.4: Die Klimavariationen in Grönland während der zurückliegenden 100 000 Jahre. Die Dansgaard-Oeschger-Ereignisse sind nummeriert. (Quelle: Nature 409 (2001) S. 153)

Bei den Wechseln zwischen Stadialen und Interstadialen traten in Grönland Erwärmungen bis zu 16 Grad Celsius auf. Besonders bemerkenswert ist der steile Temperaturanstieg beim Übergang von einer kalten zu einer warmen Phase, der innerhalb von Jahren/Jahrzehnten erfolgte. Die Abkühlungsphase konnte bis zu 3000 Jahren dauern. Zunächst blieb die Temperatur bei einem leichten Abwärtstrend hoch, um dann relativ rasch abzufallen.

Die Übergänge zwischen Stadial und Interstadial und zur Neo-Warmzeit stellen keine regionalen Ereignisse dar. Sedimentbohrkerne aus dem Atlantik vor der spanischen Küste, die Schicht für Schicht mit gänzlich anderen Methoden analysiert wurden, dokumentieren die gleichen Klimawechsel wie die Bohrungen aus dem Grönlandeis.¹

Die Umstellung des Erdklimas begann vor mehr als 18 000 Jahren, als die Schmelze des antarktischen Eisschildes einsetzte. Im Bereich der Arktis begann die Erwärmung erst 3000 Jahre später. Bereits nach einigen hundert Jahren erhöhte sich die erdnahe Lufttemperatur um 5-7 Grad Celsius. Dieser Anstieg beschränkte sich nicht nur auf den Bereich des Nordatlantiks. Untersuchungen im tropischen Nordatlantik, auf Neuseeland und in Peru zeigen ähnliche Klimaänderungen.



Abb. 2.5: Der Übergang aus der letzten Kaltzeit in die Neo-Warmzeit, wie er im Eis Grönlands dokumentiert ist (NGRIP-Bohrung). (Quelle: *Spektrum der Wissenschaften* 3 (2005) S. 42)

Die erste Phase der Erwärmung wurde auf der Nordhalbkugel durch einen erneuten Temperatursturz vor 12 900 Jahren unterbrochen (siehe Abb. 2.5). Die als Jüngere Dryas bezeichnete Periode dauerte ca. 1300 Jahre und endete vor 11 700 Jahren mit dem Übergang in die präboreale Phase des Holozäns. Beide Temperaturänderungen, die Erwärmung vor 14 700 Jahren und die Abküh-

1 North Greenland Ice Core Project members. *Nature* 431 (2004), S. 147.

lung zur Jüngeren Dryaszeit, fanden sprunghaft – innerhalb von ein bis drei Jahren – statt.² Die neue Analyse des NGRIP- Bohrkerns deutet darauf hin, dass die sehr kurzen Temperatursprünge nicht durch eine Meereisschmelze ausgelöst worden sind, sondern durch eine Umstellung der atmosphärischen Zirkulation in der Nordhemisphäre.

Forschungen führten in den zurückliegenden Jahren zur Aufklärung des Mechanismus, durch den die häufigen Klimawechsel während einer Kaltzeit zustande kamen. Messdaten und Modellrechnungen ergaben, dass der charakteristische Verlauf der Dansgaard-Oeschger-Ereignisse mit sprunghaften Änderungen der Meeresströmung im Nordatlantik verbunden war.

Eine Tiefenzirkulation und eine Oberflächenströmung durchziehen wie ein gewaltiges Förderband die Ozeane. Dichte, kalte und salzhaltige Wassermassen sinken in hohen Breiten in die Tiefe, strömen nahe am Meeresboden südwärts, steigen auf und strömen als sich erwärmendes Oberflächenwasser über den Äquator nach Norden zurück. Wir danken dieser warmen Strömung, die als Golfstrom und danach als Nordatlantikstrom gegenwärtig bis in die Grönlandsee reicht, unser mildes Winterklima.

Die Klimawechsel wurden durch geringfügige Änderungen der Ausgangsbedingungen ausgelöst. Überstieg der Zufluss von Frischwasser einen kritischen Punkt, z.B. durch starkes Schmelzen des Grönlandeises, wurde das Absinken der Wassermassen in der Grönlandsee unterbrochen. Das warme Oberflächenwasser sank bereits südlich von Island ab. In Nordamerika und Nordeuropa konnten sich während der kalten Phasen erneut gewaltige Decken von Inland- und Gletschereis bilden.

Die Klimageschichte belegt vor allem die dramatische Wechselhaftigkeit des Klimas. Das Klimasystem ist ein sensibles System, das während der letzten Kaltzeit schon auf recht kleine Änderungen in der Energiebilanz empfindlich reagiert hat. Es ist zudem ein nichtlineares System, das in manchen Komponenten, wie der atmosphärischen und der ozeanischen Zirkulation, zu sprunghaften Änderungen neigt. Das Klima ist „kein träges Faultier, sondern gleicht eher einem wilden Biest“, wie es der bekannte amerikanische Klimatologe Wallace Broecker formulierte.

Seit Mitte des 18. Jahrhunderts erreichte unser Stoffwechsel mit der Natur eine neue Qualität. Ein zunächst allmählich einsetzender Prozess begann, der sich in den zurückliegenden Jahrzehnten beschleunigte. Wir sprechen heute vom anthropogenen Klimawandel.

2 Steffensen, J. P. et al. Science 321 (2008), S. 680.

Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen der zurückliegenden Jahrzehnte belegen zweifelsfrei:

- Das Erdklima hat sich gegenüber der vorindustriellen Zeit (vor 1860) global und regional verändert.

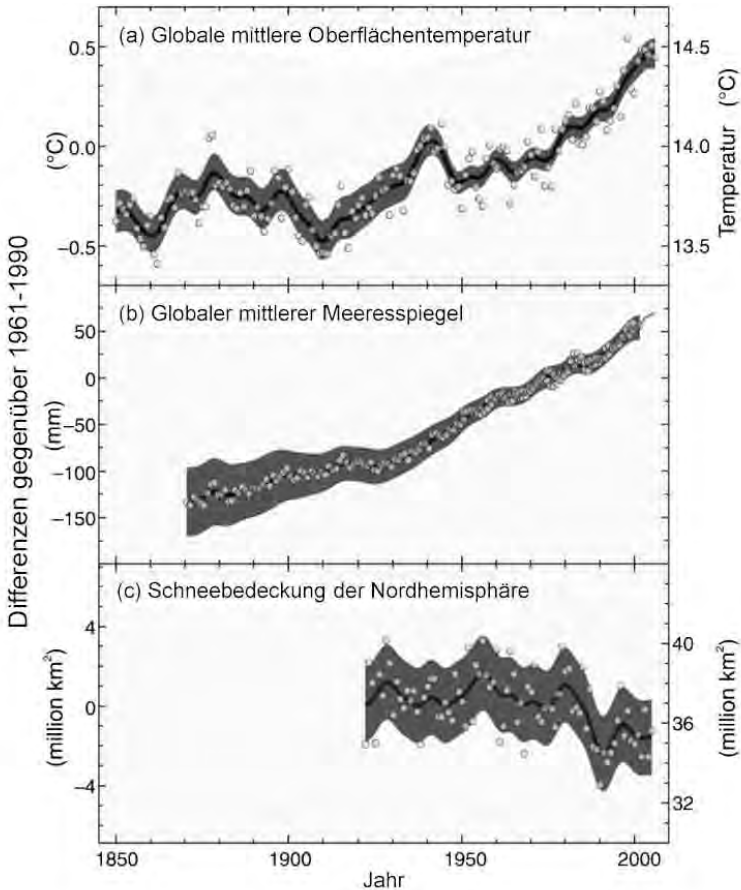


Abb. 2.6: Die Veränderung der mittleren globalen Temperatur in Erdbodennähe, des mittleren globalen Meeresspiegels und der Schneebedeckung auf der Nordhalbkugel (März, April) im Zeitraum von 1850 bis 2005. Alle Änderungen beziehen sich auf den Mittelwert der Jahre 1961-1990. Jahreswerte sind durch Kreise dargestellt. Die schwarzen Kurven repräsentieren die über ein Jahrzehnt geglätteten Werte, und die grau schattierten Flächen zeigen die Unsicherheit, mit denen die Daten behaftet sind. (Quelle: IPCC, Climate Change 2007 Synthesis Report)

Instrumentelle Temperaturmessungen nahe der Erdoberfläche begannen vor rund 150 Jahren. Ein Vergleich der weltweit gemessenen Werte zeigt, dass der globale Mittelwert der Temperatur heute deutlich höher liegt als in der vorindustriellen Zeit. Die Temperatur war in den zurückliegenden 50 Jahren sehr wahrscheinlich höher als je zuvor in den letzten 1300 Jahren.³

Im Laufe des 20. Jahrhunderts erfolgte die Erwärmung nicht kontinuierlich. Seit Mitte der siebziger Jahre beobachten die Forscher einen stärkeren Anstieg. Gemittelt über das 20. Jahrhundert betrug er 0,6 Grad Celsius. Der Anstieg wuchs in den zurückliegenden 30 Jahren auf 1,8 Grad pro Jahrhundert. Zwölf von dreizehn Jahren zwischen 1995 und 2007 waren die wärmsten Jahre seit 1850, dem Beginn der instrumentellen Messungen. Lag der globale Mittelwert zwischen 1961 und 1990 bei 14 Grad, überstieg er diesen in den Jahren 1998 und 2005 um mehr als 0,5 Grad. Während die globale mittlere Temperatur im 20. Jahrhundert um 0,6 Grad gegenüber der vorindustriellen Zeit angestiegen ist, wuchs sie in Europa um 0,95 Grad.

Aus der Analyse von Bohrkernen aus dem Antarktikeis wissen wir, dass Temperatur und CO₂-Konzentration im gleichen Rhythmus variieren. Warmzeiten gehen mit höheren Kohlendioxid-Konzentrationen einher, Kaltzeiten mit geringeren. Kohlendioxid besitzt eine Jahrzehnte währende Verweilzeit in der Atmosphäre. Diese ist daher weltweit gut mit CO₂ durchmischt.

Klimaänderungen treten auch nicht ohne Grund auf, und die Klimaforschung ist im vergangenen Jahrzehnt einem quantitativen Verständnis der Ursachen früherer Klimaänderungen sehr nahe gekommen. Viele der abgelaufenen Ereignisse konnten inzwischen auf spezifische Ursachen zurückgeführt und recht realistisch in den stets besser werdenden Simulationsmodellen dargestellt werden. Ein solches quantitatives Verständnis von Ursache und Wirkung ist die Voraussetzung dafür, die Eingriffe des Menschen in das Klimasystem richtig einschätzen zu können und deren Folgen zu berechnen. Die Klimageschichte bestätigt dabei nachdrücklich die wichtige Rolle des CO₂ als Treibhausgas.

Wie alle bisherigen Untersuchungen zweifelsfrei belegen, ist der Einfluss der Kohlendioxid-Emission aus der Verbrennung fossiler Energieträger zur Energieerzeugung dominierend für den Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration.⁴ Bis zu Beginn der Industriellen Revolution lag sie bei 280 ppm.⁵

3 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. www.ipcc.ch.

Wesentliche Ergebnisse der Arbeit von vielen hundert Experten aus aller Welt fanden ihren Niederschlag in den bisher veröffentlichten vier Wissensstandsberichten des IPCC aus den Jahren 1990, 1995, 2001 und 2007.⁶

Zusammenfassend kamen die Experten in ihrem neuesten Bericht zu folgendem Resultat:

- „Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Erwärmung der letzten 50 Jahre wesentlich durch anthropogene Treibhausgase (hauptsächlich Kohlendioxid) verursacht worden ist“.⁷

In den zurückliegenden 800 000 Jahren fanden mehrere zyklische Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten statt. Dabei variierte die CO₂-Konzentration während Kalt- und Warmzeiten zwischen 180 und 300 ppm. Gegenwärtig beträgt sie 385 ppm. Die letzte vergleichbare globale Erwärmung, mit der vor rund 15 000 Jahren die Kaltzeit endete und das Holozän begann, dauerte einige tausend Jahre. Nur lokal, z.B. in Grönland erfolgte sie rascher. Die globale Erwärmung betrug 4-6 Grad. Wir sind auf dem besten Weg, einen ähnlichen Temperaturanstieg innerhalb eines Jahrhunderts herbeizuführen – fünfzig mal schneller. Offenbar bewegen wir uns auf einen neuen Systemzustand der Erde zu mit deutlich höherer Konzentration der Treibhausgase und damit einer höheren globalen mittleren Temperatur als in den zurückliegenden Warmzeiten.

Nachdem ein Klimawandel durch die Menschheit in Gang gesetzt wurde, stellt sich folgende Frage: Welche Auswirkungen hat ein weiterer Anstieg der klimarelevanten Treibhausgase? Zur Beantwortung dieser Frage werden in der Klimaforschung Modellrechnungen durchgeführt.

Wichtigstes Ziel der weltweit durchgeführten Modellrechnungen ist es, den bisherigen Klimaverlauf zu reproduzieren, Vorhersagen über den weiteren Verlauf zu machen und den Einfluss anthropogener Strahlungsantriebe abzuschätzen. Wegen der Komplexität des Klimasystems mit seinen durch Kreisläufe gekoppelten Komponenten sind selbst die umfangreichsten gegenwärtig zur Simulation der Klimaentwicklung genutzten Modelle nur begrenzt aussagefähig. Sie lassen bei anhaltendem Zuwachs von Treibhausgasen und

4 Ursache des Anstiegs der Konzentration ist zur Hälfte die Nutzung fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas). Knapp 20 Prozent der Konzentrationserhöhung stammen aus der Chemieproduktion, weitere 20 Prozent aus der Abholzung der Wälder und ca. 15 Prozent aus der intensiv betriebenen Landwirtschaft.

5 Der Gehalt von Spurengasen in der Atmosphäre wird in parts per million angegeben: 1 ppm = 0,0001 % Volumenanteil (1 ppm = 1000 ppb).

6 ebenda.

7 ebenda.

Aerosolen einen Trend der Klimaänderung erkennen. Wie lange er anhält, lässt sich nicht vorhersagen.

Die umfassendsten derzeit verwendeten Klimamodelle bilden die globalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle. Sie sind Grundlage der Projektionen des IPCC für das 21. Jahrhundert. In den Berichten des IPCC wird zwischen einer Vorhersage (prediction) und einem Entwurf (projection) unterschieden. Den Entwurf kann man als eine bedingte Vorhersage betrachten. Diese sollte sich erfüllen, falls die zugrunde liegenden Annahmen eintreffen.

Den Vorhersagen liegen unterschiedliche Szenarien über mögliche Wege der Menschheitsentwicklung zugrunde. Darin werden in der Regel folgende Komplexe berücksichtigt:

- Bevölkerungswachstum
- Ökonomische Entwicklung
- Energieerzeugung und -verbrauch
- Landwirtschaft
- Umgang mit tropischen Regenwäldern.

Die zahlreichen Emissionsszenarien reichen von Szenarien einer sich näher kommenden Welt mit zielgerichtetem Umweltschutz, sozialer Gerechtigkeit und dominierender Nutzung nichtfossiler Energiequellen bis zu Szenarien einer heterogenen Welt, wie sie unsere Gegenwart prägen, in der die Nutzung fossiler Energieträger nach wie vor dominiert.

Das Klimasystem der Erde mit seinen Komponenten Atmosphäre, Hydrosphäre, Geosphäre, Kryosphäre und Biosphäre ist ein hochkomplexes nicht-lineares System, das sich gegenwärtig zunehmend aus einem Jahrtausende währenden Gleichgewichtszustand entfernt. Damit wächst die Wahrscheinlichkeit, dass einzelne Komponenten und mit ihnen das Gesamtsystem sich einem Kippunkt nähern, an dem eine Rückkehr in den vorhergehenden Zustand nicht mehr möglich sein wird. Durch Selbstorganisation werden sich neue nichtvorhersagbare Systemzustände ausbilden.

Keine der Projektionen berücksichtigt, dass eine mehr oder weniger stetige Erwärmung zu einer kritischen Schwelle, einem tipping point, führen kann, an der eine abrupte Veränderung eintritt. Die Physiker kennen im Wesentlichen sowohl die wirkenden Naturgesetze als auch die Anfangsbedingungen des Systems. Wie wir sahen, sind für das Verhalten solcher komplexen nicht-linearen Systeme wie Klima und Wetter über eine gewisse charakteristische Zeit hinaus keine Vorhersagen möglich. Erinnerung sei an die 25 irregulären Klimasprünge während der letzten Kaltzeit zwischen dem Ende der Eem-Warm-

zeit vor 115 000 Jahren und dem Beginn der Neo-Warmzeit vor 11 500 Jahren. Bei jedem Wechsel änderte sich die Temperatur um 5-7 Grad Celsius. Beim letzten Wechsel, dem Übergang in die präboreale Phase, stieg die mittlere Temperatur im nordatlantischen Bereich um sieben Grad.

In den beiden nachstehenden Abschnitten werden zwei Folgen des anhaltenden Klimawandels betrachtet, die uns sehr wahrscheinlich an einen Kippunkt führen werden: die Schmelze des Meereises in der Arktis im Sommer und das Schwinden des grönländischen Eisschildes. Die größten Gefahren für eine Beschleunigung des Klimawandels gehen, nach bisherigem Erkenntnisstand, vom Überschreiten der Kippunkte bei der Meereisschmelze und beim Schwinden der Eisschilde aus.

2.3 Das Schmelzen des Meereises

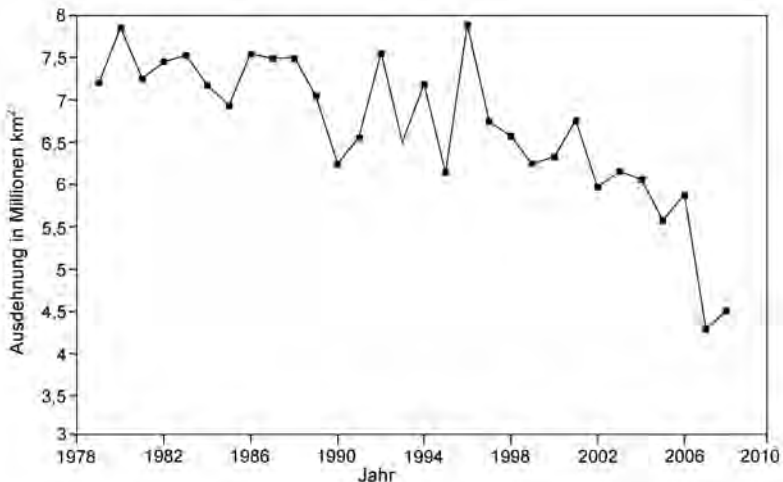


Abb. 2.7: Der Rückgang des arktischen Meereises in den letzten zwei Jahrzehnten. (Quelle: National Snow and Ice Data Center)

Gegenwärtig erleben wir einen verstärkten Rückgang des arktischen Meereises in den Sommermonaten. Abb. 2.7 zeigt den Rückgang der vom Meereis bedeckten Flächen. Mit 4,28 Millionen Quadratkilometern war 2007 die sommerliche Ausdehnung der eisbedeckten Fläche des arktischen Ozeans die niedrigste der letzten Jahrzehnte. Zum ersten Mal in der Menschheitsgeschichte öffnete sich die kanadische Nord-West-Passage zwischen Atlantik

und Pazifik für mehrere Wochen. Auch 2008 lag die vom Meereis bedeckte Fläche mit 4,5 Millionen Quadratkilometern nur wenig über der Meereisfläche des Vorjahres. Neben der Nord-West-Passage war gleichzeitig die Nord-Ost-Passage für einige Wochen eisfrei. Der gegenwärtige Verlust an Meereis beträgt annähernd 10 Prozent pro Dekade. Hält dieser Trend an, wird der arktische Ozean in einigen Jahrzehnten im Sommer eisfrei sein, weit schneller als vom IPCC prognostiziert.

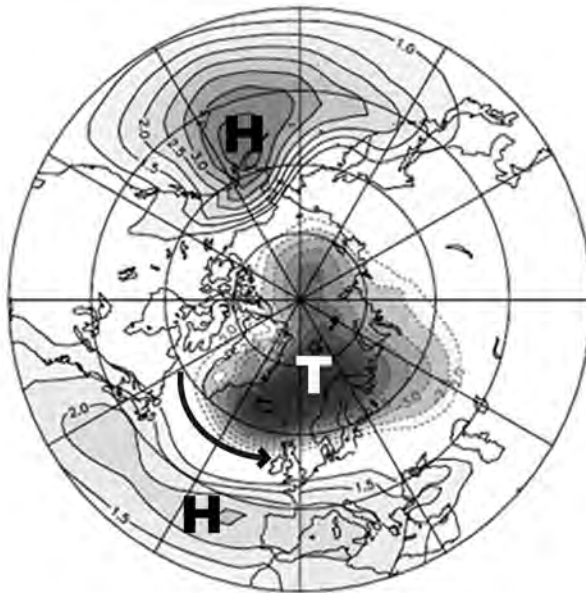


Abb. 2.8a: Die arktische Luftdruckverteilung im Herbst und Winter in den Jahren 1986/87 bis 1990/91. (Quelle: Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven)

Auch in Zukunft wird sich im arktischen Winter Meereis bilden. Im Sommer wird es jedoch schnell tauen. Was wir derzeit beobachten, ist eine deutliche Abnahme der Eisdicke durch das Tauen des mehrjährigen Eises. So ergaben Satellitenmessungen eine Abnahme der Dicke des Meereises im Winter 2007/2008 um 26 Zentimeter in großen Teilen der Arktis, verglichen mit der Dicke der vorangegangenen fünf Jahre. Die stärkste Reduktion war in der Westarktis (49 Zentimeter).⁸ Die arktische Erwärmung der kommenden Jahre wird die Bildung einer mehrjährigen Eisedecke verhindern. Wir nähern uns einem

Kipppunkt, an dem das Schwinden des arktischen Meereises unumkehrbar wird, – möglicherweise haben wir ihn bereits überschritten.

Die naheliegende Frage ist die nach der Ursache der raschen arktischen Erwärmung. Als treibende Kraft erweist sich eine drastische Umstellung der atmosphärischen Zirkulation im hohen Norden.⁹ Die Luftdruckverteilung in der Arktis war im Herbst und Winter durch ein dreipoliges Muster geprägt: das Island-Tief, das Azoren-Hoch und ein Subtropen-Hoch. Als Folge traten vorwiegend zonale Winde auf, also entlang der Breitenkreise. Unter diesen Bedingungen war die Arktis gegen das Eindringen südlicher Winde annähernd abgeschirmt (siehe Abb. 2.8a).

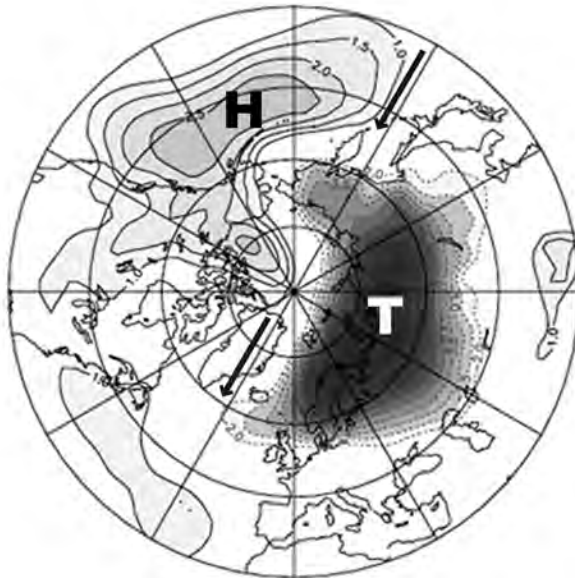


Abb. 2.8b: Die arktische Luftdruckverteilung im Herbst und Winter in den Jahren 2001/2 bis 2005/6. (Quelle: Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven)

Seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts hat sich das arktische Zirkulationsmuster im Winterhalbjahr verändert. Ein Dipol hat sich gebildet. Über Sibirien herrscht ein langgezogenes Tief und über Kanada ein Hoch. Als Folge wehen

8 Giles, K. A.; Laxon, S. W.; Ridout, A. L. *Geophys. Res. Lett.* 35, L22502, doi: 10.1029/2008/GL035710, 2008.

9 Zhang, X. et al. *Geophys. Res. Lett.* 35, L22701, doi: 10.1029/2008/GL035670, 2008.

die Winde vorwiegend meridional also entlang der Längengrade und transportieren Wärme aus dem Nordpazifik in die Arktis (siehe Abb. 2.8b). Die Autoren der Untersuchung halten es für möglich, dass der Kipppunkt für das Schwinden des arktischen Meereises bereits überschritten worden ist.

Die Auswirkungen des Schwindens des arktischen Meereises sind komplex. Es sind mehrere Mechanismen – Rückkopplungen –, durch welche die Vorgänge in der Arktis weltweit wirksam werden: Da die weltweite atmosphärische Zirkulation durch die Strahlungsbilanz zwischen äquatorialen und polaren Breiten bewirkt wird, kann eine deutliche Änderung im polaren Bereich die globale Energiebilanz merklich verändern. Solange große Meereisflächen das einfallende Sonnenlicht in den Weltraum reflektieren, bleibt die Polarregion eine starke Senke für die aus niederen Breiten strömenden Luftmassen. Eis und Ozeane reflektieren Sonnenlicht unterschiedlich. Den Prozentsatz des reflektierten Lichts bezeichnet man als Albedo. Für Meereis liegt er bei 85 Prozent, d.h. fast das gesamte Sonnenlicht wird reflektiert. Für eisfreie Meeresflächen liegt er bei 10 Prozent, nahezu die gesamte einfallende Energie wird absorbiert. Die Temperatur des Meerwassers steigt, und der Schmelzprozess beschleunigt sich. Die Wissenschaftler sprechen von einer positiven Rückkopplung. Die arktische Erwärmung bewirkt eine verminderte Kaltluftbildung. Das führt zu einer Verschiebung der Kaltluftströmung nach Norden und damit zu einer – möglicherweise drastischen – Veränderung des Wetters in mittleren Breiten.

2.4 Das Schmelzen des Grönländischen Eisschildes

Der Grönländische Eisschild ist einer der letzten Relikte der Inlandvereisung der vergangenen Kaltzeit auf der Nordhalbkugel. Während die Eisbohrkerne aus dem antarktischen Eis den Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten über 800 000 Jahre dokumentieren, reichen die Bohrkernanalysen des Grönlandeeises nur bis in das Ende der Eem-Warmzeit. Daraus folgt, dass vor 129 000 Jahren auch Grönland weitgehend eisfrei war. Während dieser Warmzeit lag die globale mittlere Temperatur um ca. zwei Grad höher als vor Beginn der Industriellen Revolution und der Meeresspiegel war 4-6 Meter höher.

Der Eisschild bedeckt rund 80 Prozent der Fläche Grönlands. Die Dicke der Eismassen beträgt im Mittel mehr als zwei Kilometer. Ein Anwachsen oder Schrumpfen der Eismassen ergibt sich aus einer Störung des Gleichgewichts zwischen sommerlicher Schmelze und winterlichem Wachstum durch Neuschnee. Wir erleben gegenwärtig ein zunehmendes Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes. So wuchs zwischen 1992 und 2004 die Schmelz-

fläche um mehr als das zweieinhalbfache, auf eine Fläche von der doppelten Größe Deutschlands. Die Ausdehnung des Schmelzbereichs zeigt Abb. 2.9.

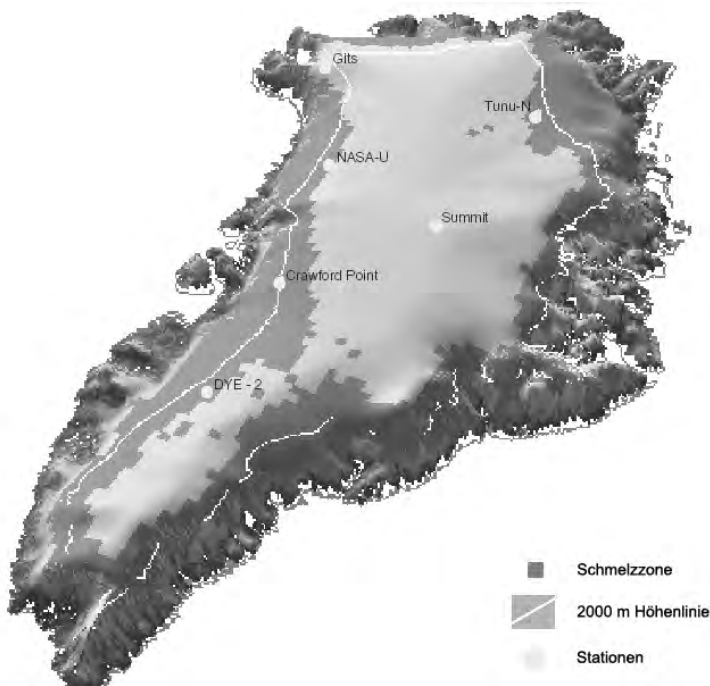


Abb. 2.9: In dunkelgrau ist der Schmelzbereich des grönländischen Eisschildes dargestellt. Die Daten wurden über satellitengestützte Mikrowellenmessungen ermittelt. (Quelle: Arbeitsgruppe Konrad Steffen, University of Colorado, Boulder)

In den Sommern der letzten Jahre erfolgte der größte Massenverlust längs der Südost- und Nordwestküsten Grönlands. In den meisten Gebieten erreicht der Eisschild nicht das Meer. Der Abfluss erfolgt über gewaltige Gletscherzungen. Einer der weltweit größten Gletscher ist der Jakobshavn an der Westküste der Insel. Seine Gletscherzunge fließt gegenwärtig mit einer Geschwindigkeit von 20-22 Metern pro Tag ins Meer. Er erzeugt rund zehn Prozent aller Eisberge im Nordatlantik.

Satellitenmessungen der Schwereanomalie über Grönland zwischen Februar 2003 und Januar 2008 ergaben einen Massenverlust des Gönlandeises von rund 179 Gigatonnen pro Jahr. Daraus ergibt sich ein globaler Beitrag

zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels von 0,5 Millimeter jährlich, ein schnellerer Anstieg, als in den Klimamodellen berechnet. Erstmals seit dem Beginn der Messungen wurde ein starker Massenverlust in den Sommermonaten oberhalb einer Höhe von 2000 Metern gemessen, der durch Schnee und Eis im Winter nicht kompensiert wurde.¹⁰ Dadurch wird eine positive Rückkopplung in Gang gesetzt. Ein Absinken der Höhe des Schildes führt zu einer Erhöhung der Temperatur an der Oberfläche, das Schmelzen beschleunigt sich. Eine weitere positive Rückkopplung wird durch das Schwinden des Meereises bewirkt und die damit ausgelöste Erwärmung des arktischen Ozeans.

Wird eine lokale Erwärmung von ca. drei Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Wert überschritten, erfolgt ein nicht mehr aufzuhaltendes Abschmelzen des Eisschildes in den kommenden Jahrhunderten. Diese lokale Temperaturerhöhung entspricht einem Anstieg der globalen mittleren Temperatur um 1-2 Grad gegenüber dem Zeitraum 1980-1999.¹¹ Selbst wenn sich das Klima stabilisieren würde, letztlich wird das Eis verschwinden. Die Folge wäre ein Anstieg des Meeresspiegels um rund sieben Meter. Zu Recht bezeichnet der Klimatologe James Hanson, Direktor des Goddard Institute for Space Studies der NASA, die Eisschilde als tickende „Zeitbombe“¹²

3. Wie stabil ist die kapitalistische Gesellschaftsordnung?

2008 erlebten wir die tiefste Finanzkrise in der Geschichte des Kapitalismus, die eine Weltwirtschaftskrise auslöste. Sie zeigt existenzbedrohende Destruktionstendenzen des globalisierten Kapitalismus. Ihre Gewalt ruht in der nahezu weltweiten Durchsetzung des neoliberalen Akkumulationsmodells, das sich nach der Weltwirtschaftskrise der 1970er Jahre herausgebildet hat. Hinzu kommt ihre Verflechtung mit der Energie- und Rohstoffkrise, dem Klimawandel, einer Gefährdung der Nahrungsgrundlagen für eine stark gewachsene Weltbevölkerung und dem Überschreiten der ökologischen Grenzen.

Überschüssige Profite, die nicht mehr in der Produktion angelegt werden konnten, fanden neue hochrentable Anlagemöglichkeiten auf den Finanzmärkten. Durch immer gewagtere Finanzinnovationen, in denen hochriskante Kredite in scheinbar sichere Anlageformen transformiert wurden, explodierten die Finanzmärkte. In Folge vergrößerten sie sich gegenüber der Produkti-

10 Wouters, B.; Chambers, D.; Schrama, E. J. O. *Geophys. Res. Lett.* 35, L20501, doi: 10.1029/2008/GL034816, 2008.

11 Lenton, T. M.; et. al. *PNAS* 105 (2008), S. 1787.

12 Hanson, J. *Climate Change* 68 (2005), S. 269.

onssphäre in vorher nie erreichtem Ausmaß. 2007 standen einem Weltsozialprodukt von ca. 50 Billionen US-Dollar Finanzaktiva von ca. 500 Billionen gegenüber.

Seit dem Übergang vom Handelskapitalismus zum Industriekapitalismus um 1800 prägen zyklische Finanzkrisen die Entwicklung des Kapitalismus. Aus dem Manchester-Kapitalismus der freien Konkurrenz wurde der moderne Kapitalismus. Der erste Weltkrieg endete in einer schweren Legitimationskrise der kapitalistischen Gesellschaftsordnung, von der das Zentrum der kapitalistischen Welt, die USA, verschont blieb. Die Vereinigten Staaten wurden zum Ausgangspunkt der Großen Depression, die mit dem Börsenkrach an der Wall Street 1929 begann und erst in den späten 1930er Jahren endete. Ein erster erfolgloser Versuch der Krisenbewältigung beruhte auf den bestehenden wirtschaftspolitischen Vorstellungen mit dem Ziel einer Rückkehr zum „laissez faire“. Mit der Wahl Franklin D. Roosevelts zum Präsidenten und dem Programm des New Deal war es möglich, die Folgen der Krise zu überwinden. Mit der Schaffung staatlicher Behörden führte er planwirtschaftliche Elemente in die kapitalistische Marktwirtschaft ein. Erst mit der forcierten Aufrüstung und dem Eintritt der Vereinigten Staaten in den Krieg (1941) verschwand auch die Arbeitslosigkeit. Im nationalsozialistischen Deutschland basierten die Maßnahmen zur Überwindung der Krise auf der Aufrüstung und damit der Vorbereitung des Zweiten Weltkriegs. Er endete mit dem Abwurf der ersten beiden Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki. 1945 verfügte allein die USA über dieses Massenvernichtungsmittel. Gegenwärtig befinden sich in den Arsenalen von 9 Staaten 27 000 Atomwaffen, von denen 2000 innerhalb von Minuten einsatzbereit sind. Sollte in Folge der anhaltenden Krise erneut ein Weltbrand ausbrechen, besteht die reale Gefahr, dass er nicht mit einem atomaren Inferno endet, sondern beginnt. „Was einmal möglich war, bleibt ewig möglich“ (Adorno).

Die Gefahren, die vom Klimawandel ausgehen, sind denen der Kernwaffen annähernd gleichwertig. Sie wirken nicht so dramatisch und unmittelbar, aber innerhalb von drei bis vier Jahrzehnten können sie zu irreduziblen Schäden in der Biosphäre führen und letztlich auch das Überleben unserer Art gefährden. Sir Martin Rees, der Präsident der Royal Society, fasste die Probleme in die Worte: „Nuclear weapons still pose the most catastrophic and immediate threat to humanity, but climate change and emerging technologies in the life sciences also have the potential to end civilization as we know it.“¹³

13 zitiert in the Bulletin of the Atomic Scientists, „Doomsday Clock“, 17. Januar 2007.

Für die vorstehend betrachteten natürlichen Systeme wie Wetter und Klima kennen wir die Grundgleichungen ihrer zeitlichen Entwicklung. Sie lassen sich mittels leistungsfähiger Computer integrieren. Daher besteht die Möglichkeit, quantitative Aussagen über ihr zeitliches Verhalten zu machen, die sich als stark eingeschränkt erweisen. Bei Betrachtung der Konvektion sahen wir, wie sich bei allmählichem Aufheizen in einem ersten sprunghaften Übergang eine konvektive Bewegung im System bildete. Bei weiterer Erhöhung der Temperaturdifferenz treten periodische Oszillationen auf, die letztlich in Turbulenzen enden.

Als Parameter, der das zeitliche Verhalten der betrachteten Systeme kontrolliert, wurde die Temperatur gewählt. Bei Erreichen eines kritischen Schwellenwertes erfolgte ein Kippen – das System geht in einen qualitativ neuen Zustand über. Die Kippunkte der diskutierten Teilsysteme, des arktischen Meereises und des Eisschildes Grönlands, sind durch menschliche Aktivitäten beeinflussbar. Durch unser Handeln können wir das Erreichen einer kritischen Schwelle verzögern oder sogar verhindern. Wahrscheinlich ist der kritische Schwellenwert beim arktischen Meereis bereits überschritten. Beim grönländischen Eisschild ist er noch nicht erreicht.

Für Systeme wie die Ökonomie sind uns entsprechende Entwicklungsgleichungen unbekannt. Die Auswirkungen von Chaos auf das sozialökonomische System des Kapitalismus bleiben daher vorerst auf dem Niveau allgemeiner Überlegungen.

Wegen der existenzbedrohenden Folgen, die bei Überschreiten eines kritischen Schwellenwertes der Menschheit drohen, scheint mir eine nähere Betrachtung sinnvoll. Wie beim Klimasystem, spielen auch beim Gesellschaftssystem menschliche Aktivitäten eine entscheidende Rolle. Nach Marx liegt der Grund aller zyklischen Krisen letztlich in den sozialökonomischen Verhältnissen, die an einem Pol zu einer Akkumulation von Reichtum und am anderen Pol zur Massenarmut führen. Dabei ist zu bedenken, dass die anhaltende Krise das Potential besitzt, die Welt zu verändern.

Soziale Ungleichheit bezeichnet die ungleiche Verteilung materieller oder immaterieller Ressourcen in einer Gesellschaft. Als Maß zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Ungleichheit einer Gesellschaft wähle ich die Differenzierung zwischen Arm und Reich. Es sind verschiedene Verfahren in Gebrauch, um Einkommensunterschiede auszudrücken. Eine der gebräuchlichsten Methoden besteht darin, die betrachtete Bevölkerungsgruppe, Personen, Familien oder Haushalte¹⁴, nach der Höhe ihres Einkommens oder Vermögens in Quintil aufzuteilen.

Betrachten wir die Entwicklung im wichtigsten Industrieland der Erde. Nach dem Zweiten Weltkrieg verfügten die Vereinigten Staaten über fast zwei Drittel der weltweiten Industriekapazität. Nachdem sich die anderen Industriestaaten von den Zerstörungen des Krieges erholt hatten, sank der Anteil Amerikas am Bruttoinlandprodukt (BIP) der Welt von 50 Prozent im Jahre 1960 auf 25 Prozent Mitte der neunziger Jahre, wobei die Devisenkurse als Maßstab gewählt wurden.

In den Vereinigten Staaten stieg das BIP inflationsbereinigt von 1973 bis 1995 um 36 Prozent.¹⁵ Dieser Einkommensanstieg kam nicht allen Bürgern in gleichem Maße zugute. Der Stundenlohn von Arbeitern und Angestellten in nichtleitenden Positionen, d.h. für die überwiegende Zahl aller Erwerbstätigen, ging im gleichen Zeitraum um 14 Prozent zurück. Der gesamte Zuwachs kam den höheren Einkommensgruppen zugute. Allein die Spitzenverdiener – ein Prozent der Erwerbstätigen –, erhielten 64 Prozent des Einkommenszuwachses. Zum Ausgang des 20. Jahrhunderts waren die Real-löhne der Industriearbeiter wieder auf dem Niveau angelangt, wo sie sich Mitte des Jahrhunderts schon einmal befanden, obwohl sich das reale BIP pro Kopf während dieses Zeitabschnitts verdoppelt hat.

Jahre	unterste 20 %	zweite 20 %	dritte 20 %	vierte 20 %	fünfte 20 %	oberste 5 %
1971-1975	4,2	10,5	17,1	24,6	43,5	16,5
1976-1980	4,3	10,3	17,0	24,8	43,7	16,1
1981-1985	4,1	10,0	16,5	24,7	44,6	16,3
1986-1990	3,8	9,6	16,0	24,2	46,3	18,3
1991-1995	3,7	9,2	15,4	23,7	48,0	20,0
1996-2000	3,6	8,9	15,0	23,2	49,3	21,6
2001-2005	3,4	8,7	14,7	23,2	50,0	21,9

Tabelle 3.1: Prozentuale Anteile der Haushalte am jährlichen Einkommen in den USA.¹⁶

14 Haushalte schließen Singles und nichteheliche Lebensgemeinschaften ein.

15 Alle Zahlenangaben in diesem Abschnitt sind, soweit nicht anders vermerkt, den Veröffentlichungen des U.S. Bureau of the Census oder dem Buch "Die Zukunft des Kapitalismus" von L.C. Thurow, Düsseldorf 1997, entnommen.

16 U.S. Census Bureau, Historical Income Tables-Households, March 2002.

Tabelle 3.1 zeigt die Einkommensentwicklung in den Vereinigten Staaten zwischen 1970 und 2005. Sie enthält in jeder Zeile die prozentuale Aufteilung des Einkommens gemittelt über fünf Jahre auf fünf Einkommensgruppen, die jeweils 20 Prozent aller Haushalte umfassen, bzw. den Anteil am Einkommen, den fünf Prozent der Haushalte mit dem höchsten Einkommen auf sich vereinigt.

Nicht nur für die untersten 20 Prozent der Haushalte ging der Anteil am Gesamteinkommen stetig zurück, sondern auch für die folgenden 60 Prozent. Lediglich für die 20 Prozent der Haushalte mit dem höchsten Einkommen wuchs das Einkommen in den 35 Jahren zwischen 1971 und 2005. Am stärksten profitierten die fünf Prozent der Topverdiener. „1998 flossen mehr als drei Prozent des Gesamteinkommens den oberen 0,01 Prozent zu. Das bedeutet, dass bereits zum Ende des 20. Jahrhunderts die 13 000 reichsten Familien in Amerika über fast ebenso viel Geld verfügten wie die 20 Millionen ärmsten Haushalte“.¹⁷

Die Zahlen des U.S. Census Bureau und des Federal Reserve Board lassen deutlich erkennen, dass sich die sozialökonomischen Verhältnisse in den Vereinigten Staaten zu einer 20:80-Gesellschaft entwickeln. Der eigentliche Kern der amerikanischen Leistungsgesellschaft, die Mittelschicht zählt zu den Verlierern. Sie bildet die drei mittleren Einkommensgruppen.

Zu den fünf Prozent der Topverdiener zählen Manager, Ingenieure, Informatiker, PR-Spezialisten, Anwälte, Steuerberater und Finanzexperten. Sie formen eine Elite, ohne die das ökonomische System nicht funktionsfähig wäre. Sie bilden den Kern der ca. acht Millionen US-Bürger, die in „gated enclave communities“ leben, in festungsartig abgeschirmten und gesicherten Enklaven.¹⁸

Die Mittelschicht lebt seit mehr als hundert Jahren in der Vorstellung, dass die eigentliche Bedeutung des Lebens im Erwerb eines ständig steigenden Status, in Einkommenserhöhung und Autoritätszuwachs liegt.¹⁹ Wohneigentum und sozialer Aufstieg der Kinder wurden zu den Symbolen der Mittelschicht. Der explosive Erosionsprozess der Finanzkrise stellt diese Statussymbole in Frage.

Die Vergrößerung der Einkommensdisparität in den Vereinigten Staaten begann Ende der sechziger Jahre. Während der folgenden beiden Jahrzehnte

17 Krugmann, P. Die Zeit vom 7. 11. 2002.

18 Sylvers, M. Die USA-Anatomie einer Weltmacht. Köln 2002, S.90.

19 Bellah, R. N.; Madsen, R.; Sullivan, W. M.; Swidler, A.; Tipton, St. M. Gewohnheiten des Herzens. Köln 1987, S. 322.

wurde sie breiter und tiefer. Nach dem Zusammenbruch des Realsozialismus beschleunigte sich der Prozess. Er erfasste alle Berufsgruppen, qualifizierte Arbeitnehmer gleichermaßen wie gering qualifizierte. Mitte der neunziger Jahre müssen zwei Mitglieder eines Haushalts arbeiten, um den gleichen Reallohn zu erhalten, der 1970 von einem erwirtschaftet wurde. Untersucht man die Einkommensentwicklung für verschiedene Altersgruppen, zeigt sich trotz wachsenden Bildungsstandes eine Reduzierung bei den 25 bis 34jährigen um 25 Prozent. Die Anfangsgehälter waren gesunken, und die Aufstiegsmöglichkeiten hatten sich verschlechtert. Auch Männer mit einem College Abschluss in der potentiell verdienststärksten Altersgruppe, der 45 bis 54 jährigen, mussten zwischen 1973 und 1993 einen Einkommensverlust um ein Drittel hinnehmen.

Die Zahl unterhalb der Armutsschwelle lebender Menschen wuchs von 25,4 Millionen 1970 auf 36,4 Millionen 1995. Dieser Zahl entsprechen 13,8 Prozent der Gesamtbevölkerung. Besonders stark von Armut betroffen sind Kinder unter 18 Jahren. 1995 betrug ihr Anteil 20,8 Prozent. Im ethnischen Vergleich liegt der Anteil der Weißen bei 8,5 Prozent, der Schwarzen bei 29,3 Prozent und der Lateinamerikaner bei 30,3 Prozent. Unabhängig von ihrer ethnischen Zugehörigkeit lebten 27,8 Prozent der Menschen, die außerhalb der Vereinigten Staaten geboren wurden, unterhalb der Armutsgrenze.²⁰

Ähnlich den Einkünften aus Erwerbsarbeit entwickelten sich die Vermögensverhältnisse. Im Jahr 2007 verfügten 20 Prozent der Familien der Vereinigten Staaten über 86 Prozent des Geldvermögens, die Vermögen sind offensichtlich noch ungleicher verteilt als die Einkommen.²¹

Ein anderes gebräuchliches Maß einer Ungleichverteilung ist der Gini-Index. Ökonomen nutzen ihn, um Einkommens- oder Vermögensunterschiede in der Gesellschaft zu messen. Der Gini-Index misst die Differenz zwischen dem realen Einkommen einer Bevölkerungsgruppe und einer egalitären Gruppe. In ihr würde der Index 0,000 betragen. Je höher der Index, umso größer ist die Ungleichheit. In einer perfekt ungleichen Gesellschaft, in der eine Person, eine Familie oder ein Haushalt alles erhält, beträgt der Wert des Index 1,000.

Abb. 3.1 (s. S. 34) zeigt die die Entwicklung des Gini-Index für Familien und Haushalte der Vereinigten Staaten in den Jahren zwischen 1970 und 2006. Die Daten wurden vom US Bureau of the Census für die Bruttoeinkom-

20 Inflationbereinigt lag 1995 die am Einkommen gemessene Armutsschwelle in den USA für einen Drei-Personen-Haushalt bei 12 158 \$ pro Jahr.

21 Federal Reserve Board, Survey of Consumer Finances (SCF), 2007.

men ermittelt. Wie auch diese zeitliche Einkommensentwicklung zeigt, wird die Ungleichheit in den USA immer größer.

Betrachtet man die Vermögensverhältnisse in den USA, wird die Ungleichverteilung noch deutlicher sichtbar. Für die Haushalts-Nett vermögen²² erreichte der Gini-Index bereits 2001 mit 0,84, einen Wert der weit über dem Index für die Einkommen liegt.

Auch in Deutschland hat sich der Abstand zwischen Arm und Reich vergrößert. In den 10 Jahren zwischen 1997 und 2006 verringerte sich der monatliche Einkommensanteil der ärmsten 20 Prozent der Bevölkerung von 10,1 auf 9,3 Prozent. Gleichzeitig stieg das monatliche Gesamteinkommen im

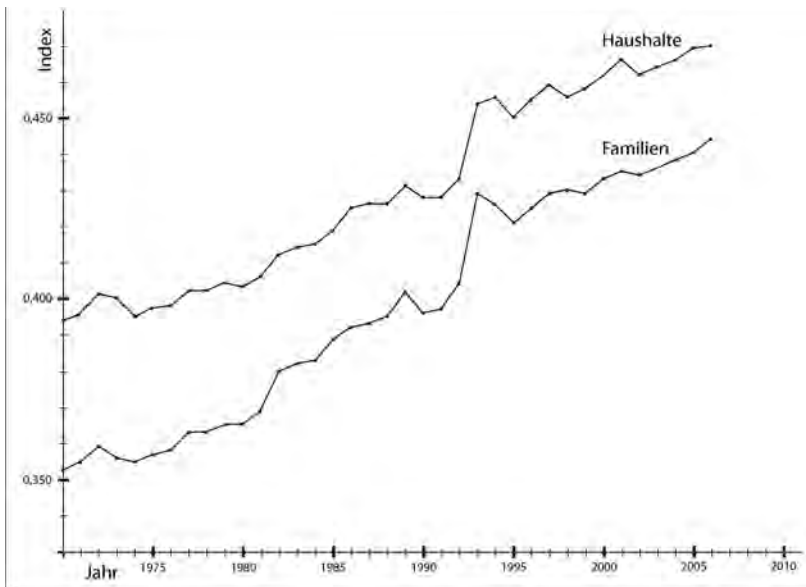


Abb. 3.1: Die jährliche Variation des Gini-Index für das Einkommen von Familien und Haushalten der Vereinigten Staaten zwischen 1970 und 2006. Der Index zeigt einen annähernd konstanten Anstieg in den vergangenen 35 Jahren, unabhängig von den zahlreichen zyklischen Krisen während dieser Zeit.

obersten Quintil von 34,4 auf 36,8 Prozent. Mit der zunehmenden Differenzierung zwischen Arm und Reich war eine Schrumpfung der Mittelschicht

22 Das Nett vermögen besteht aus dem Gesamtvermögen – Immobilien, Betriebe, Geld und wertvolle Sammlungen – abzüglich aller Verbindlichkeiten – Hypotheken und Konsumentenkredite.

verbunden.²³ Während das Durchschnittseinkommen der Deutschen allein zwischen 2002 und 2005 real um 4,8 Prozent zurückging, stieg es für die obersten 0,01 Prozent um 17 Prozent.²⁴

Nach einer Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) vom Januar 2009 ist das Vermögen noch weit ungleicher verteilt als das Einkommen.²⁵

Das Nettovermögen aller Erwachsenen betrug 6,6 Billionen € im Jahre 2007. Die prozentuale Aufteilung der individuellen Nettovermögen zeigt die nachstehende Tabelle 3.2:

Jahr	unterste 20 %	zweite 20 %	dritte 20 %	vierte 20 %	fünfte 20 %	oberste 10 %
2002	-1,2	0,4	4,1	18,8	77,8	57,9
2007	-1,6	0,4	4,0	16,1	80,1	61,1

Tab. 3.2: Individuelle Nettovermögen in Deutschland. Anteil am Gesamtvermögen in Prozent.

Die sehr ungleiche Verteilung zeigt sich auch in einem relativ hohen Gini-Index. Für 2002 lag er bei 0,777 und für 2007 stieg er auf 0,799. Damit ist er nicht mehr weit vom Maximalwert 1,000 entfernt.

Unverkennbar nähern wir uns in der sozialen Differenzierung in schnellen Schritten den Verhältnissen in den USA. In Deutschland existiert eine kleine Oberschicht (ca. 10%), eine kleiner werdende Mittelschicht (ca. 20%) und eine große Unterschicht (ca. 70%).

Soziale Ungleichheit kann in einer globalisierten Weltwirtschaft nicht mehr allein im nationalstaatlichen Rahmen betrachtet werden. Sie muss aus einer staatenübergreifenden Perspektive diskutiert werden.

- Heute lebt rund ein Sechstel der Weltbevölkerung in absoluter Armut, vor allem in Afrika und Südostasien,²⁶
- die reichsten zwei Prozent der Weltbevölkerung besitzen mehr als 51 Prozent des Weltvermögens,
- auf die ärmsten 50 Prozent der Weltbevölkerung entfallen weniger als ein

23 Datenreport 2008, Hrsg. Bundeszentrale für politische Bildung Bonn 2008.

24 Der dritte Armuts- und Reichtumsbericht der Bundesregierung, Bundesanzeiger, Juni 2008.

25 Frick, R.; Grabka, M. M. Wochenbericht des DIW Berlin Nr. 4/2009, S. 54.

26 Als absolut arm werden Menschen bezeichnet, die am Tag mit weniger als einem \$, gemessen in lokaler Kaufkraft, auskommen müssen.

Prozent,

- der Gini-Index der weltweiten Vermögensverteilung ist auf 0,850 gestiegen.

Neben der Vermögensverteilung zeigt die weltweite Einkommensverteilung folgendes Bild:

- 48,3 Prozent der Weltbevölkerung d.h. 3,14 Milliarden Menschen hatten nach Angaben der Weltbank im Jahre 2005 ein Einkommen von weniger als 2,5 US-\$ pro Tag.
- Der Anteil der Einkommensarmen betrug am Beginn des 21. Jahrhunderts 78 Prozent, der Anteil der Einkommensreichen 11 Prozent.²⁷

Beim Klimawandel wurde als Parameter die Temperatur zur Charakterisierung einer sprunghaften Veränderung des Systems gewählt. Sowohl beim Schmelzen des Meereises wie für ein unaufhaltsames Schmelzen des grönländischen Eisschildes bestand die Möglichkeit, ein Temperaturintervall anzugeben, bei dem ein Kipppunkt erreicht wird.

Als Parameter zur Beschreibung der wachsenden Spaltung des herrschenden Gesellschaftssystems wählte ich die Differenz zwischen Arm und Reich. Unübersehbar wird sie immer größer. Ich bin jedoch nicht in der Lage, ein Intervall z.B. beim Gini-Index anzugeben, bei dem der Kipppunkt erreicht wird. Es scheint wenig wahrscheinlich, dass der bisherige Umgang mit der weltweiten Krise – Krieg gegen den Terrorismus und unzureichende Entwicklungshilfe – ein weiteres Anwachsen der sozialen Gegensätze aufhalten wird. Wir leben am Abgrund einer Katastrophe, da wir die Bedürfnisse der von Menschen erzeugten Verhältnisse für wichtiger ansehen, als die Bedürfnisse der Menschen selbst.

Berufsökonomien und Regierungen gehen unbeirrt davon aus, dass sich die ökonomischen Verhältnisse im Gleichgewicht befinden. Gelegentliche krisenhafte Störungen lassen sich durch gezielte Maßnahmen wie Zinssenkungen, Finanzhilfen für Geldinstitute und Investitionen überwinden – das System kehrt ins Gleichgewicht zurück. Die Naturwissenschaften lehren uns, dass gewisse dynamische Entwicklungen nicht zum Gleichgewicht führen, sondern eine chaotische, unvorhersehbare zeitliche Entwicklung einschlagen können. Die hohe Komplexität des globalisierten Kapitalismus begünstigt den Weg ins Chaos.

27 Milanovic, B.; Yitzhaki, S. *Decomposing World Income Distribution: Does the World Have a Middle Class?*, *Review of Income and Wealth*, Blackwell Publishing, vol. 48(2) S. 155-178, Juni 2002.