# Raúl Rojas
# Chaos als neues naturwissenschafliches Paradigma

*»Sie (die höchste Intelligenz) würde die Bewegungen der größten Himmelskörper des Universums unter demgleichen Formeln begreifen wie die des leichtesten Atoms; nichts wäre ihr ungewiß, und Zukunft wie Gegenwart lägen ausgebreitet vor ihrem Blick«*

Pierre Simon de Laplace (1812)

## 1. Wandel des Weltbildes

Das Phänomen, das unter dem Namen Chaosforschung seit einigen Jahren zu unzähligen Veröffentlichungen in allen Sparten der Naturwissenschaften geführt hat, besitzt all jene Merkmale einer Umwälzung des wissenschaftlichen Erkennens, für die Thomas Kuhn (1973) die Bezeichnung *Paradigmenwechsel* geprägt hat. Klassischer, im Sinne von Kuhn, hätte diese Revolution kaum stattfinden können: einige Wissenschaftler, die sich mit Randproblemen ihres Faches beschäftigten, wiesen auf Anomalien im Standardgerüst des mechanistischen Weltbildes hin, die zum Umdenken und eine neue Auffassung der grundlegenden Natur dynamischer Prozesse führten. Die Pioniere wurden am Anfang, wie bei jeder Revolution, völlig verkannt (Gleick 1988). Edward Lorenz hat seine bahnbrechenden Studien über chaotische Dynamik und seltsame Attraktoren in wenig bekannten meteorologischen Zeitschriften drucken lassen. Mitchell Feigenbaum konnte seine Entdeckung der Universalität im Chaos erst Jahre später in einer Fachzeitschrift veröffentlichen. Benoit Mandelbrot schuf in den siebziger Jahren praktisch im Alleingang das Feld der fraktalen Geometrie. Aber nur wenige Jahre später waren der *Lorenzattraktor*, die *Feigenbaumkonstante* und die *Mandelbrotmenge* in aller Munde. Ein plötzlicher Gesinungswandel hatte die *scientific community* erfaßt und ein neues Paradigma war geboren (Crutchfield et al. 1989). So rasch war alles geschehen, daß in der enzyklopädischen Kompilation wissenschaftlicher Revolutionen, die der Harvard-Historiker Bernard Cohen für unser *age of revolutions* 1985 vorlegte, die neue Umwälzung noch keinen Platz fand.

Kurz und bündig: Die Untersuchung komplexer dynamischer Systemen hat gezeigt, daß die mechanistische Weltauffassung auch auf der *makroskopischen* Ebene nicht haltbar ist.

*Prokla. Zeitschrift für kritische Sozialwissenschaft, Heft 88, 22. Jg. 1992, Nr. 3, 374-387*

Das mechanistische Weltbild, für das Newton im 17. Jahrhundert eine monumentale theoretische Grundlage schuf, wurde schon zu Anfang dieses Jahrhunderts erschüttert. Untersuchungen von Physikern wie Planck, Heisenberg und Dirac, die das theoretische Gebäude der Quantenmechanik schufen, zeigten, daß sich die *mikroskopische* Welt nicht streng deterministisch verhält. Auf der Ebene von Elementarteilchen und Atomen sind nur statistische Aussagen möglich. Anders als in der klassischen Mechanik wird keine strenge Kausalität postuliert — es können keine deterministischen Aussagen getroffen werden. Jede Aussage ist mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit behaftet; ein Ereignis kann stattfinden oder nicht. Selbst Einstein, der wesentlich zur Theorie der Quanten beitrug, konnte sich nie mit der Idee einer undeterministischen Welt anfreuden: »Gott würfelt nicht« ging als Einsteinsches Diktum in die Wissenschaftsgeschichte ein. Daß aber Gott sehr wohl würfelt, wurde in den letzten sechzig Jahren immer wieder bestätigt. Jede Illusion, daß vielleicht für uns unbekannte, d. h. noch verborgene Variablen eine Stochastizität der mikroskopischen Welt nur scheinbar verursachen, wurde 1969 durch John Bell zunichte gemacht, als er bewies, daß solche verborgenen Variablen mit der Lokalität der Quantenmechanik unvereinbar sind (Rae 1986).
Auf der Quantenebene wurden die Wissenschaftler Anhänger des Indeterminismus. Auf der makroskopischen Ebene blieben sie jedoch Deterministen und dies umso mehr, als die auf dieser Ebene vorherrschende dynamische Theorie nicht mehr die von Newton, sondern die von Einstein war. Die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie lehren, daß dynamische Prozesse in einer Welt stattfinden, in der Raum und Zeit miteinander gekoppelt sind. Die Raum-Zeit besitzt eine geometrische Struktur, die sich aus der Verteilung der Massen im Universum ergibt. Bewegung, und zwar jegliche Bewegung, ist ein elegantes Gleiten der Körper in dieser geometrischen Struktur. Gravitation wird nicht mehr verstanden als eine »Anziehung« von Körpern über eine Distanz, wie bei Newton, sondern als ein lokales Phänomen, das sich auch lokal fortpflanzt. Die Sonne steht im Weltraum wie eine Kugel, die auf einer Gummifläche ruht und diese krümmt. Alle Objekte bewegen sich in dieser gekrümmten Raum-Zeit; daraus ergeben sich die komplexen Bahnen der Körper, die wir im Alltag wahrnehmen. Was kann aber deterministischer als die Geometrie sein? Die Einsteinsche Welt hat etwas platonisches. Sie ist mit perfekten Körpern gefüllt, die eine vollkommene Geometrie erzeugen. Die Parabeln, Hyperbeln und Ellipsen sind alle da, nur leider können wir sie nicht direkt sehen. Nicht umsonst wird Einstein als der letzte große klassische Physiker angesehen. Es ist kein Wunder, daß das wichtigste offene Problem in der Physik, ja das physikalische Problem schlechthin, die

Vereinigung der Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik ist. Sonderbar aber wahr: die zwei erfolgreichsten physikalischen Theorien dieses Jahrhunderts stehen sich noch unvereinbar gegenüber.
Die meisten Naturwissenschaftler sind aber auch deswegen Deterministen geblieben, weil sie Physik als eine abgestufte Theorie verstanden. Quantenmechanik kann die mikroskopischen Phänomene beschreiben, ist also in diesem Bereich gültig. Die klassische Mechanik kann makroskopische Bewegungen erklären, ist also auch gültig, solange die Geschwindigkeiten klein sind (sonst braucht man die Relativitätstheorie). Indeterminismus nach unten, Determinismus nach oben. Es war nicht klar, wie die Stochastizität der atomaren Dimensionen bis auf die sichtbare Welt durchdringen kann. Man nahm implizit an, daß dynamische Prozesse sich in der Weise verhalten, daß kleine Anfangsabweichungen mit der Zeit nur wenig wachsen oder aber geglättet werden. Wer wagte zu denken, daß schon ein Millimeter Unterschied in der Erdlaufbahn im Laufe von Jahrmillionen die Erde auf die entgegengesetzte Seite der Sonne bringen könnte? Es gab ein stillschweigendes Einverständnis, daß bei »normalen« und »typischen« Phänomenen zwei fast identische Anfangsbedingungen im Laufe der Zeit fast identisches Verhalten erzeugen sollten.
Die Untersuchungen von nichtlinearen Prozessen haben aber gezeigt, daß der Zufall alle Ebenen des physikalischen Geschehens tief durchdringt. Es gibt nicht eine stochastische mikroskopische und eine deterministische makroskopische Welt. Zufall und Notwendigkeit sind auf allen Ebenen eng verwoben. Lorenz (1963) z.B. zeigte, daß die hydrodynamischen Prozesse in der Atmosphäre so komplex sind, daß es kaum möglich ist, das Wetter mehr als sieben Tage im voraus zu berechnen. Obwohl die Prozesse gut bekannt sind und die notwendigen Gleichungen im Laufe von Jahren mehr und mehr verfeinert wurden, ruft ein winziger Unterschied in den Anfangsbedingungen große Wirkungen hervor. Unser Sonnensystem ist ein weiteres Beispiel eines chaotischen Ensembles (Murray 1991). Obwohl es als perfektes Uhrwerk erscheint, können die Bewegungen der Planeten langfristig stark variieren. Auch die Biologen haben entdeckt, daß Tierpopulationen großen Schwankungen unterworfen sind, die unter bestimmten Bedingungen zu keinem stabilen Gleichgewichtszustand führen.
Das besondere des neuen Paradigmas dynamischer Prozesse ist aber nicht nur, daß deren chaotische Natur aufgedeckt wurde. Wichtiger ist, daß Naturwissenschaftler ein Instrumentarium entwarfen, um diese chaotischen Prozesse zu verstehen und sogar zu quantifizieren. Die fraktale Geometrie z.B. ist ein Mittel, mit dem komplexe Strukturen wie Bäume, Wolken oder Schwankungen von Wechselkursen qualitativ und quantita-

tiv studiert werden können. Bäume können sich in der Struktur ihrer Verästelungen unterscheiden, was durch die Bestimmung der von Mandelbrot benannten fraktalen Dimension ohne weiteres feststellbar ist. Will ein Forscher untersuchen, ob eine Reihe von Daten rein zufällig ist oder eine chaotische Struktur besitzt, kann diese Reihe im sogenannten Phasenraum analysiert werden, um daraus bestimmte Schlüsse zu ziehen. Zum erstenmal versuchen Wissenschaftler nicht, zunächst einfache Strukturen zu studieren, sondern die Erforschung des Komplexen wird direkt und ohne Umwege angepackt (Nicolis, Prigogine 1987). Dies hat zu vielen Überraschungen geführt.
Auch Sozialwissenschaftler blieben in diesem Jahrhundert deterministisch. Von der Quantenmechanik wurde nur ein schwaches Echo registriert. Allein Spezialisten wie Karl Popper nahmen sie wahr. Die makroskopische soziale Welt hatte anscheinend mit der Welt der Quanten nichts zu tun. Erst die Ergebnisse der Chaosforschung, sofern sie allgemein verständlich und anschaulich sind, haben übernommene Traditionen über Bord geworfen. Neue Begriffe und Ideen werden in atemberaubendem Tempo aus den Naturwissenschaften übernommen. So ist die Rede von fraktalen Börsenkurven, Selbstorganisation in der Marktwirtschaft, von Bifurkationsprozessen in der Technologiewahl, usw. Damit wird endgültig Abschied vom mechanistischen Weltbild in den Sozialwissenschaften genommen.

## 2. Was ist Chaos?

Dynamische Systeme werden so genannt, weil sich ihr Zustand im Laufe der Zeit verändert. Bei *linearen* Systemen produzieren kleine Ursachen kleine Wirkungen, große Ursachen große Wirkungen. Die Antwort des Systems ist also proportional zur Änderung der Anfangsbedingungen. Systeme mit Rückkopplung sind Beispiele *nichtlinearer* Systeme. Die Größe einer Population in einer ökologischen Nische kann z.B. als rückgekoppeltes System modelliert werden. Ist die Population klein, wird sie schnell wachsen, wenn die Geburtenrate hoch genug ist. Ist die Population zu groß geworden, steigt die Mortalität, und im nächsten Jahr wird die Population abnehmen. Wenn die Populationsgröße zur Zeit $t$ mit dem Wert $x(t)$ zwischen 0 und 1 identifiziert wird, ist ein mögliches Modell für die Entwicklung der Population zur Zeit $t+1$ die *logistische* Gleichung, die wie folgt definiert wird:

$$x(t+1) = rx(t)(1\text{-}x(t)),$$

wobei $r$ eine Konstante ist. Diese einfache Funktion modelliert die jährlichen Schwankungen einer Population und ist offensichtlich nichtlinear. Das interessante daran ist, daß schon in diesem einfachen System eine sehr komplexe Dynamik enthalten ist. Je nach Wert des Parameters $r$ kann in dem Modell folgendes beobachtet werden: Für kleine Werte von $r$ stabilisiert sich die Population bei einem Gleichgewichtswert. Unabhängig vom Anfangswert strebt die Populationsgröße auf einem stabilen Zustand zu, der, einmal erreicht, beibehalten wird. Wird aber der Parameter $r$ langsam erhöht, wird eine Schwelle erreicht, bei der die Population von Jahr zu Jahr zwischen zwei unterschiedlichen Werten schwankt. Das Sy-

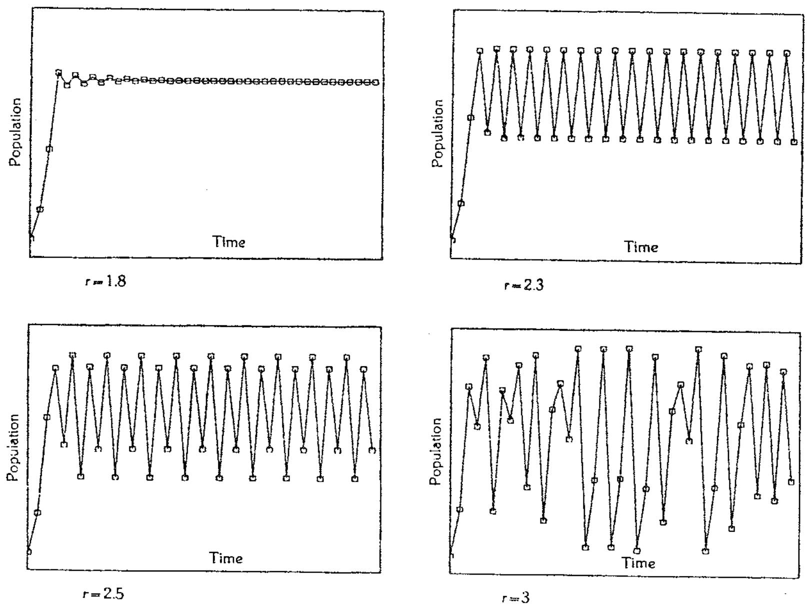


*Abbildung 1: Iterationsverlauf der logistischen Gleichung für vier unterschiedliche Parameter*

stem hat in diesem Fall eine *Bifurkation* erreicht. Der stabile Zustand wird nicht mehr durch einen einzelnen Wert dargestellt, sondern durch zwei Werte, die abwechselnd angenommen werden. Die zwei Werte bilden ein Zyklus des Prozesses, der Attraktor genannt wird. Wird $r$ weiter erhöht, wird ein neuer Punkt gefunden, bei dem eine neue Bifurkation stattfindet: das System schwankt dann zwischen vier Werten, die einen Zyklus oder Attraktor der Ordnung 4 bilden. Diese Bifurkationen wiederholen sich immer und immer wieder bei steigendem $r$ bis die Anzahl der Zustände in dem Attraktor praktisch unendlich wird. In diesem

Fall hat das System den chaotischen Bereich erreicht. Die Populationsgröße schwankt hin und her zwischen alle möglichen Werten und legt sich nie fest. Das System verändert sich, mathematisch gesehen, auf deterministische Weise von Jahr zu Jahr. Für alle praktischen Zwecke scheint die Dynamik des Systems jedoch rein stochastisch zu sein.

Chaos darf also nicht mit ungebändigtem Zufall verwechselt werden. Chaotische Systeme sind mathematisch deterministisch, physikalisch gesehen aber nicht. In dem Beispiel legt die logistische Gleichung genau fest, wie sich die Variable $x$ von Jahr zu Jahr verändert. Könnten wir $x$ mit unendlicher Genauigkeit messen, würden wir, ähnlich dem Laplaceschen Dämon, die Entwicklung des Systems von Jahr zu Jahr im voraus kennen. Dies ist aber nicht möglich, da die Quantenmechanik gezeigt hat, daß Messungen nie unendlich genau erfolgen können. Jede von uns gestellte Prognose wird mit einem kleinen Meßfehler behaftet sein. Im chaotischen Bereich des Systems wird sich dieser Fehler im Laufe der Zeit so vergrößern, daß schließlich die gestellte Prognose völlig von der tatsächlich gemessenen Populationsgröße abweichen kann.

Bei dem Lorenzattraktor erhalten wir ein ähnliches Resultat. Dieser Attraktor modelliert die Entwicklung von drei Variablen, die die Dynamik des Wetters auf einfache Weise simulieren. Er hat die Eigenschaft, daß aus zwei sehr nahen Zuständen im Laufe der Zeit völlig unterschiedliche Prognosen erhalten werden. Die Bahnen des Lorenzattraktors divergieren sehr schnell, auch wenn die Anfangskonfigurationen sehr nah beieinander liegen. Das modellierte System ist instabil, da seine Lösungen immer divergieren.

Es könnte eingewendet werden, daß solche pathologischen Beispiele eher die Ausnahme als die Regel bei dynamischen Systemen sind. Dies ist aber nicht der Fall. Der amerikanische Physiker Mitchell Feigenbaum (1978) zeigte in den siebziger Jahren, daß alle nichtlinearen dynamischen Systeme Bifurkationen mit gleichen qualitativen Eigenschaften enthalten. Mit anderen Worten: die chaotische Dynamik des Populationsbeispiels kann nicht durch die Verwendung einer anderen nichtlinearen Populationgleichung aus der Welt geschafft werden. Solange nichtlineare Populationsgleichungen zur Modellierung verwendet werden, werden Bifurkationen und letztendlich Chaos vorhanden sein. Diese Entdeckung wurde unter dem Namen »Universalität des Chaos« bekannt.

Das Ergebnis von Feigenbaum enthält einen wichtigen methodischen Hinweis für die Analyse von dynamischen Systemen. Da die Bifurkationseigenschaften von nichtlinearen Systemen universelle Merkmale besitzen, ist es nicht erforderlich, die genaue Funktion zu kennen, die die Zustandsveränderungen definiert, um bestimmte Aussagen über die Dyna-

mik zu treffen. Sobald diese Funktion nichtlinear ist, wird sie eine Bifurkationsdynamik besitzen. Dies ist umso wichtiger, da bei vielen Systemen, wie in der Marktwirtschaft, die grundlegenden dynamischen Funktionen nur qualitativ, nicht aber quantitativ bekannt sind. Wenn die qualitative Analyse bereits zeigt, daß der Prozeß nichtlinear ist, kann das Instrumentarium der chaotischen Systeme angewandt werden.
Was also wird unter Chaos in der modernen Forschung verstanden? »Chaos« bezeichnet die Dynamik eines mathematisch deterministischen Systems, dessen Zustand sich scheinbar zufällig ändert. Hinter dem Zufall steckt jedoch eine Systematik, die die Struktur eines Attraktors des Systems wiederspiegelt. Ist der Attraktor ein *seltsamer* Attraktor, evolviert das System auf eine physikalisch nicht mehr prognostizierbare Weise. Würde der Laplacesche Dämon die Welt plötzlich verdoppeln, würde die Quantenstruktur der Materie sofort unterschiedliche Ereignisse auf der Teilchenebene produzieren. Die chaotische Dynamik der makroskopischen Welt würde dafür sorgen, daß diese kleinen Abweichungen im Laufe der Zeit vergrößert würden und zu zwei völlig unterschiedliche Welten führten. Nicht einmal durch solch eine *tour de force* wäre die Welt deterministisch voraussagbar.

## 3. Chaos und Selbstorganisation

Die Erforschung chaotischer Systeme hat nicht nur Ergebnisse geliefert, die der naturwissenschaftlichen Erkenntnis Grenzen setzen, sondern hat auch zu positiven Resultaten im Sinne eines besseren Verständnisses komplexer Prozesse geführt. Im Laufe der Wissenschaftsgeschichte wurden viele komplexe Phänomene von den theoretischen Untersuchungen ausgeklammert, weil hinter einer komplexen Struktur sehr komplexe Ursachen vermutet wurden. Es wurden die einfachen Systeme studiert, in der Hoffnung, daß durch eine graduelle Anhäufung von Wissen letzendlich auch die komplexen Systeme in Angriff genommen werden könnten. Mandelbrot bedauert zurecht, daß über Jahrhunderte hinweg nur regelmäßige geometrische Körper studiert und als Grundmuster des Vollkommenenen angesehen wurden, während natürliche Muster nur am Rande untersucht wurden. Die Erforschung nichtlinearer Systeme hat aber gezeigt, daß auch sehr komplex anmutende Prozesse durch einfache Regeln gesteuert werden. Unter dem Stichwort *Selbstorganisation* wird erforscht, wie durch einfache lokale Interaktionsregeln komplexe globale Muster entstehen können.

Ein erstaunliches Beispiel der Möglichkeiten des neuen Paradigmas bietet die Analyse natürlicher Strukturen, insbesondere der Form von Pflanzen. Es ist sicherlich schwierig, sich komplexere Gesamtstrukturen vorzustellen, als sie in der Pflanzenwelt anzutreffen sind. Von großen Bäumen bis zu zierlichen Blumen scheint die Fülle der Gestalten fast unendlich zu sein und kaum einer gemeinsamen Regel zu folgen. Doch es ist in den letzten Jahren gezeigt worden, daß nur winzige Veränderungen in Wachstumsparametern von Pflanzen die Endstruktur radikal verändern können.

Douady und Couder (1991) haben gezeigt, daß, wenn Pflanzen wachsen, die interessanten Phänomene am Wachstumskegel der Pflanze stattfinden. Der Radius des Wachstumskegels ist ein Parameter, der im Laufe der Zeit zunimmt. Unterhalb eines gewissen Radius wächst die Pflanze und produziert dabei den Stiel. Am Stiel wachsen die Blätter, und zwar so, daß eine gewisse Ordnung herrscht. Die Botaniker wissen seit mehr als hundert Jahren, daß die Anordnung der Blätter in Pflanzen gewissen Grundmustern folgt (Helikoidal, Paare von Blättern, usw.). Diese Grundmuster können anhand ihrer geometrischen Eigenschaften klassifiziert werden. Die Überraschung besteht darin, daß diese Grundmuster einfach Bifurkationen des Wachstumsprozesses bei unterschiedlichen Werten des Radius des Wachstumskegels und der Wachstumsrate selbst sind. Wächst eine Pflanze schneller als eine andere, wird ihr Blättermuster eine andere geometrische Anordnung annehmen. Verändert eine Pflanze ihre Wachstumsrate zu einem gewissen Zeitpunkt, ändert sich auch die Blätterstruktur. Die Pflanze wechselt von einer Wachstumsbifurkation in eine andere. So lassen sich die Abfolge von Strukturen in Stiel und Knospen bei Blumen erklären. So läßt sich erklären, warum bestimmte Strukturen mit anderen gekoppelt sind. Und alles läßt sich aus ein oder zwei Parametern ableiten!

Die oben beschriebene Situation ist dem einfachen Beispiel mit der logistischen Gleichung ähnlich. Solange ein Grundparameter eine gewisse Größe behält, oszilliert das System entlang eines Attraktors. Wird der Parameter geändert, ändert sich auch die Dynamik an jeder Bifurkation. Daß wenige Parameter so komplexe Prozesse wie das Pflanzenwachstum beschreiben können, haben Prusinkiewicz und Lindenmayer (1990) mit ihren Computersimulationen bewiesen. Anhand von symbolischen Produktionsregeln, die Lindenmayer-Systeme genannt werden, wird das Zellenwachstum simuliert. Schon einfache symbolische Ketten können erstaunlich echt aussehende Pflanzen am Bildschirm erzeugen.

Das angesprochene Beispiel des Pflanzenwachstums zeigt, was unter Selbstorganisation verstanden wird. Nirgendwo im genetischen Code einer Pflanze steht ein genaues Abbild der endgültigen Form der Pflanze.

*Abbildung 2: Mit Lindenmayer-Systemen im Computer erzeugte Pflanzen*

In den Samen steckt keine Miniaturausgabe der Pflanze, auch nicht als genauer architektonischer Plan. Nur eine Anzahl von Parametern ist genetisch festgelegt. Wenn das Wachstum beginnt, werden diese Parameter durch biologische Rückkopplungsschleifen kontrolliert und verändert. Die genaue Form der Pflanze wird durch jede Bifurkation des dynamischen Systems bestimmt. Der genetische Code nutzt diese spontanen Prozesse und das Vorhandensein von Bifurkationen, um die knappste denkbare Beschreibung zu speichern. Wenige lokale Signale führen zu einer gesamten globalen Ordnung, die sehr komplex erscheint, obwohl der Grundprozeß im Grunde genommen sehr einfach ist.
Ein anderes Beispiel von Systemen, bei denen einfache lokale Interaktionsregeln zu globalen Mustern führen, sind Zellularautomaten. Diese mathematischen Gebilde ähneln einer gekachelten Fläche, bei der jede Kachel oder Zelle einen Zustand annehmen kann. Jede Zelle kommuniziert nur mit ihren direkten Nachbarn und verändert ihren Zustand entsprechend den Zuständen ihrer Nachbarn. Schon einfache Realisationsvorschriften führen zu globalen Mustern, die Fraktalen ähneln. Durch einen rein lokalen Informationsaustausch entsteht eine globale Ordnung, die rätselhaft erscheint. Alan Turing, Vater der Berechenbarkeitstheorie, hat solche Systeme verwendet, um die Variabilität der Pelzfärbungen bei Tieren zu erklären. Es ergibt sich, daß die Unterschiede zwischen der

Pigmentierung einer Giraffe oder den Streifen eines Zebras aus einem Diffusionsparameter und den von ihm erzeugten Bifurkationen des chemischen Prozesses zu erklären sind. Im Labor oder im Computer läßt sich ohne weiteres der Prozeß nachvollziehen, aus dem die Tiger ihre Streifen beziehen.
Minimale Voraussetzungen erzeugen in Zellularautomaten und physikalischen Systemen globale komplexe Muster. Der Prozeß wird Selbstorganisation genannt, weil, global betrachtet, die globalen Muster wie aus einer konzertierten Aktion hervorzugehen scheinen. Die Symphonie der Muster hat ein Orchester, aber keinen Dirigenten.

## 4. Selbstorganisierte Kritikalität

Komplexe Systeme, deren globale Struktur selbstorganisierend entsteht, zeigen ein Verhalten, das in letzter Zeit selbstorganisierte Kritikalität genannt worden ist. Solche Systeme entwickeln sich zu einem Zustand des instabilen Gleichgewichts, einem Zustand, der durch kleine und große Schwankungen gekennzeichnet ist.
Das Paradebeispiel eines selbstorganisierten kritischen Systems sind Sandhaufen. Die langsame Addition von Sandkörnern führt zu einem Sandhaufen, der periodisch durch Lawinen erschüttert wird. Ein Sandkorn, das auf den Sandhaufen fällt, kann eine kleine Verschiebung der Sandschichten verursachen. Diese Verschiebungen erzeugen ihrerseits mittelgroße und große Sandlawinen. Ein einziges Sandkorn, das in einem solchen System in einen kritischen Bereich fällt, kann also eine große makroskopische Wirkung haben. Wird das Eintreten von Lawinen graphisch dargestellt, fällt sofort die fraktale Natur des Prozesses auf: bei allen Maßstäben wiederholt sich dasselbe Lawinenmuster
Geologen, die das Eintreffen von Erdbeben untersuchen, modellieren die Erdkruste als ein selbstorganisiertes System im kritischen Zustand. Die Erdkruste kann als eine Reihe von zweidimensionalen Platten modelliert werden, die durch lokale Interaktion Spannungen auf ihre Nachbarn übertragen. Wird eine Platte verschoben (wie es regelmäßig auf der Erdkruste geschieht), entsteht eine Spannung zwischen ihr und ihren Nachbarn. Nach vielen zufälligen Verschiebungen der Platten wächst die Spannung des gesamten Systems bis zu einem Punkt, an dem sie reduziert werden muß. Es tritt ein Erdbeben auf. Computersimulationen dieses Prozesses haben gezeigt, daß die auf diese Weise erzeugten Erdbebenmuster identisch mit dem empirisch festgestellten Muster sind, das viele Jahre unter dem Namen Gutenberg-Richter-Gesetz unerklärt blieb. In die-

sem Fall kann die statistische Verteilung der Erdbeben erklärt werden, obwohl das Modell den genauen Zeitpunkt eines Erdbebens nicht voraussagen kann.
Die Theorie der selbstorganiserten Kritikalität postuliert, daß »zusammengesetzte Systeme spontan in einen kritischen Zustand übergehen, bei dem das kleinste Ereignis eine Kettenrekation startet, die eine große Anzahl der Systembestandteile erfassen kann« (Bak und Chen 1991). Nach dieser Theorie erreichen komplexe zusammengesetzte Systeme nie einen Zustand des stabilen Gleichgewichts. Sie wandern vielmehr von einem kritischen Zustand zu einem anderen.
Die Theorie der selbstorganisierten Kritikalität ist auch von Ökonomen anhand finanzieller Daten getestet worden. Die Marktwirtschaft kann als ein Verbund von Firmen modelliert werden, in dem kleine Spannungen zufällig eintreten. Preisschwankungen, Produktionsengpässe, Lücken im Arbeitsmarkt, usw. können einige wenige Betriebe ins Trudeln bringen. Diese Spannungen übertragen sich auf die Nachbarfirmen, werden aber nicht sofort kompensiert. Das System »speichert« mehr und mehr Spannungen bis zu dem Zeitpunkt, wo ihre gewaltsame Entladung sich als ökonomische Krise ausdrückt. Kleine Krisen wechseln sich mit großen Krisen in einem nicht voraussagbaren Prozeß ab, der jedoch eine statistische Regularität aufweist. Die Theorie der selbstorganisierten Kritikalität zeigt, daß große Fluktuationen der Produktion und der Beschäftigung unvermeidlich in einer auf sich selbst gestellten Marktwirtschaft sind.
In der zur Zeit laufenden Diskussion über die Vorzüge der freien Marktwirtschaft über die Kommandowirtschaft oder sogar über Marktwirtschaft mit regulierten Märkten, wird der Akzent vor allem auf die Selbstorganisations-Eigenschaften des Marktes gelget. »Der Markt reguliert sich selber«, das haben seit eher die orthodoxen *freetraders* gesagt. Ausgeklammert wird jedoch, daß der vermutliche Gleichgewichtszustand, bei dem alle Konsumenten und Produzenten ihre jeweiligen Nutzfunktionen maximieren, eigentlich illusorisch ist. Die freie Marktwirtschaft ist effizient, aber nur, wenn sie sich permanent am Rande des Abgrunds bewegt, d.h. wenn sie sich im kritischen Bereich befindet. Der Markt kann nur effizient sein, wenn die schwächeren und ineffizienteren Produzenten regelmäßig weggefegt werden. Diese kleinen »Lawinen« verursachen aber auf die Dauer große ökonomische Fluktuationen, die ohne Gegensteuerung unvermeidlich sind.
Damit sind wir bei einem Thema angelangt, das zur Zeit intensiv erforscht wird. Die Frage ist, ob man Chaos steuern kann. Ist es möglich, durch kleine und gezielte Stöße ein dynamisches System in einer periodischen Bahn zu behalten, auch wenn der dynamische Attraktor keine Pe-

riodizität aufweist? Neue Resultate bestätigen, daß dies bei einigen dynamischen Systemen der Fall sein kann. Ob dies sich auch für den Fall der Marktwirtschaft realisieren läßt, ist allerdings eine andere Frage.

## 5. Sozialwissenschaften und Chaos

Seit jeher übernehmen Sozialwissenschaftler periodisch und mit einer Verschiebung von wenigen Jahren Paradigmen und Methoden aus den Naturwissenschaften. Es war nur eine Frage der Zeit, bis auch die Chaosthematik sich auf verschiedenen Wegen in der sozialwissenchaftlicher Forschung wiederspiegeln würde. Das Beispiel der Modellierungsversuche von Märkten als selbstorganiserte kritische Systeme haben wir schon oben erwähnt. Weitere drei Bereiche, in denen ähnliche Untersuchungen geführt werden, benennen wir hier nur stichwortartig:

*Ökonomische Theorie und Finanzmärkte*

Eine wesentliche Voraussetzung der neoklassischen Theorien effizienter Märkte ist, daß alle Marktteilnehmer zu jeder Zeit über vollständige Information über das Marktgeschehen verfügen. Erst in den letzten Jahren ist untersucht worden, was wohl passiert, wenn die zur Verfügung stehende Information unvollständig oder sogar falsch ist. Einige Autoren haben gezeigt, daß unter der Annahme unvollständiger Information der Markt bestimmte Konfigurationen erreicht, die alle Merkmale instabilen Gleichgewichts aufweisen. Unter diesen Umständen kann der Markt durch kleine Stöße in eine instabile Lage gebracht werden, die sogar zu großen Börsenkrachs führen können (Savit 1991). Dies wurde 1987 eindrucksvoll bestätigt, als die New Yorker Börse in wenigen Stunden ihren größten Verlust in vielen Jahrzehnten erlitt. Maßgebend für den Sturzflug der Aktienkurse waren nicht die ökonomischen Eckdaten, sondern die Rückkopplungsschleifen zwischen Marktteilnehmern, die noch dazu durch die Benutzung von Computern an der Börse weiter potenziert wurden. Die Börse ist vielleicht das beste Beispiel eines instabilen ökonomischen Systems, bei dem kleine und große Schwankungen regelmäßig eintreffen. Newton selbst erfuhr schon die chaotische Natur des Marktes, als er eine große Summe an der Londoner Börse verlor. Die Bewegung der Massen konnte er berechnen, nicht aber die Bewegung der Meinungen.

*Innovationsforschung*

Bei der Analyse der Technologiewahl können die Erkenntnisse der Chaosforschung verwendet werden. Warum eine bestimmte Technologie sich gegenüber anderen durchsetzt, ist ein Phänomen, das immer *a posteriori* erklärt wird. Wir versuchen erst 1992 zu verstehen, warum der IBM-PC von 1981 sich im Markt durchsetze. Dies führt normalerweise zu der Erklärung, daß sich diese Technologie durchsetzte, weil sie die beste aller möglichen war. Wie die Untersuchungen von Arthur (1989) und anderen gezeigt haben, läßt sich eine solche Aussage in der Regel nicht machen. Eine Technologie kann sich rein zufällig durchsetzen, ohne besser als eine andere zu sein. An einem Bifurkationspunkt angelangt, die eine Technologiewahl erforderlich macht, kann der Markt einer der konkurrierenden Technologien einen kleinen Vorteil verschaffen. Durch das Vorhandensein von nichtlinearen Rückkopplungsschleifen kann der kleine Anfangsvorteil in einen unüberbrückbaren Abstand zu den konkurrierenden Technologien verwandelt werden. Eine Technologie kann sich durchsetzen, weil synergetische Effekte ihre Konkurrenten aus dem Markt werfen, ohne notwendigerweise besser zu sein. Für den IBM-PC ist schon so viel Software geschrieben worden, daß diese Technologie noch auf Jahre den Markt beherrschen wird.

*Konfliktforschung*

Soziologen versuchen neuerdings, Konflikte, sowohl soziale als auch Konflikte zwischen Nationen, auf eine andere Weise zu analysieren und zu deuten. Unter bestimmten Umständen kann das Umfeld einer Konfrontation einen Zustand annehmen, der zu unvorhersehbaren Konsenquenzen führen kann. Es ist zu untersuchen, inwieweit militärische und politische Auseinandersetzungen durch soziale Rückkopplungsschleifen angeheizt werden können.

Sicherlich werden manchmal diese Versuche einer alternativen Deutung der sozialen Welt als reine Modeerscheinung eingestuft. All diejenigen, die sich in der absoluten Gewißheit einer mechanistischen Welt zufrieden wiegen, erkennen nicht die grundlegende Veränderung des Blickwinkels, die eingetreten ist. Es gibt aber einen großen Unterschied zwischen Theoretikern, die die Welt als im Prinzip stabil betrachten, und Theoretikern, die auf die inhärente Instabilität derselben hinweisen. Der Paradigmenwechsel in den Naturwissenschaften besteht wohl darin, daß wir heute das Komplexe zu benennen und zu erfassen wagen, und daß dies auch gelingt.

## Literatur

Arthur, W. B. (1989), »The Economy and Complexity«, in: D. Stein, *Lectures in the Sciences of Complexity*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989.

Bak, P. und K. Chen (1991), »Self-Organized Criticality«, *Scientific American*, Vol. 264, Nr. 1, S. 26-33.

Cohen, B. (1985), *Revolution in Science*, Harvard University Press, Cambridge.

Crutchfield, J., D. Farmer, N. Packard und R. Shaw (1989), »Le chaos«, in: *L'ordre du chaos*, Pour La Science, Paris.

Eckmann, J.-P. und M. Mashaal (1991), »La Physique du Désordre«, *La Recherche*, Vol. 22, Mai, Nr. 232, S. 554-564.

Feigenbaum, M. (1978), »Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations«, *Journal of Statistical Physics*, Vol. 19, Nr. 1, S. 25-52.

Gleick, J. (1988), *Chaos - die Ordnung des Universums*, Knaur, München, 1988.

Kuhn, T. (1973), *Die Struktur wissenchaftlicher Revolutionen*, Suhrkamp, Frankfurt a.M.

Laplace, P. S. (1812), *Essai philosophique sur les probabilités*, Paris.

Lorenz, E. (1963), »Deterministic Nonperiodic Flow«, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 20, S. 130-141.

Murray, C. (1991), »Is the Solar System stable«, in: N. Hall (Hrsg.), *The New Scientist Guide to Chaos*, Penguin Books, London, 1991.

Nicolis, G. und I. Prigogine (1987), *Die Erforschung des Komplexen*, Piper, München.

Rae, A. (1986), *Quantum Physics: illusion or reality?*, Cambridge University Press, Cambridge.

Savit, R. (1991), »Chaos in the trading floor«, in N. Hall (Hrsg.), *The New Scientist Guide to Chaos*, Penguin Books, London, 1991.

Douady, S. und Y. Couder (1991), »Phyllotaxis as a self-organized growth process«, *Proceedings of the NATO ARW »Growth Patterns in Physical Sciences and Biology«*, Granada, Spanien, 7-11 Oktober 1991.

Prusinkiewicz, P. und A. Lindenmayer (1990), *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer Verlag, New York.