

2.3.2 Deterministisches Chaos

- Chaos-Kontexte

Das Wort Chaos hat in letzter Zeit einen breiten Raum in der öffentlichen Diskussion eingenommen und ist gegenwärtig so populär wie Anfang des Jahrhunderts die Relativitätstheorie. Leider werden durch unzureichendes Wissen über die Entstehung und die Auswirkungen des Chaos zusehends falsche Aussagen im Hinblick auf das Management sozialer Systeme getroffen. Deshalb ist eine fundierte Beschäftigung mit dieser Thematik dringend erforderlich. Die Bewältigung von Veränderungsprozessen, die durch Instabilitäten gekennzeichnet sind, erfordert keine chaotischen Manager, sondern Manager, die in der Lage sind, die Komplexität von Situationen zu betrachten.^{1/} Hierbei gilt es, komplexe Systeme nicht als unabhängige Kreisläufe aufzufassen, sondern im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtungsweise, die die Natur und alle Menschen mit einbezieht.

Die Chaosforschung, ein Teilgebiet der Nichtlinearen Dynamik, ist eine neue Disziplin, die zu einem Paradigmawechsel in der Wissenschaft führt und das Ende des Reduktionismus einläutet. Chaos ist ein dreidimensionales Phänomen^{2/}, daß sich in einem abstraktem Raum, dem sogenannten "Phasenraum" abspielt.^{3/} In komplexen Systemen treten nichtlineare Wechselwirkungen auf, d.h. ein System übt auf ein anderes einen Einfluß aus, wobei kein eindeutiger Ursache-Wirkungs-Zusammenhang besteht. Wenn Chaos ein neues Phänomen in drei Dimensionen ist, so kann man erwarten, daß bei Erweiterung der Dimensionen höherdimensionale Phänomene auftreten ("chaotische Hierarchien").^{4/} Durch das Chaos tritt neben der quantenmechanischen Unbestimmtheit (Heisenberg-Unschärfe) auch eine makroskopische Unbestimmtheit bei der Bildung von Strukturen in den Vordergrund. Falls sich die Heisenbergsche Unschärferelation als besonderes Interface-Phänomen herausstellt, sollte es möglich sein, sowohl die Quantenmechanik als auch die Relativitätstheorie durch eine reversible Theorie zu erklären, die trotzdem durch Phänomene wie das Deterministische Chaos irreversible Prozesse hervorbringen kann.

Die Gleichzeitigkeit von determinierten und undeterminierten Prozessen in chaotischen Systemen führt uns zwangsläufig zu einer neuen Physik, der zuvor beschriebenen Endophysik (siehe Kapitel 2.2.3). Durch die Chaosforschung ist auch eine neue Sprache entstanden, die Begriffe wie

Deterministisches Chaos, Seltsame Attraktoren, Bifurkationen, Phasenübergänge, Bäcker-Transformation und Fraktale enthält. Die Chaosforschung behandelt Prozesse, keine Zustände, sie behandelt das Werden, nicht das Sein und sie ist eine Wissenschaft, die von der umfassenden Natur der Systeme handelt.^{/5/} Für komplexe Systeme gibt es keinen stabilen Zustand, den das System annehmen kann, sondern nur eine dynamische Stabilisierung. Deshalb führen Bürokratien im Management nicht zum Erfolg, da diese den statischen Teil der Organisation repräsentieren. Nach **Nonaka** eröffnet die Chaosforschung einen Erklärungsansatzes für Innovationsprozesse japanischer Firmen,^{/6/} da diese die evolutionären Prozesse des Wandels beschreibt (siehe Kapitel 4.3.3.4).

Das Auftreten von Deterministischem Chaos liefert uns die Erkenntnis, daß auch jene Systeme nicht vorhersagbar sind, die einfachen Regeln folgen. Ein Beispiel hierfür ist der fließende Verkehr, der relativ einfachen Regeln folgt, jedoch deterministisch chaotisch - und somit unvorhersagbar - erfolgt. Chaosphänomene zeigen bei der Entwicklung des Wetters, Sozialsystemen, Strömungsvorgängen an einem Flugzeug etc. Lebensfähige Systeme entstehen nicht durch Negation des Chaos, sondern durch Integration von Chaos in deren Funktionsabläufe. So zeigt sich Deterministisches Chaos etwa im Schlagen eines gesunden menschlichen Herzens, bei dem Herzrhythmusvariationen auftreten, während sowohl das rein deterministische als auch das stochastische Schlagen des Herzens auf Herzerkrankungen (koronare Erkrankungen oder Vorhofflimmern) hindeuten.^{/7/}

Deterministisches Chaos tritt auch im menschlichen Gehirn auf, wo sich die Milliarden von Nervenzellen unter Einbeziehung von Fluktuationen verschalten und sich fortlaufend selbst organisieren. Der Physiker **Crutchfield** sieht im Chaos sogar die Voraussetzung für die Freiheit des menschlichen Willens.^{/8/} In der Gehirnforschung werden Gedanken als "makroskopisch kohärente Zustände betrachtet, die durch eine selektive Verstärkung zufälliger Fluktuationen entstehen"^{/9/}. Die Charakteristika der Nichtlinearen Dynamik und des Chaos legen den Schluß nahe, daß wir zum Verständnis unserer Welt ein Zeitmodell des offenen Fließens benötigen, da dynamische Ordnung jederzeit in Instabilität umschlagen kann. Deterministisches Chaos ist insofern ein wesentlicher Bestandteil für die Erneuerung von Systemen, die kreative Zerstörung alter und den Aufbau neuer Strukturen. Chaos bedeutet, sich auf Fluktuationen einzustellen und sie durch Rückkopplungen auszugleichen. Es gilt, die Unplanbarkeit der

Zukunft zu akzeptieren und das Chaos als ein Vorbild einer aktiven Ordnung für den Aufbau komplexer Strukturen zu nutzen./10/ Das Wechselspiel zwischen Notwendigkeit und Zufall, zwischen Determinismus und Indeterminismus hält den spiralförmigen Kreislaufprozeß zwischen Chaos und Dynamischer Ordnung aufrecht:

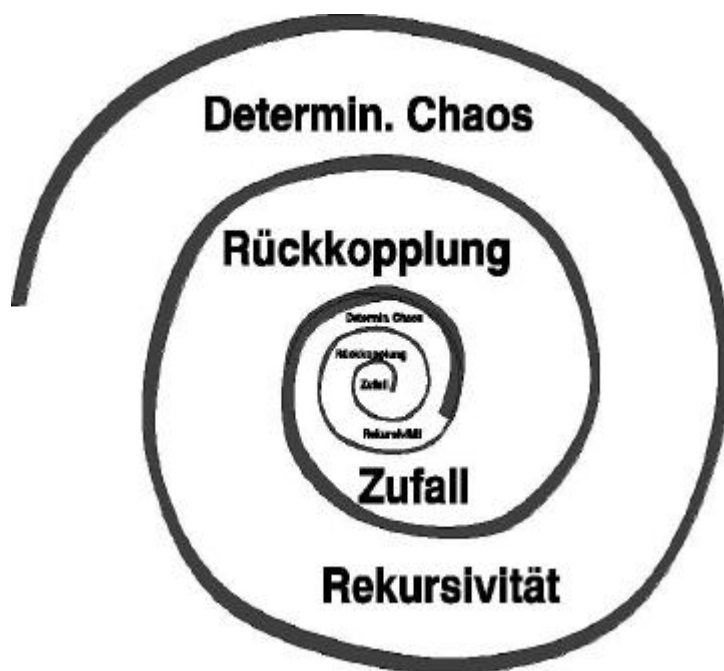


Abb. 2.28: Wiederkehrender Kreislauf von Zufall zu dynamischer Ordnung

Entscheidend für das Verständnis von Deterministischem Chaos ist das Wissen über notwendige und hinreichende Bedingungen./11/ Nur die notwendigen Bedingungen können wir schaffen, die hinreichenden Bedingungen bleiben frei. So können sich neue Regeln und Strukturen herausbilden. Im Management sollte daher die Dynamik der Abläufe möglichst wenig durch eineindeutige Handlungsanweisungen eingeschränkt werden, vielmehr sollten durch notwendige Bedingungen Wege geöffnet werden, die ein Höchstmaß an Autonomie für die sich flexibel bildenden hinreichenden Bedingungen gestatten. Daß kleine Ursachen große Wirkungen haben können, hat nicht zuletzt die Öffnung der ungarischen Grenze im Jahr 1989 gezeigt, die später zum Sturz des DDR-Regimes führte./12/ Auch wenn wir noch soviel Informationen über ein System haben, können wir nicht vorhersagen, welche konkreten Entwicklungen eintreten werden, wozu **Davies** ausführt:/13/

"Keine endliche Intelligenz, so mächtig sie auch sei, vermag zu antizipieren, welche neuen Formen oder Systeme künftig entstehen könnten."

- Entwicklung der Chaosforschung

Im östlichen Denken bedeutet Hun Tun (Kon Ton) Mischen sowie Chaos und steht für einen Zustand geistiger Klarheit ohne Illusionen. Im westlichen Kulturkreis kommt Chaos aus dem Griechischen XAOS, wo es gestaltlose Urmasse bedeutet, im Gegensatz zum griechischen Wort Kosmos, welches Struktur und Ordnung symbolisiert./14/ Alte Völker hielten Chaos für etwas Unermeßliches und Kreatives, wobei **Hesiod** das Chaos als das Erste aller Dinge, als eine klaffende Leere bezeichnete./15/

Auch gibt es erstaunliche Parallelen im Denken des vorsokratischen Philosophen **Anaxagoras**, dem großen Schüler von Thales, und dem heutigen Denken im Rahmen der Chaosforschung. Ausgangspunkt seiner Philosophie war das Entstehen und Vergehen./16/ Er untersuchte die Möglichkeit des Entmischens/17/ von ursprünglichem Chaos und der Schaffung von Ordnung durch den menschlichen Geist, der unvermischt und rein ist./18/ Das Entstehen von Neuem bezeichnet Anaxagoras als ein "Sichzusammenmischen"/19/, während das Vergehen für ihn ein "sich-Trennen" ist./20/ Mischung ist somit ein Prinzip, von dem die Bewegung des Entstehens und Vergehens ihren Ausgang nimmt./21/ Anaxagoras hat hierbei schon die Phänomene der Entropie und der Selbstorganisation vorweggenommen. Er lehnte es, im Gegensatz zu Plato ab, nur quantitative, physikalische Erscheinungen zu berücksichtigen./22/ Anaxagoras war ein Vordenker des Holismus und der Emergenz, der betonte, daß in jedem alles enthalten sei und daß der Charakter des Einzelnen aus dem Überwiegenden bestimmt wird./23/

Später wurde der Begriff des Chaos immer negativer belegt und schließlich unterdrückt. In der Welt Newtons war kein Platz für Chaos und Irregularitäten. Die Newtonsche Mechanik beschrieb Gesetze, nach denen sich die Materie mit einer solchen Genauigkeit bewegt, daß für die Existenz des Zufalls keine Notwendigkeit bestand. Es war die geniale Unterscheidung zwischen reversiblen und irreversiblen Erscheinungen und die Einführung der Wahrscheinlichkeit in die Physik durch Ludwig **Boltzmann**, die im letzten Jahrhundert zu den ersten Brüchen im Newtonschen Weltbild führte. J. C. **Maxwell** beschrieb zur damaligen Zeit singuläre Punkten, bei denen geringfügige Störungen große Wirkungen hervorrufen können./24/

Determinismus und Reduktionismus wurden erstmals durch Clausius und Poincaré im vorigen Jahrhundert wieder in Frage gestellt. **Clausius** postulierte durch die Einführung der Entropie im zweiten Hauptsatz die Irreversibilität der Zeit. **Poincaré** bewies bereits 1903, daß kleine Ursachen große Wirkungen haben können, wobei er mit der Beschreibung des "Drei-Körper- Problems" eine mathematische Formulierung von Chaos gab, obwohl der Begriff noch nicht existierte. Er zeigte auf, daß die Newtonschen Gleichungen für bestimmte Fälle unlösbar werden, wenn man von 2 zu 3 Planeten übergeht, was das gesamte Paradigma der Newtonschen Physik in Frage stellte, welches für die Physik und Astronomie fast zweieinhalb Jahrhunderte Gültigkeit besessen hatte.

Wichtige Arbeiten wurden in den 20er Jahren auch durch die französischen Mathematiker G. **Julia** und P. **Fatou** geleistet. Durch **Weierstrass** wurde im Jahr 1875 der Nachweis von stetigen aber nicht differenzierbaren Funktionen (Kurven, an die man keine Tangente anlegen kann) geführt und somit erstmals die euklidische Geometrie in Frage gestellt. Felix **Hausdorff** entdeckte die gebrochenen Dimensionen und lieferte somit die Möglichkeit der Beschreibung nichtlinearer Strukturen. Der Begriff des n-dimensionalen Raumes wurde vom französischen Mathematiker Joseph Louis **Lagrange** definiert./25/

Bereits in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts sprachen G. D. **Birkhoff** von "physical chaos" und N. **Wiener** vom "homogeneous chaos" im Bereich von Systemen der statistischen Physik, jedoch konnte sich der Begriff Chaos damals in der Physik noch nicht durchsetzen./26/ Poincarés Entdeckung des Dreikörperproblems wurde erst 1954 durch die Arbeiten von **Kolmogorow** und die nachfolgende Formulierung des KAM-Theorems (von **Kolmogorow**, **Arnold**, **Moser**) völlig verstanden, welches besagt, daß die Bahntrajektorien im Phasenraum der klassischen Mechanik weder vollständig regulär noch irregulär sind, sondern sensitiv von den gewählten Anfangsbedingungen abhängen./27/

Nachdem die Quantenmechanik den mikroskopischen Unschärfbeweis lieferte, blieb der makroskopische Beweis von Unschärfe dem Meteorologen E. N. **Lorenz** vorbehalten, der 1963 mit Hilfe eines Computers nachwies, daß kleine Fluktuationen in den Anfangsbedingungen von Wetterdaten nach einer bestimmten Entwicklungszeit zu völlig unterschiedlichen Zuständen führen können. Lorenz hatte die sensitive Abhängigkeit chaotischer Systeme von den Anfangsbedingungen in seinem Wettermodell gefunden. Dieses

Phänomen wird wegen der Form seines Attraktors im Phasenraum seither auch als 'Schmetterlingseffekt' (siehe Abbildung 2.29) bezeichnet. Dieser Lorenz-Attraktor ist eine im dreidimensionalen Raum einmal gefaltete Fläche.

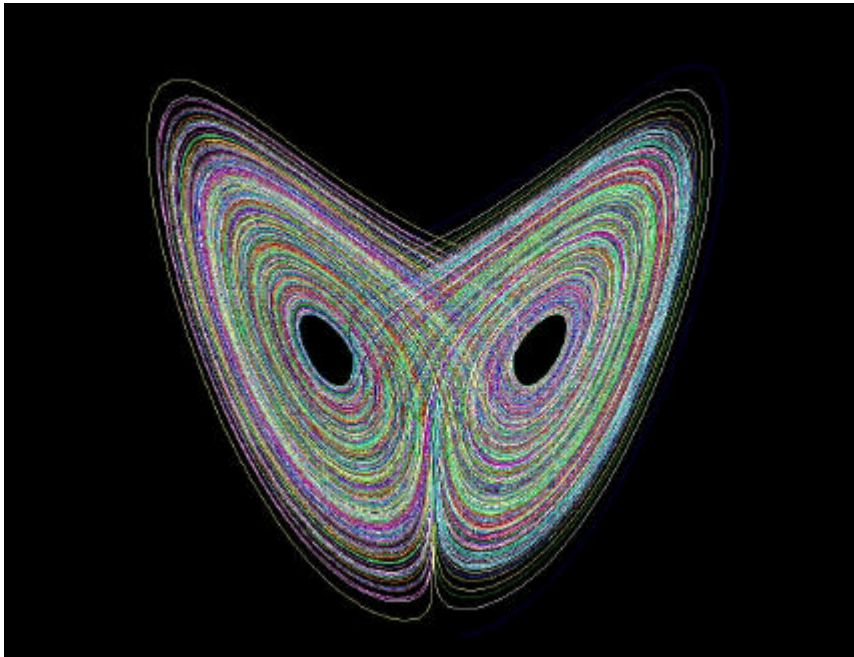


Abb. 2.29: Schmetterlings-Attraktor von Lorenz/[28/](#)

Der Begriff des Chaos wurde 1975 durch die Arbeiten von James A. **Yorke** und Robert M. **May** in der klassischen Physik eingeführt/[29/](#) und danach von vielen Wissenschaftlern aufgegriffen. Yorkes Botschaft war: „Chaos ist überall, es ist stabil und es besitzt eine Struktur!“/[30/](#) May zeigte auf, daß selbst einfache Gleichungen eine erstaunliche Anzahl von Lösungen zulassen können. Zur selben Zeit beschäftigten sich, aufbauend auf den Arbeiten von Kolmogorow aus den 50er Jahren, die russischen Wissenschaftler A. N. **Sarkovski** und **Sinai** mit der Chaosforschung, wobei Sinai die bisherigen Ergebnisse der Chaosforschung auf die Thermodynamik übertrug./[31/](#) Zu seinen Ehren werden heutzutage die Muster sich stoßender Billardkugeln als Sinai-Chaos bezeichnet.

Einen weiteren Meilenstein stellen die Arbeiten des russischen Nobelpreisträgers Ilya **Prigogine** dar, der 1967 den Begriff der dissipativen Strukturen (siehe Kapitel 2.1.2) einführte, womit er thermodynamische Systeme fern vom Gleichgewicht charakterisierte. Prigogine verwendet das Wort Chaos sowohl in passiver als auch in aktiver Form. Er unterscheidet

das passive Chaos des Gleichgewichts, wo die Entropie (siehe auch bei Boltzmann) maximal ist und keine Organisation existiert vom aktiven Chaos, worunter er ein turbulentes Chaos fern vom Gleichgewicht versteht./[32](#)/ Die Entfernung vom Gleichgewicht gilt heutzutage als ein wesentliches Merkmal deterministisch chaotischer Systeme.

Mitchell **Feigenbaum** entdeckte 1975 während seiner Arbeiten über Nichtlinearität, daß bei dynamischen Systemen an ganz bestimmten Stellen Periodenverdopplungen auftreten. Hierbei ist eine Konstante von Bedeutung, die später Feigenbaumzahl genannt wurde und die den Übergang von Ordnung zu Chaos charakterisiert. Als Michael F. **Barnsley** Feigenbaums Funktionen auf der Ebene der komplexen Zahlen untersuchte, entdeckte er dort die später so benannten Julia-Mengen, die bereits in den 20er Jahren vom französischen Mathematiker **Gaston Julia** entdeckt wurden, der diese jedoch ohne Computer nicht visualisieren konnte. Hervorzuheben ist noch der Physiker **David Ruelle**, der bei Untersuchungen zur Bérnard-Instabilität einen schnelleren Übergang zum Chaos fand und der dem Attraktor der Turbulenz und des Chaos den heutzutage gängigen Beinamen "seltsam" gab. **Robert S. Shaw** war der erste, der die Informationstheorie und die Chaosforschung miteinander in Beziehung setzte, indem er eine interessante Deutung von Seltsamen Attraktoren lieferte: Deterministisches Chaos ist die Erzeugung von Information (siehe auch Kolmogorow-Sinai-Entropie)./33/

Das Wort 'fraktal' wurde in den 80ern von dem Mathematiker und Nobelpreisträger **Benoit Mandelbrot** (Schüler von **Gaston Julia**) geprägt. In bahnbrechenden Arbeiten zur fraktalen Geometrie zeigte er, wie man mit deren Hilfe komplexe, selbstähnliche Strukturen/[34](#)/, wie sie häufig in der Natur auftreten, mathematisch modellieren kann. Er untersuchte rückgekoppelte Gleichungen, in denen komplexe Zahlen (bestehend aus einem Real- und einem Imaginärteil/[35](#)/) vorkommen und stellte diese auf dem Bildschirm des Computers dar. Durch Verallgemeinerungen innerhalb der Verhulst-Gleichung und bei Julia-Sets gelangen Mandelbrot Darstellungen von höchster Komplexität und atemberaubender Schönheit (siehe auch Kapitel 2.3.3)./36/

Die Visualisierungen von Fraktalen wurden insbesondere durch den Mathematiker **Heinz-Otto Peitgen** weiter perfektioniert. Seine Leistung besteht unter anderem darin, daß er ein breites theoretisches Fundament für das Verständnis von Fraktalen erarbeitete und dies einer breiten Öffentlichkeit verständlich machte. Während Chaos nichtlineare

Zeitphänomene beschreibt, offenbaren Fraktale ihm zufolge die Komplexität räumlicher Strukturen./37/ Peitgen vermutet sogar, daß die Gehirnarhitektur und chaotische Attraktoren in wesentlichen Merkmalen übereinstimmen, und daß dieser Sachverhalt für zukünftige Rechnerarchitekturen genutzt werden könne./38/

Eine weitere Schlüsselfigur im Bereich der Chaosforschung ist der Biochemiker Otto E. **Rössler**, nach dem der Rössler-Attraktor benannt wurde und für die seltsamen Attraktoren Gebilde von philosophischem Interesse sind. 1976 fand Otto E. Rössler ein besonders einfaches Modell, das wahrscheinlich die elementarste geometrische Konstruktion von Chaos in kontinuierlichen Systemen ist./39/ Die Rössler-Gleichungen zeigen, wie die nichtlinearen Faltungs- und Entfaltungsvorgänge implizit im System verborgen sind. Das Rössler-System ist ein künstliches System, mit dem Ziel, ein Modell für einen seltsamen Attraktor zu erzeugen, d.h. daß es verkörpert eine Art Modell des Lorenz-Modells./40/

Die Entstehung von Chaos kann geometrisch aus Prozessen des Drehens und des Faltens heraus erklärt werden./41/ Chaos ist nach Rössler im Sinne von Anaxagoras ein Mischen durch Rühren, wobei das 'In-die-Länge-Ziehen' und 'Aufeinanderlegen' von Teig eine brauchbare Analogie zum Verständnis liefert./42/ Nach ihm sind sowohl Anaximanders Differenz als auch Heraklits Fließen Implikationen des anaxagoräischen Chaos./43/ Ein "unverstehbares Chaos" darf es Rössler zufolge nicht geben, da eine als unverstehbar akzeptierte Natur ein böser Traum ("bad trip") wäre und die Hoffnung auf Fairneß in der Gesellschaft untergraben würde./44/ Die Chaostheorie besagt deshalb seiner Interpretation nach, daß sich die Welt so verhält, als ob diese eine Maschine wäre, die mit transfiniter (Freiheit zulassender) Genauigkeit abläuft./45/, weshalb ein neuartiges Verständnis der Naturwissenschaften notwendig wird./46/

"Chaos thus represents the greatest challenge to the mind - the break out from the prison of appearances."

Einen Ausweg aus diesem Gefängnis der Erscheinungen bietet die von ihm und **Finkelstein** begründete Forschungsrichtung der Endophysik, die Modellwelten beschreibt, in denen Teilnehmer Simulationen durchführen, um die Entwicklungsalternativen komplexer Strukturen abzuschätzen (siehe Kapitel 2.2.3)./47/ Die Hauptimplikation des Chaos ist nach Rössler die Endo-/Exo-Unterscheidung, die durch Gödels Theorem unvermeidbar wurde (siehe Kapitel 1.1)./48/ Die Betrachtung des Interface zwischen

beobachterinternem Chaos und Systemumgebung führt ihm zufolge zu einer mikro-relativistischen Erklärung der Quantenmechanik (siehe auch Kapitel 3.4)./49/

- Die Chaosforschung bietet ein mathematisches Konzept zur Modellierung von Phänomenen mit komplexer Dynamik.

- Die Chaosforschung untersucht den zeitlichen Verlauf nichtlinearer und damit in der Praxis am häufigsten auftretenden Problemstellungen.

- Die Chaosforschung offenbart uns, daß die meisten Systeme nicht mit isolierten Teilsystemen arbeiten, sondern mit gekoppelten Systemen, die miteinander wechselwirken.

- Die Chaosforschung bietet die Möglichkeit, den Grad der Stabilität eines Systems zu beurteilen.

- Die Chaosforschung zeigt die Unmöglichkeit der langfristigen Prognostizierbarkeit unterschiedlicher Problemstellungen auf.

- Die Chaosforschung liefert Gesetzmäßigkeiten für den Übergang von geordneten zu chaotischen Verläufen.

Abb. 2.30: Bedeutung der Chaosforschung

- Chaos und Ordnung

Deterministisches Chaos erzeugt Ordnung innerhalb scheinbarer Unordnung. Es generiert zyklische Muster mit rekursiver Ordnung und hat hierbei eine universelle Anwendbarkeit. Deshalb vermittelt uns die Chaosforschung eine neue gemeinsame Sprache für die Entschlüsselung von Komplexität. Der amerikanische Meteorologe Edward **Lorenz** erkannte bei Berechnungen seines einfachen Wettermodells mit 12 Gleichungen, daß kleinste Änderungen in den Anfangsbedingungen sich zu größten Wirkungen summieren können. Die Kurven, die dieses System erzeugte, waren von unendlicher Komplexität, da sich der Verlauf innerhalb eines bestimmten Grenzbereichs nie wiederholte. Im Bereich der Endo-Welt seines erzeugten Spielzeugwetters konnte Lorenz eine besondere Form von Ordnung entdecken, das Deterministische Chaos. Sein Differentialgleichungssystem hatte folgende Form:/50/

$$\frac{dx}{dt} = -10x + 10y$$

$$\frac{dy}{dt} = 28x - y - xz$$

$$\frac{dz}{dt} = 8z/3 + xy$$

Lorenz beschrieb diese Phänomene in einem Aufsatz-Triptychon, dessen Mittelteil den Titel "Deterministic Nonperiodic Flow" trägt und zur Bibel der Chaosforscher avancierte.^{/51/} Am Phänomen des Wetters bestätigt sich am deutlichsten Poincarés Aussage, daß Zufall und Determinismus durch die Langzeitunvorhersagbarkeit versöhnt werden.^{/52/} Beim Wetter liegt eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit der Prognosen vor, wenn der Zeitraum 5 Tage nicht überschreitet. Die Physik bezeichnet diese Vorhersagezeit als Korrelationszeit. Sie ist abhängig vom jeweiligen System.

Die drei Charakteristika des Chaos sind: Sensitivität, dichte periodische Punkte und Mischen.^{/53/} Um die Dynamik komplexer Systeme zu charakterisieren, wird der Lyapunov-Exponent benutzt (siehe Kapitel 2.3.3). Für das Auftreten von Chaos in Systemen muß die notwendige Bedingung von drei Freiheitsgraden (d.h. drei Lyapunov-Exponenten) und die hinreichende Bedingung eines positiven Lyapunov-Exponenten erfüllt sein. Die Summe der Lyapunov-Exponenten darf, da das System beschränkt ist, entweder Null oder negativ sein. Deterministisches Chaos (Deterministisches Rauschen^{/54/}) zeichnet sich durch die sensitive Abhängigkeit dynamischer Systeme von den Anfangsbedingungen aus. Das heißt nichts anderes als daß sich chaotische Systeme bei minimalen Abweichungen in den Anfangsbedingungen der Vorhersagbarkeit entziehen bzw. daß die Ungenauigkeit in der Vorhersage des Zustands eines Systems mit der Vorhersagezeit exponentiell wächst. Grundsätzlich können vier Arten von Chaos unterschieden werden, wobei das Deterministische Chaos sowohl das Hamiltonsche wie auch das Dissipative Chaos und das Hyperchaos mit einschließt:

1) Statistisches Chaos - Brownsche Molekularbewegung

2) Hamiltonsches Chaos - Dreikörperproblem

3) Dissipatives Chaos - Turbulente Strömung

4) Hyperchaos - Rössler-Gleichungen

Chaos kann sehr einfach durch die Iteration von Zustandsfunktionen erzeugt werden. Diese Iterationen sind nichts anderes als kybernetische Selbststeuerungen der Systeme unter dem Einfluß vorheriger Zustände. Ein bereits genanntes Beispiel ist das Video-Feedback, wobei eine Kamera, die auf einen Fernseher gerichtet ist, sich fortlaufend selbst aufnimmt, indem die Aufnahmen im Fernseher gezeigt werden. Je nach Abstandsvariation vom Fernseher sind hierbei deterministisch chaotische Muster im Fernseher zu sehen. Das Chaos entsteht hierbei also nicht durch ein äußeres Störglied, sondern die Zustandsfunktion generiert aus sich selbst heraus dieses chaotische Verhalten. Dies ist ein Hinweis auf das Endo-Verhalten chaotischer Systeme.

Das Wirken des Deterministischen Chaos läßt sich anschaulich am Beispiel des Verkehrs erklären. Hierbei erweisen sich der Determinismus und der absolute Zufall als Grenzwerte. Ersterer liegt im Falle des Verkehrsstillstandes vor, letzterer wenn sich kein Verkehrsteilnehmer an irgendwelche Regeln halten würde. Die Wortwahl Verkehrschaos für die Bezeichnung eines Staus oder der völligen Unordnung bei Regelmäßigkeit ist deshalb nicht korrekt. Der Grund dafür, daß der Verkehr trotz einer immens hohen Zahl von Vorschriften und Verordnungen zu Instabilität und Deterministischem Chaos neigt, liegt begründet in der Nichtlinearität des Systems aufgrund verzögerter Rückkopplungen./55/ Das Fehlverhalten einzelner Verkehrsteilnehmer kann durch Rückkopplung das System Verkehr maßgeblich beeinflussen und im Extremfall sogar zum Erliegen bringen. Schnelles Reagieren und spontanes Einstellen auf neue, zufällige Situationen gehören beim Verkehr zum Alltag. Deterministisch chaotisches Verhalten ist deshalb für die Verkehrsteilnehmer unumgänglich, wenn sie sich in diesem zurechtfinden wollen.

Überträgt man die bisher erwähnten Merkmal des Chaos auf das Management, so läßt sich sagen, daß wir auch dort, Entscheidungssituationen mit vielen Freiheitsgraden vorfinden, die durch nichtlineares Verhalten und im besonderen Chaos gekennzeichnet sind. Wir können also nicht mit den bisherigen Planungsansätzen Voraussagen machen, sondern wir benötigen hierfür Modelle von komplexen Interfaces, die auch den moderaten Zufall und die Strukturbildung berücksichtigen.

- Logistic Map

Die Entstehung von Deterministischem Chaos kann am besten am Beispiel der logistischen Gleichung erläutert werden, auch Logistic Map genannt. Diese hat folgende Form:[/56/](#)

$$x_{t+1} = a x_t (1-x_t)$$

Wichtig bei der Logistic Map ist, daß diese kein System darstellt, sondern nur eine Gleichung, die eine Beschreibung chaotischer Phänomene ermöglicht. Die Gleichung als solche beschreibt weder dissipatives noch konservatives Verhalten. In nichtlinearen Gleichungen treten Terme auf, die fortwährend mit sich selbst multipliziert werden, wie beispielsweise in der obigen Gleichung, wo der Term x_t im Quadrat auftritt. Interessant wird diese Nichtlinearität immer dann, wenn man die Gleichung auf sich selbst anwendet und den Ergebniswert der Funktion als Ausgangswert für den nächsten Berechnungsschritt wählt.[/57/](#) Die Logistic Map unterliegt hierbei der Dynamik zweier entgegengesetzter Effekte, dem dehnenden Faktor x_t und dem zurückfaltenden Faktor $(1-x_t)$. Systeme wie die Logistic Map sind nicht zyklisch, da sie niemals einen früheren Zustand exakt wiederholen. Hierbei zeichnet die Variable a für das chaotische Verhalten verantwortlich:

Wert des Systemparameters a	Systemverhalten
$0 \leq a < 1$	Konvergenz gegen den Ursprung
$1 < a < 3$	Auftreten eines stabilen Grenzwertes
$3 < a < a_c$	Stabile periodische Schwingungen
$a_c < a < 4$	Auftreten von Chaos, aber auch von Ordnung
$a > 4$	System konvergiert gegen minus unendlich
$a_c \sim 3.57$ und bei $a = 4$	Wechsel des Systemverhaltens (Bifurkationspunkte)

Tab. 2.11: Systemverhalten der Logistic Map

Nachfolgende Abbildung zeigt das zunächst völlig zufällig erscheinende Verhalten der Logistic Map. Trägt man jedoch die bei einem Wert $a = 3,8$ ermittelten Werte in zeitversetzter Folge $x_t; x_{t+1}$ und $x_t; x_{t+5}$ auf, so zeigt Abbildung 2.32, wie sich bei zunehmenden x_t -Werten eine verborgene Ordnung entfaltet. Die sich dort zeigende Spiralstruktur ist ein Kennzeichen für die eingefalteten Ordnungsstrukturen innerhalb der Logistic Map. Je größer die x_t -Werte sind, desto komplexer wird die implizite Ordnung, wobei gleichzeitig die Konturen zunehmend unschärfer werden. Die hierbei entstehenden Muster kann man als Projektionen von höherdimensionalen Räumen in die Ebene auffassen. Dies läßt erahnen, welche Komplexität sich hinter relativ einfach

anmutenden Gleichungen verborgen sein kann, wenn diese auf sich selbst angewendet werden können.

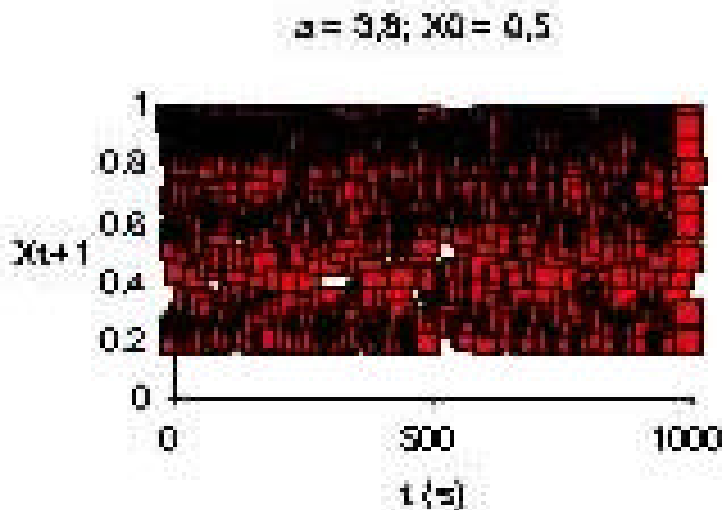


Abb. 2.31: Deterministisches Chaos bei der Logistic Map

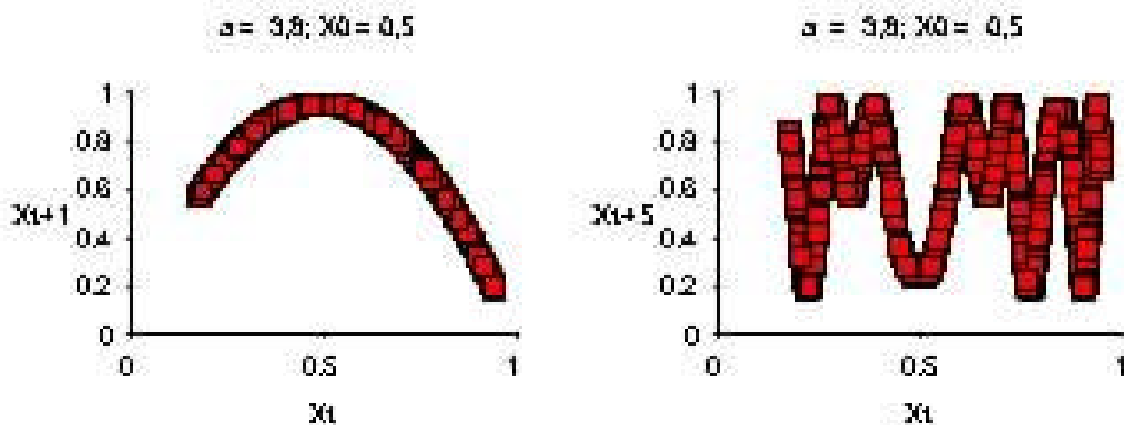


Abb. 2.32: Deterministisch chaotisches Verhalten eines Systems

Bei chaotischen Systemen versagt eine Beschreibung durch einzelne Trajektorien, da sich jene nicht auf individuelle Trajektorien reduzieren lassen./58/ Chaotische Systeme können durch Ansammlungen (Ensembles) von Trajektorien beschrieben werden./59/ Es ist eine grundlegende Eigenschaft der dynamischen Entwicklung, daß das von dem Ensemble eingenommene Phasenraumvolumen konstant bleibt, wobei sich jedoch die

Form ändern kann./60/ Systeme, die ihr Phasenraumvolumen behalten, werden konservativ genannt, während bei dissipativen Systemen das Phasenraumvolumen schrumpft. Innerhalb einer geschlossenen Region können endogene deterministische Variablen in einer zufälligen und unvorhersagbaren Weise variieren./61/

Feigenbaum entdeckte bei der Logistic Map/62/ ein Naturgesetz für Systeme, die chaotisch werden: Der Prozeß der Periodenverdopplung, der zum Chaos führt, verläuft nicht willkürlich, da das Verhältnis der Differenz zweier aufeinanderfolgender Bifurkationswerte a zur nachfolgenden Differenz dieser Werte stets $f = 4,669201660910\dots$ beträgt. Diese Konstante wird Feigenbaumzahl genannt und beschreibt den Übergang von Ordnung zu Chaos. Das diesen Übergang charakterisierende Feigenbaum-Diagramm hat sowohl qualitative als auch quantitative Merkmale./63/ Von besonderem Interesse ist, daß diese Universalkonstante von Mathematikern und Physikern bei einer Gleichung für biologische Systeme gefunden wurde, was verdeutlicht, wie wichtig es ist, daß die Interdisziplinarität in der Forschung gefördert wird.

- Bifurkationen

Das Wort Bifurkation leitet sich her vom lat. furca, was so viel wie Gabel oder Forke bedeutet./64/ Eine Bifurkation ist eine Veränderung in der qualitativen Natur von Lösungen eines Systems/65/, wobei die Weggabelungen Alternativen markieren, die ein System einnehmen kann, das sich durch fortgesetzte Rückkopplung und Selbstorganisation transformiert. Bifurkationen stellen Brüche in der Symmetrie dar und führen deshalb zur Irreversibilität systemischer Entwicklungen./66/ Hierbei trennen Bifurkationspunkte Bereiche mit qualitativ unterschiedlichen Verhaltensmustern. An jeder Bifurkation öffnet sich ein Fenster aufs Ganze, wobei die Verstärkung von Fluktuationen entweder zu Selbstorganisation oder Deterministischem Chaos führt./67/ Nach **Langton** besteht ein Zusammenhang zwischen Phasenübergängen und der Erzeugung von Informationen:/68/

"We expect that information processing can emerge spontaneously and come to dominate the dynamics of physical systems in the vicinity of a critical phase transition."

Lebende Systeme haben die Fähigkeit entwickelt, sowohl zuviel Ordnung als auch zuviel Chaos zu vermeiden, als auch sich in der Nähe eines

kritischen Phasenübergangs zu bewegen./69/ Evolution scheint hierbei darin zu bestehen, daß Systeme einen Phasenübergang in einen höherdimensionalen Phasenraum vollziehen./70/ Sprunghafte Übergänge in der Natur gehorchen keinen linearen Gesetzen. Es ist die Nichtlineare Dynamik mit ihren Bifurkationen und Periodenverdopplungen, die es ermöglicht, den Übergang von Periodizität zu Chaos zu beschreiben. Erhöht sich die Komplexität schneller als es die Anpassungsfähigkeit von Systemen erlaubt, so werden Systeme durch geringfügige Fluktuationen nachhaltig beeinflusst. Durch Bifurkationen kann das System auf ein höheres Komplexitätsniveau transformiert werden. Diese Phasenübergänge ermöglichen es, daß sich Systeme ständig hin zu neuen dynamischen Ordnungsstrukturen entwickeln.

Laut **Laszlo** findet durch die Vorstellung von Bifurkationen die Kategorie des Ereignisses Eingang in die moderne Wissenschaft./71/ Laszlo zufolge, entstehen durch die Zunahme der Instabilitäten Bifurkationen in allen Bereichen: T-Bifurkation bei Technologien, C-Bifurkationen bei politischen und sozialen Konflikten sowie E-Bifurkationen im wirtschaftlichen Bereich./72/ Ein Beispiel dafür, wie Bifurkationen sichtbar gemacht werden können, ist die bereits zuvor beschriebene Logistic Map. Trägt man die bei unterschiedlichen α -Werten entstehenden Ereignisse (Zahlenfolgen) im Rahmen von Längsschnitten i für die Werte x_{t+i} auf, so offenbart sich deren ganze Komplexität. Man erhält das Verzweigungsdiagramm der logistischen Abbildung, bei der sich ständig neue Bifurkationen vollziehen:

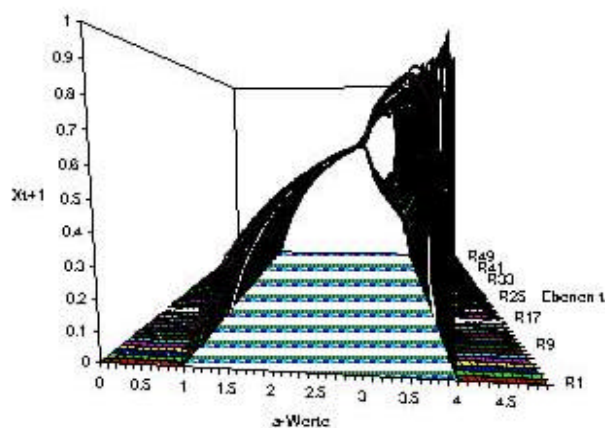


Abb. 2.33: Auftreten von Bifurkationen für konkrete Schnittebenen t

Jantsch hob hervor, daß Fluktuationen innerhalb eines Systems durch Autokatalyse verstärkt werden können, wie bei der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (siehe Kapitel 2.1.2), einer chemischen Reaktion, bei der sich konzentrische oder spiralförmige Wellen beobachten lassen./73/ Die meisten Systeme dämpfen jedoch Fluktuationen und versuchen, die Lebensdauer der alten Struktur zu verlängern./74/ Durch Fluktuation über eine Instabilitätsschwelle werden Systeme in neue Strukturen getrieben. Am Bifurkationspunkt setzt sich zufällig eine Richtung durch, die dann bestimmend für das weitere Systemverhalten wird. Ein Beispiel aus dem Management ist der Wettbewerb zwischen den Videosystemen Betamax und VHS, den VHS trotz einer schlechteren Ausgangsposition für sich entscheiden konnte. Die Welt der Fluktuationen, Bifurkationen und Phasenübergänge hat ihre eigenen Gesetzmäßigkeiten für die Interpretation der Gegenwart und dem Spiel mit dem Zufall. Während des Spiels mit dem Zufall sind Fehler zulässig, ja sogar erwünscht, da wir nur durch Versuch und Irrtum in der Lage sind, neues Wissen über komplexe Zusammenhänge zu erwerben. Hierbei tauchen neue Fragen auf, die ohne diese Vorgehensweise erst sehr viel später zu Tage treten würden.

- Die Unplanbarkeit der Zukunft ist eine ständige Herausforderung für ein verantwortungsvolles Ausüben von Macht.

- Das Deterministische Chaos stellt als dynamisches Prinzip bestehende Machtstrukturen in Frage (Mischen durch (Auf)rühren im Sinne Rösslers ist somit ein (r)evolutionäres Prinzip).

- Das Deterministische Chaos eröffnet komplexen Systemen die notwendigen Freiräume für das Hervorbringen von Innovationen und strukturellem Wandel.

- Bifurkationen eröffnen Freiräume für Transformationen auf höhere Komplexitätsniveaus.

Abb. 2.34: Konsequenzen für Macht und Freiheit

Wissenschaftliche Kontexte:	Auswirkungen auf das Management:
- Für chaotische Systeme können nur notwendige, nicht jedoch hinreichende Bedingungen angegeben werden.	- Management sollte so wenig wie möglich hinreichende Bedingungen angeben, um die Kreativität der Mitarbeiter zu erhalten.
- Chaotische Systeme entziehen sich bei minimalen Abweichungen in den Anfangsbedingungen der Vorhersagbarkeit.	- Selbst Managementsysteme, die einfachen Regeln folgen, sind nicht vorhersagbar.
- Kleine Fluktuationen in den Anfangsbedingungen von Wetterdaten können nach einer bestimmten Entwicklungszeit zu völlig unterschiedlichen Zuständen führen.	- Erfolg im Management hängt sensitiv von den gewählten Anfangsbedingungen ab. Minimale Schwankungen können über den Erfolg oder Mißerfolg von Produkten oder Dienstleistungen entscheiden.
- Chaos entsteht nicht durch ein äußeres Störglied, sondern die Zustandsfunktion generiert aus sich selbst heraus dieses chaotische Verhalten. Dies ist ein Hinweis auf das Endo-Verhalten chaotischer Systeme.	- Deterministisch chaotisches Verhalten entsteht nicht durch äußere Einflüsse, sondern wird im Innern des Unternehmens (in einer Endo-Welt) erzeugt.
- Die Physik bezeichnet die Vorhersagezeit von Prognosen als Korrelationszeit. Sie ist abhängig vom jeweiligen System.	- Im Management entspricht die Korrelationszeit der Chaosforschung den Zeithorizonten eines bestimmten Energieträgers, eines Innovationszyklusses oder eines typischen Produktionsprozesses.
- Eine Bifurkation ist eine Veränderung in der qualitativen Natur von Lösungen eines Systems.	- Entscheidungssituationen stellen im Management oftmals Bifurkationspunkte dar.

Abb. 2.35: Konsequenzen für das Endo-Management

[1](#) Vgl. Schmidt (Chaos), 11.

[2](#) Ebenso wie der Mensch existiert es in einem dreidimensionalen Raum.

[3](#) Vgl. Rössler (Chaos und Endophysik), 222.

[4](#) Vgl. Rössler (Hierarchy), 44.

[5](#) Vgl. Gleick (Chaos), 13.

[6](#) Vgl. Zimmerman (Chaos), 3.

[7](#) Vgl. Scheingraber (Chaos), 167f.

[8](#) Vgl. Davies (Chaos), 271.

[9](#) Bolz (Chaos), 78.

[10](#) Vgl. Bolz (Chaos), 38.

[11](#) Eine notwendige Bedingung muß erfüllt sein, damit etwas passiert, während eine hinreichende Bedingung erfüllt sein kann, damit etwas passiert. Notwendige und hinreichende Bedingungen, wie diese z.B. bei Regeln auftreten, müssen erfüllt sein und wenn diese gelten, dann passiert etwas.

[12](#) Vgl. Heitger (Chaos), 116.

[13](#) Davies (Chaos), 83.

[14](#) Vgl. Ebeling (Chaos), 5.

[15](#) Vgl. Peat (Chaos), 21.

[16](#) Vgl. Weischedel (Hintertreppe), 18.

[17](#) Vgl. Rössler (Endophysik), 17f.

[18](#) Vgl. o. V. (Vorsokratiker II), 195.

[19](#) Daß dynamische Systeme mischen können, wurde zuerst von Hopf bewiesen.

Vgl. Rössler (Chaos und Endophysik), S. 222.

[20](#) Vgl. o. V. (Vorsokratiker II), 185.

[21](#) Vgl. Lullus (Logik), 181.

[22](#) Vgl. o. V. (Vorsokratiker II), 163.

[23](#) Vgl. o. V. (Vorsokratiker II), 183.

[24](#) Vgl. Prigogine (Natur), 80. Maxwells Vorstellung vom schwachen Determinismus bedeutete nichts anderes als Deterministisches Chaos, also die sensitive Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen.

[25](#) Vgl. Glaser (Wir-Maschine), 229.

[26](#) Vgl. Thomas (Chaos), 199.

[27](#) Vgl. Mainzer (Complexity), 49.

[28](#) Vgl. Peitgen (Fractals), Plate 23.

[29](#) Vgl. Thomas (Chaos), 199.

[30](#) Vgl. Gleick (Chaos), 113.

[31](#) Vgl. Gleick (Chaos), 113f.

[32](#) Vgl. Peat (Chaos), 202.

[33](#) Vgl. Gleick (Chaos), 361f.

[34](#) Der Physiker Osborn **Reynolds** war dem Phänomen der Selbstähnlichkeit bereits bei Untersuchungen von Turbulenzen im 19. Jahrhundert begegnet. Nach ihm wurde die Reynoldszahl benannt, die angibt, wann ein System in Turbulenz übergeht. Da dieser Übergang im großen Maßstab genauso verläuft wie im kleinen, war Reynolds bereits damals einer wichtigen Eigenschaft von Fraktalen begegnet.

[35](#) Interessant an der imaginären Zahl i ist, daß diese sowohl bei Berechnungen in der Relativitätstheorie als auch bei den Fraktalen der Chaosforschung eine gestaltende Rolle spielt.

Vgl. Wyss (Chaos), 182.

[36](#) Vgl. Cramer (Chaos), 192.

[37](#) Gespräch mit Peitgen, 1994.

[38](#) Vgl. Peitgen (Mathematik), 118.

[39](#) Vgl. Peitgen (Fractals), 686.

[40](#) Vgl. Peitgen (Fractals), 697.

[41](#) Vgl. Bolz (Chaos), 83.

[42](#) Vgl. Rössler (Chaos), 107.

[43](#) Vgl. Rössler (Chaos), 118.

[44](#) Vgl. Rössler (Chaos), 107.

[45](#) Vgl. Rössler (Flammenschwert), 11.

[46](#) Rössler (Introduction), 5.

[47](#) Hervorzuheben sind hier auch die Arbeiten von Harald **Atmanspacher**, Hans **Primas** und David **Finkelstein**.

[48](#) Vgl. Rössler (Intra-Observer), 417ff.

[49](#) Vgl. Rössler (Chaos), 107.

[50](#) Markus (Postmoderne), 297.

[51](#) Vgl. Gleick (Chaos), 49ff.

[52](#) Vgl. Ruelle (Zufall), 49.

[53](#) Vgl. Peitgen (Fractals), 554.

[54](#) Vgl. Ruelle (Chaos), 68.

[55](#) Vgl. Scheingraber (Chaos), 174.

[56](#) Vgl. Scheingraber (Chaos), 265.

[57](#) Bei diesen Iterationen wirkt die sogenannte Bäcker-Transformation.

[58](#) Vgl. Prigogine (Paradox), 230.

[59](#) Vgl. Prigogine (Paradox), 15.

[60](#) Vgl. Prigogine (Paradox), 138f.

[61](#) Vgl. Goodwin (Dynamics), 89.

[62](#) Robert May hatte zuvor die Logistic Map bereits vor dem Hintergrund der Populationsbiologie beleuchtet.

[63](#) Vgl. Peitgen (Fractals), 586.

[64](#) Cramer (Chaos), 159.

[65](#) Vgl. Goodwin (Dynamics), 8.

[66](#) Zwischen Symmetrie und Struktur besteht hierbei der reziproke Zusammenhang, daß das Auftreten von Struktur einen zuvor stattfindenden Symmetriebruch, d.h. eine Bifurkation, voraussetzt.

Vgl. Davies (Chaos), 180f.

[67](#) Vgl. Peat (Chaos), 212.

[68](#) Langton (Life), 81.

[69](#) Vgl. Langton (Life), 85.

[70](#) Vgl. Langton (Life), 85. Phasenübergänge markieren einzigartige Grenzen zwischen zwei Bereichen des Seins. Das Gefrieren und Sieden von Wasser sind vertraute Beispiele von Phasenübergängen. Der Phasenraum, der diesen Übergang beschreibt, hat so viele Variablen, wie man braucht, um die Bewegungen des Systems zu beschreiben.

[71](#) Vgl. Laszlo (Denken), 9.

[72](#) Vgl. Laszlo (Vision), 30.

[73](#) Vgl. Jantsch (Selbstorganisation), 61, 64f.

[74](#) Im politischen Bereich haben die Amerikaner durch die Begrenzung der Amtszeit des Präsidenten auf zwei Legislaturperioden eine Regel geschaffen, die für eine permanente personelle Erneuerung sorgt. Leider gibt es diese Regel in Deutschland nicht, so daß endlose Kanzlerschaften die Folge sein können, die zunehmend die Innovationsfähigkeit des Landes hemmen.