

Evolutionäre Systemtheorie, Selbstorganisation und dynamische Systeme  
hg. mit Ursula Helm  
Stuttgart

Peter Weibel

## Der geometrische Geist (1996)

S. 161-176

Von den natürlichen über die formalen zu den maschinengenerierten symmetrischen und asymmetrischen Strukturen

Ars Sine Scientia Nihil  
Jean Vignot 1392

Durch die Methoden der modernen Mathematik ist deren „geometrischer Geist“ in die Welt des Lebens und der Kunst eingedrungen. Die Form und die Formänderung von Organismen wie auch ihre dynamischen Aspekte wurden so mit Hilfe von nicht-„mystischen“ Methoden erklärbar. Symmetrien spielen hierbei eine große Rolle. Freilich scheint es, als ob die Asymmetrie in bezug auf selbstorganisierende und dissipative Strukturen von größerer Bedeutung ist.

### Kurven des Lebens

Der quantifizierende Geist<sup>1</sup>, l'esprit de la géométrie, hat bereits im 18. Jahrhundert einen ersten Höhepunkt erreicht. Die Natur bzw. die Botanik wurde von Linné (in: Systema naturae, 1735) systematisiert und klassifiziert. Auch für die Chemie wurden ähnliche Methoden der Nomenklatur entwickelt (Lavoisier, Bergman). Die Mathematik wurde zur universalen Sprache der Natur, zur mathesis universalis (Leibniz, Wolff). Alle raumzeitlichen Phänomene sollten durch

mathematische oder geometrische Formeln dargestellt werden können: Das ist das Ziel des geometrischen Geistes. Im 18. Jahrhundert war man überzeugt, daß die Methoden der Naturwissenschaften auch auf alle anderen Gebiete des Wissens übertragen werden können und daß daher soziale Phänomene mit gleichen Mitteln der Quantifikation (Mathematik, Geome-

Prof. Peter Weibel, geb. 1945 in Odessa. Studierte 1963/64 Film an der Filmhochschule I.D.H.E.C. in Paris, Literatur und Philosophie an der Sorbonne. Danach Studien der Medizin, Mathematik und Philosophie an der Universität Wien. 1976 bis



1981 Lektor für Theorie der Form an der Hochschule für angewandte Kunst in Wien; seit 1979 Professuren in Kassel, Halifax (Kanada), Wien und Buffalo. 1989 bis 1994 Direktor des Städelschule-Instituts für Neue Medien in Frankfurt; seit 1993 Kurator der Neuen Galerie am Landesmuseum Joanneum Graz, Kommissär des Österreichischen Pavillons der Biennale von Venedig. Seit 1975 zahlreiche Einzelausstellungen. Zahlreiche Veröffentlichungen.

Prof. Peter Weibel, Institut für Neue Medien, Daimlerstraße 32, 60314 Frankfurt am Main

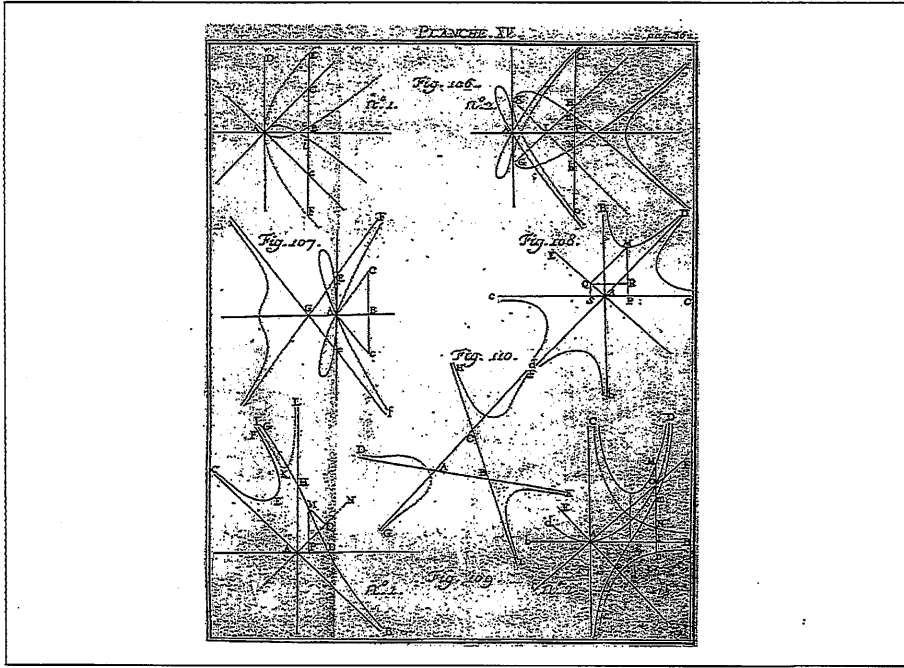


Abb. 1: Kurven, klassifiziert von Gabriel Cramer in: „Introduction à l'analyse des lignes courbes algébriques“ (1750).

trie, Statistik) erfaßt werden können. Ob die Reproduktion von Pflanzen, das Wachstum von Bäumen oder der Bevölkerung (Malthus) oder der ökonomischen Systeme (Smith) – alles wurde quantifiziert, systematisiert, klassifiziert.

Im 19. Jahrhundert hat dieser „geometrische Geist“ auch den Körper des Menschen erfaßt. Unter dem Druck der industriellen Revolution und der von ihr beschleunigten Entwicklung von Maschinen wurde auch der menschliche Körper immer mehr mit Hilfe neuester Maschinen gemessen und untersucht. Die maschineninduzierte experimentelle Physiologie entstand, die immer bessere quantifizierbare Resultate der Aktivitäten der

menschlichen Organe und des Stoffwechsels produzierte.<sup>2</sup>

Ernst Haeckels „Generelle Morphologie“ (1866) und Charles Darwins „Die Abstammung des Menschen und die geschlechtliche Auslese“ (1871) bildeten den allgemeinen naturwissenschaftlichen Hintergrund für jede Formalisierung des Wachstums und der Evolution.

Nach 1900 erschienen mehrere Werke, die den „geometrischen Geist“ spezifisch auf das Wachstum von Formen lebender Organismen anwendeten. Theodore Andrea Cook publizierte 1903 „Spirals in Nature and Art“ und 1914 „The Curves of Life“, ein Werk, das ganz der Spirale („the most beautiful of curves“ – A. R. Wal-

lace) und ihrem geschichtsmächtigen Wirken in der Biologie, Botanik, Kosmologie, Architektur und visuellen Kunst gewidmet war.<sup>3</sup> Die endlose Kurve der Spirale vermittelte den Eindruck kontinuierlicher Bewegung. Die Spirale oder die Helix ist ein Phänomen, das so oft in allen Formen des Wachstums, bei Pflanzen, bei Tieren, beim menschlichen Körper, vom Andromeda-Nebel bis zur DNA (Doppel Helix) beobachtet wurde, daß die Vermutung nahe liegt, sie läge als Formel  $\left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1.168\right)$  allem Wachstum

und damit allen Formen des Lebens zugrunde. Insbesondere die logarithmische Spirale („Spira mirabilis“ nannte sie Bernoulli 1691) wird als Manifestation jener Energie betrachtet, die beim Wachstum organischer Körper arbeitet. Cook ist sich allerdings klar, daß der Geometrisierung des Lebens („to define a natural object in mathematical terms“) Grenzen gesetzt sind und ebenso dem organischen Aspekt der logarithmischen Spirale („a logarithmic spiral is as near as we can get in mathematics to an accurate definition of the living thing“).<sup>4</sup>

In der Geschichte der Kunst sind allerdings in der Tat Spiralförmigkeiten, besonders wegen ihres Aspektes der Symmetriebrechung und der Chiralität (Links- oder Rechts-Händigkeit), gerne als „Kurven des Lebens“ zur Darstellung des Lebens benützt worden.

### Das gnomonische Wachstum

Die logarithmische Spirale und ihre Eigenschaft des gnomonischen Wachstums hat auch D'Arcy Thomp-

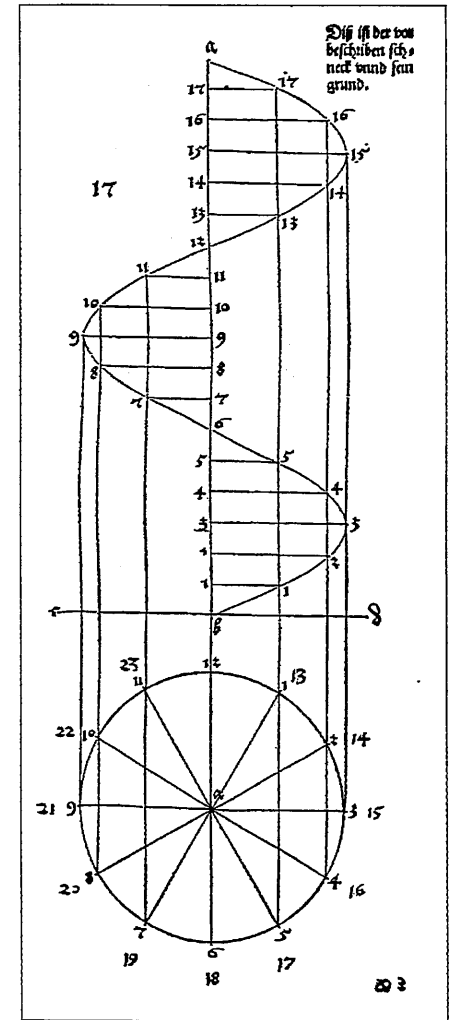


Abb. 2: Dürers Entwurf einer Wendeltreppe, die eine zylindrische Helix darstellt (nach Cook<sup>2</sup>).

son bei seinem Studium des Wachstums lebender Organismen fasziniert. In seinem Buch „On Growth and Form“ (1914) hat er der „gleichwinkligen Spirale“, wie Descartes und Roger Cotes die logarithmische Spirale

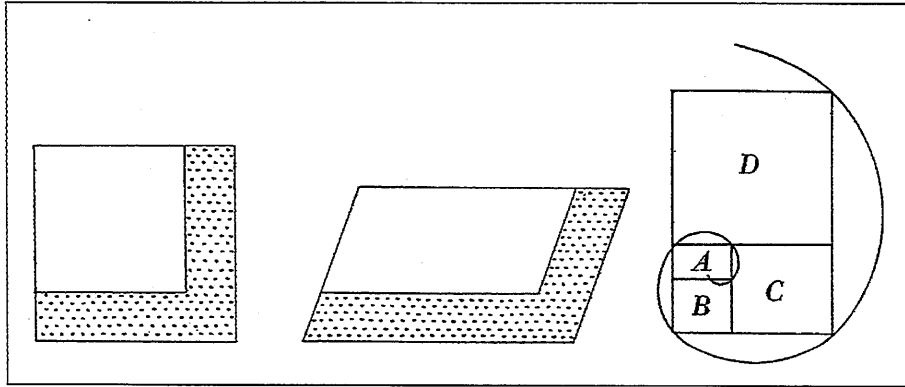


Abb. 3 und 4: Gnomonische Figuren.

nannten, ein eigenes Kapitel gewidmet. Was ihn bei der Spirale als Wachstumsform interessierte, war, daß das spiraloge Gehäuse, wie auch das darin enthaltene Lebewesen, an Größe zunimmt, aber seine Form nicht verändert:

Die Existenz dieses konstanten Wachstumsverhältnisses oder dieser konstanten Formähnlichkeit ist das Wesentliche bei der gleichwinkligen Spirale.<sup>5</sup>

Darauf hatte schon Christian Wiener in den „Grundzügen der Weltordnung“ (1863) hingewiesen.

Jeder Zuwachs gleicht seinem Vorgänger. Das Wachstum geschieht durch symmetrische Ausdehnung und so bleibt seine Form unverändert bewahrt. Diese Eigenschaft kontinuierlicher Ähnlichkeit gibt es unter allen Kurven nur bei der gleichwinkligen bzw. logarithmischen Spirale. Daraus entsteht die gnomonische Eigenschaft der Spirale, nämlich beim Wachstum außer der Größe keine Veränderung zu erleiden: Forminvarianz bei Skalierungsvarianz, vergleichbar den Fraktalen. Ein Gnomon ist eine Figur, die, wenn sie zu irgendeiner anderen Figur

hinzugefügt wird, eine dem Original ähnliche Figur entstehen läßt. Symmetrisches Wachstum ist also gnomonisch, das heißt,

daß jeder folgende Zuwachs seinem Vorgänger ähnlich ist, und zwar ähnlich sowohl in Bezug auf die Vergrößerung wie auf die Anordnung.<sup>6</sup>

Doch Thompson warnte vor der „mystischen Vorstellung“, die Spirale selbst als Manifestation des Lebens zu sehen, da sie ja aus lebloser Substanz geformt wird. Thompson beharrte darauf, daß die Formen und Formveränderungen von Organismen, die durch Bewegung und Wachstum in Erscheinung treten, mit Hilfe physikalischer Methoden und Überlegungen, die mit mathematischen Gesetzen übereinstimmen müssen, erklärt werden können. Der Zustand und die Form eines Organismus wie auch die Veränderung dieses Zustandes bzw. der Form sind das Resultat einer Anzahl von Kräften und Energien:

Die Morphologie ist nicht nur ein Studium materieller Dinge und der Form der materiellen Dinge, sondern besitzt auch die dynamischen Aspekte, in deren Rahmen wir uns mit Hilfe von Kräftebegriffen mit der Deutung von Energievorgängen befassen.<sup>7</sup>

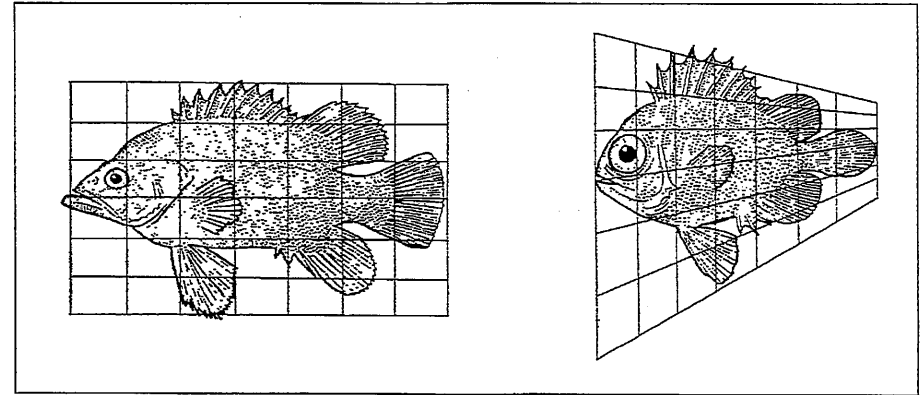


Abb. 5: Links: Polyprion, rechts: Pseudopriacantus altus.

Die Vorstellung einer dynamischen Symmetrie, die auf den Gesetzen der Thermodynamik aufgebaut ist, war also schon vorhanden (siehe auch Jay Hambridges „Dynamic Symmetry“ von 1920). Für die Entwicklung, das Wachstum und die Veränderung von Formen führte Thompson selbst mathematische Modelle ein, die berühmten cartesischen Transformationen. Unter den Fischen entdecken wir eine große Mannigfaltigkeit von solchen Deformationen.

### Thermodynamisch definierte Symmetrie

Die mathematischen Aspekte und dynamischen Prinzipien der Morphologie, auf die Thompson hingewiesen hatte, verfolgte auch Matila Ghyka in „The Geometry of Art und Life“ (1946). Auch hier spielt die logarithmische Spirale eine Rolle. Ghyka verweist besonders auf die pentagonale Symmetrie als spezifisch für die vektorialen Pulsationen des Wachstums von lebenden Organismen. Er beruft

sich dabei auf F. M. Jaegers „Lectures on the principle of symmetry and its applications in natural science“ (1917).

Aber diese Positionen, die Spiralen als Geometrie des Lebens selbst zu betrachten, sind schon von Thompson als „mystisch“ widerlegt worden. Ghykas Verdienst ist es hingegen, thermodynamische Prinzipien zur Definition der Formen eingeführt zu haben.

The most general principle governing the states of equilibrium of physico-chemical systems is the „Criterion of Dirichlet“: in order that the equilibrium of a closed system should be stable it is sufficient that its potential energy should be (or should pass through) a minimum.<sup>8</sup>

Die stabilen Konfigurationen, Konstellationen, Muster physikochemischer Systeme definierte er als Spezialfall des allgemeinsten für leblose Körper geltenden Prinzips, des Principle of Least Action oder: Principle of Hamilton:

A system (even a Universe) passes constantly from its least probable to its most probable states, the configuration of maximum probability being at the same time that of the maximum entropy, of the greatest „degradation“ of energy

(passing from high-tension to low-tension, low-grade energy, to diffused warmth). When the state of final equilibrium produces relatively stable or even rigid arrangements of molecules, as in crystals, we generally obtain geometrical patterns and lattices, resulting from more special aspects of the general principle.<sup>9</sup>

Überlegungen von Ilya Prigogine zu „konservativen“ und „dissipativen“ Prinzipien bzw. Strukturen werden hiermit antizipiert, ebenso Überlegungen von René Thom zur strukturellen Stabilität.

The directed, asymmetric, „pulsating“ forces manifested in growing living organisms act, or can act, quite differently from the physico-chemical reactions obeying the „Principle of Least Action“, so that the „Geometry of Life“ will introduce shapes and volumes not met with in rigorously inorganic systems.<sup>10</sup>

Alfred J. Lotka hat schon 1922 auf die Bedeutung der Energieproblematik für gestaltbildende Reaktionen hingewiesen (The Energetics of Evolution, Proc. Natl. Acad. Scie.).

### Spatiotemporale Dynamik und strukturelle Stabilität

Im Vergleich zu Thompsons etwas naiven geometrischen Transformationen, deren mathematische Theorie Teil der Gruppentheorie ist, ist Andreas Speisers Buch zur Symmetrie „Theorie der Gruppen von endlicher Ordnung“ (1937) besonders bemerkenswert. In „Symmetry“ (1952) hat Hermann Weyl einen allgemeinen mathematischen Symmetriebegriff (Invarianz gegenüber einer Gruppe automorpher Transformationen) geliefert. Doch die wahren Erben von D'Arcy Thompson sind Benoit B. Mandelbrot und René Thom.

Die Differential-Topologie von René Thom hat unter dem Begriff

„Katastrophentheorie“ die komplexesten mathematischen Modelle der Morphogenese,<sup>11</sup> der Gestaltbildung, des Ursprungs und der Evolution biologischer Strukturen hervorgebracht. Henri Poincaré schuf 1881 die Theorie der qualitativen Dynamik. 1935 führten Andronov und Pontrjagin den Begriff des strukturell stabilen dynamischen Systems ein.

The dynamical system  $(M, X)$  is said to be structurally stable if, for a sufficient small perturbation  $\delta X$  of the vector field  $X$ , the perturbed system  $(M, X + \delta X)$  is, roughly speaking, topologically isomorphic to the unperturbed system.<sup>12</sup>

Thom schuf aus der Differentialtopologie und der Theorie der qualitativen Dynamik seine Theorie der strukturellen Stabilität, um das Problem der Stabilität selbstreproduzierender Strukturen zu lösen.<sup>13</sup> Lokale morphologische oder physiologische Phänomene innerhalb lebender Organismen werden nicht nur als lokale biochemische Determinismen behandelt, sondern auch als Reproduktion der globalen spatiotemporalen Struktur in Ausdrücken der Organisation der Struktur selbst. Die Symmetrie präsentiert also eine gewisse Stabilität. Die Destruktion eines strukturell stabilen Attraktors durch die Variation des Vektorfeldes, wenn also der Attraktor durch die Variation des dynamischen Systems zusammenbricht, ergibt eine Bifurkation (Gabelung) oder eine Katastrophe. Den morphologischen Effekt einer Änderung in einem lokalen Regime nennt Thom Katastrophe.

Thoms Postulat ist nun,

that any morphology can be attributed to such a bifurcation phenomenon whatever may be the nature of the ambient medium and the physical nature of the forces acting in the local dynamic.<sup>14</sup>

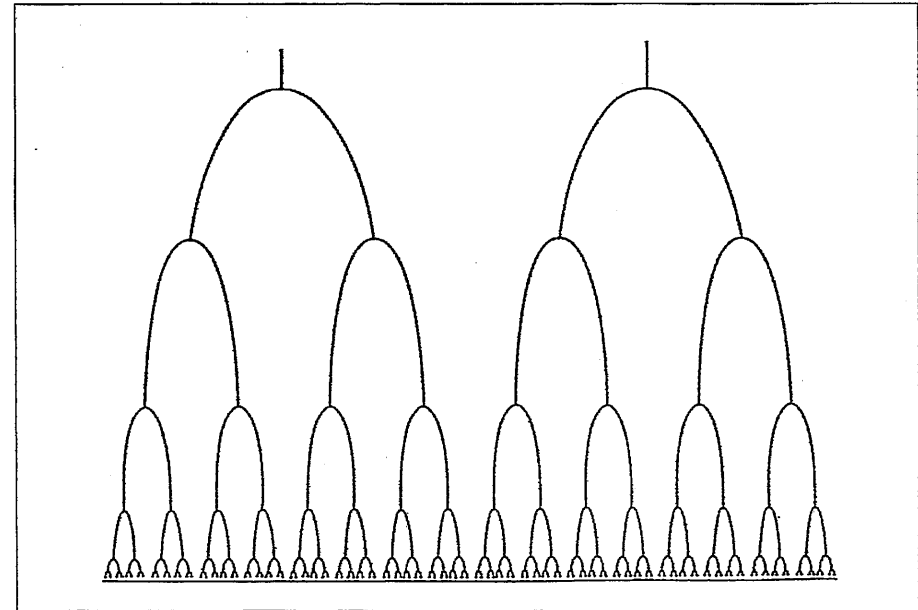


Abb. 6: Allgemeines Schema einer Katastrophe nach Thom.

Daraus folgert er, daß Bifurkation und Katastrophe sogar in einer strukturell stabilen Weise gemäß einem algebraischen Modell auftreten können. Formen, Gestalten werden zu geometrischen Situationen, wohl definiert in dynamischen Systemen, und deren Wachstum bzw. Morphogenese muß als spatiotemporaler Kampf zwischen mehreren Attraktoren gesehen werden. Symmetrie ist nur ein Spezialfall dieser dynamischen Konzeption des Kampfes von Attraktoren. Die spatiotemporale Dynamik des Systems eignet sich zwischen struktureller Stabilität (Symmetrie) und Katastrophe (Symmetriebrechung).

### Fraktales Wachstum: Symmetrie und Selbstsimilarität

Benoit Mandelbrots Untersuchungen zur „fraktalen Geometrie der Natur“,<sup>16</sup> die aus seinem Essay „Les objets fractals: forme, hasard et dimension“ (1975) hervorgingen, haben ebenfalls zum Ziel, Irregularitäten und Singularitäten der Formbildung mathematisch zu beschreiben. Die „mathematischen Monster“ (Cantor: „Staub“, Sierpinski: „Teppich“), die er Fraktale nannte, bilden einen Teil jener Geometrie des Wachstums, der Formen in der Natur (Wolken, Berge, Wälder, Küsten), die besonders irregulär scheinen, doch in der Tat symmetrieähnlichen Gestaltprozessen unterliegen. Zum Beispiel könnte wegen der Identität der Irregularität in allen Skalierungen die fraktale Iteration des

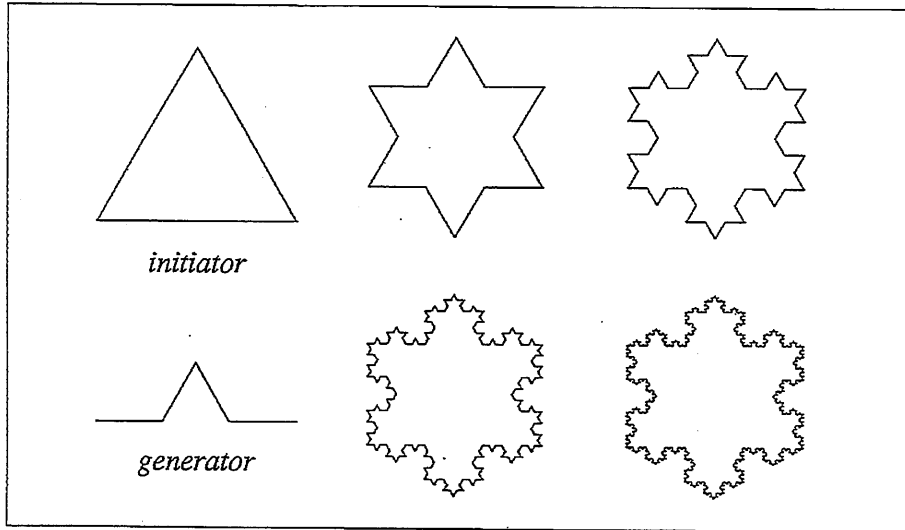


Abb. 7: Schneeflockenkurve nach Koch.

Sierpinski-Teppichs (bzw. Gaskets) mit dem gnomonischen Wachstum der logarithmischen Spirale verglichen werden.

Fraktale Objekte entstehen durch sukzessive Einsetzungs- und Ersetzungsprozesse bzw. Umformungsregeln. In einen Initiator wird ein Generator eingesetzt, zum Beispiel in eine gerade Linie eine gebrochene Linie, wobei in die verbleibende gerade Linie der neuen Form wieder gebrochene Linien eingesetzt werden, also rekursiv vorgegangen wird. So entsteht eine weitere „Kurve des Lebens“, die Schneeflockenkurve, 1905 von Koch vorgeschlagen.

Mit fraktalen Objekten erreicht der esprit de la géométrie eine neue Nähe zur Wirklichkeit der Natur, zum Beispiel zu den Pflanzen. Bäume und Pflanzen sind wegen ihrer rekursiven Verzweigungsstruktur bzw. wegen ihrer Bifurkation zum Teil als Fraktale darstellbar. Die fraktale Iteration, die

rekursive Ersetzung gleicher Objekte, führt zu einer Struktur, wo alle Teile einer Gestalt eine geometrische Ähnlichkeit zum Ganzen haben. Diese Selbstsimilarität als Struktur zwischen den Teilen und dem Ganzen ist eine relevante Eigenschaft, wenn auch abstrahiert, von Pflanzen.

Fraktale können als vereinfachte abstrahierte Repräsentationen von realen Pflanzen betrachtet werden, wobei die rekursiven Entwicklungsmechanismen nicht mehr Symmetrie oder Spirale sind, sondern Selbstsimilarität und Entwicklungsalgorithmen. Symmetrie wird als Invarianz einer Konfiguration von Elementen gegenüber einer Gruppe von automorphen Transformationen definiert, welche Transformationen Kongruenzen sind, die durch Rotation, Reflexion und Translation erreicht werden. Könnte daher Selbstsimilarität als Spezialfall der Symmetrie unter Skalierungsoperationen betrachtet werden? Nein,

aber wenn auch Selbstsimilarität schwächer ist als Symmetrie, wird Selbstsimilarität dennoch ein Paradigma für Struktur in der natürlichen Welt, besonders in der Botanik.

### Genetische Algorithmen

Das rekursive Ersetzen eines Teils des Ausgangsobjektes durch (selbst)ähnliche Elemente kann auch als Umschreib- bzw. Umformungsprogramm definiert werden. Die fraktale Kurve einer Schneeflocke ist das Ergebnis einer Umschreibregel, wo rekursiv offene Polygone ersetzt werden. John Conways populäres „game of life“ von 1970 ist ein Umschreibemechanismus, der sich auf Felder bezieht.

Der norwegische Mathematiker Axel Thue hat 1914 mit seiner Arbeit „Probleme über Veränderungen von Zeichenreihen nach gegebenen Regeln“ das erste Umformungs- bzw. Umschreibe-Programm geliefert, das über Buchstaben-Ketten operiert. Sein Problem war: Wie kann ich wissen, ob aus einem endlichen Alphabet X (zum Beispiel A, B, C, D, E, F) mit einigen Umformungsregeln der Gestalt  $u \rightarrow v$  (zum Beispiel  $ABA \rightarrow CA$ ,  $DA \rightarrow D$ ) eine gegebene Zeichenkette ableitbar ist (ist  $ABADAEB C$  in  $CCA$  überführbar)?

Emil Post hat 1947 die „rekursive Unlösbarkeit“ des Thue-Wortproblems bewiesen, das heißt daß es kein allgemeines Verfahren zur Lösung gibt. Die Semi-Thue-Systeme erwiesen sich aber in den fünfziger Jahren als Modelle zur Beschreibung formaler syntaktischer Strukturen natürlicher Sprache sehr brauchbar. Backus und Naur verwendeten eine auf Umformung basierte Notation, um eine formale Definition der Programmier-

sprache ALGOL-60 zu besorgen. Umformungsprogramme, Umschreibesysteme von Zeichenketten waren also gleichsam linguistische Wachstumsprogramme.

1968 führte der Biologe Aristid Lindenmayer neue Zeichenketten-Umschreibemechanismen ein, die später sogenannten L-Systeme, wo alle Buchstaben eines Wortes parallel und simultan, nicht sequentiell wie bei Chomsky, ersetzt werden. Die einfachste Klasse der L-Systeme sind die deterministischen kontextfreien L-Systeme, DOL-Systeme genannt. Wenn wir eine Zeichenkette aus den Buchstaben a und b haben und die Umformungsregeln  $a \rightarrow ab$  und  $b \rightarrow a$  und das Axiom b gegeben sind, dann erhalten wir am Ende der Entwicklung die in Abbildung 8 wiedergegebene Sequenz.

Dieser Formalismus kann benutzt werden, um die Entwicklung von Zellen zu simulieren. Die komplexen

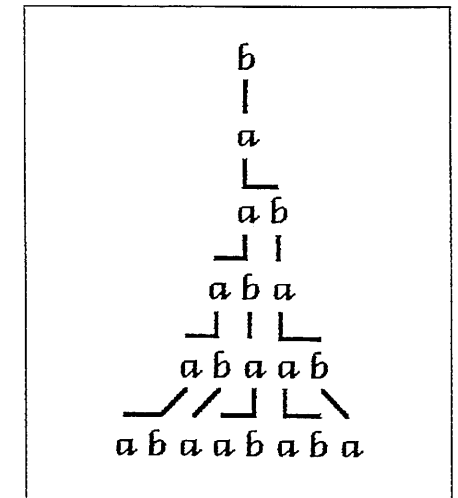


Abb. 8: Beispiel einer Ableitung in ein DOL-System.

Formalismen der L-Systeme werden zum mathematischen Instrument, Wachstumsprozesse zu simulieren.

Przemslaw Prusinkiewicz und Aristid Lindenmayer haben die „algorithmische Schönheit der Pflanzen“<sup>17</sup> gezeigt. Die Sprache der Mathematik beschreibt besser denn je die Entwicklung von Pflanzen. Mit Hilfe der auf den L-Systemen aufgebauten genetischen Algorithmen können Pflanzen im Computer perfekt simuliert werden. Geometrische Eigenschaften von Pflanzen wie bilaterale Symmetrie der Blätter, Rotationssymmetrie der Blumen etc. werden durch die Eigenschaft der Selbstsimilarität (eine schwächere Symmetrie) ergänzt. Selbstähnlichkeit entsteht dort, wo ein Teil einer Form geometrisch ähnlich dem Ganzen der Form ist. Selbstsimilarität verbindet daher Pflanzenstrukturen mit fraktaler Geometrie. Selbstsimilarität in Pflanzen ist das Ergebnis von Entwicklungsprozessen, welche „die Form eines Organismus zu einem Ereignis in Raum und Zeit“ (Thompson) machen. Diese Entwicklungsalgorithmen werden vom Formalismus der L-Systeme erfaßt, die ein Teil der Theorie der formalen Sprache sind.

Die digitale Natur, das Ziel des „geometrischen Geistes“, ist mit der Katastrophentheorie, der Fraktalgeometrie und den L-Systemen näher gerückt. Die Sprache der Natur wird in der Tat zu einer Sprache, zu einer formalen Sprache. Symmetrie, Selbstsimilarität, Fraktale etc. werden zu Elementen einer solchen formalen Sprache, die dem Verständnis dynamischer Prozesse des Wachstums und der Selbstorganisation dient.

## Rückkoppelung und Selbstorganisation

Der Rückkoppelungsbegriff ist durch Norbert Wiens Buch „Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine“ (1948) populär geworden:

Feedback is a method of controlling a system by reinserting into it the results of its past performance.<sup>18</sup>

Rückkoppelung (feedback) ist als Regelungstechnik Bestandteil eines Kontrollsystems. Der Zweck eines automatischen Feedbacksystems ist, trotz externer Turbulenzen eine vorgeschriebene Relation zwischen einer Systemvariablen zur anderen einzuhalten. Dies wird erreicht, indem die befohlene und die kontrollierte Variable verglichen werden und die Differenz als Mittel der Kontrolle gebraucht wird. Das Rückkopplungssignal (die kontrollierte Variable) wird von außerhalb des Systems zurück in das Innere des Systems gespeist. Dadurch entsteht ein „closed loop“, eine geschlossene Schleife. Das System als geschlossene Schleife muß mit negativem Feedback operieren, um die eventuelle Abweichung vom Anfangssignal zu korrigieren. Das System braucht daher einen Sensor als physikalisches Element des Vergleichs. Der „centrifugal governor“ in der Dampfmaschine von Boulton und Watt (1798) ist das erste berühmte Beispiel für ein feedback control system.

Dadurch wurde feedback control zu einem Symptom der industriellen Revolution. Aber natürlich reicht die Idee der automatischen Kontrolle durch Rückkoppelung viel weiter zurück.<sup>19</sup> Für unsere Ausführungen ist die Verwandtschaft der Rückkoppe-

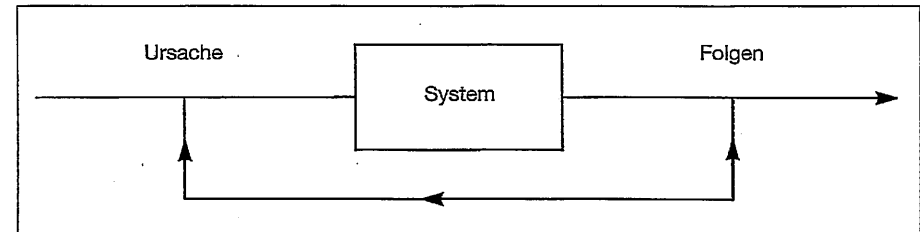


Abb. 9: Rückkopplung

lung wegen des Wiedereintritts einer Größe in das System (das re-entry einer beobachteten Größe in das Beobachtungssystem) mit Verfahren der Selbstsimilarität und der fraktalen Geometrie interessant. Der closed feedback loop ist eine Art maschinelle rekursive Ersetzungsregel, ein Umformungs- bzw. Umschreibeprogramm.

Die Rückkopplung steht in Verbindung mit dem Prinzip der Nichtlinearität. Nichtlineare Effekte sind häufig Resultate von Rückkopplungen der Folgen auf die Ursache (vgl. Abbildung 9).

Dadurch werden kleinste Abweichungen verstärkt. Geringe Abweichungen von den Anfangsbedingungen werden mit fortschreitender Dauer verstärkt, dadurch entsteht eine Art Richtung, eine Kanalisation. Das Verstärkungsprinzip schafft neue Strukturen (beim Überschreiten kritischer Werte). Besonders reichhaltig ist die Skala der Nichtlinearitäten bei chemischen Reaktionen und bei hydrodynamischen Prozessen. Die graphische Darstellung dieser Formen nichtlinearer Gleichungen, welche die Ableitungen von Größen mit Größen selber verknüpfen, würden die bekannten „gekrümmten Kurven“ (des Lebens) ergeben. Aus der nichtlinearen Dynamik des Systems, die in der

Regel durch Rückkopplungseffekte bedingt ist, entsteht Selbstorganisation.

Die durch die Selbstorganisation hervorgegangenen Strukturen entstehen in der Regel durch Brechung einer Symmetrie. Hydrodynamische Instabilitäten und die Instabilitäten chemisch reagierender Systeme führen zu selbsterregten Schwingungen, Wellen und räumlich-zeitlichen Strukturen. Selbstorganisation erfordert Gleichgewichtsferne, das heißt Überschreitung einer kritischen Distanz vom thermodynamischen Gleichgewicht. Chaotische Bewegungen sind besondere Formen der Selbstorganisation. Auch diese fraktalen Formen des Chaos sind strukturiert.

Der Mathematiker Alan Turing hat bereits 1952 die Wichtigkeit autokatalytischer (selbsterregender) Reaktionsmechanismen für die Morphogenese erkannt. Die von Turing vorausgesagte selbstorganisierte Strukturbildung wurde Ende der sechziger Jahre vom Modell der dissipativen Strukturen Ilya Prigogines unterstützt. Doch erst ab 1990 konnte experimentell die Existenz von Turingmustern in der Chlorid-Jod-Malonsäure(CIMA)-Reaktion nachgewiesen werden.

Dissipative Strukturen sind räumlich, zeitlich oder raumzeitlich organisierte Muster, die durch Diskonti-

nität vom thermodynamischen Gleichgewicht getrennt sind, zum Beispiel die Konzentrationsmuster bei der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion, bei Wirbeln, bei Zyklonen. Die Dissipativen Strukturen sind Strukturen, die eine ständige Energiedissipation unterhalten.

Selbstorganisation ist also nur möglich, wenn das System Entropie exportieren kann, das heißt höherwertige Energie einführt und geringerwertige Energie ausführt. Diese Energieumwandlungen schaffen die temporären Strukturen. So entstehen „Inseln der Ordnung“ auch im Chaos, zum Beispiel symmetrische Fraktale.

Es scheint so, daß die zwei fundamentalen Prinzipien der Morphogenese, das konservative und dissipative Prinzip, den Übergang vom statischen zum dynamischen Symmetriebegriff definieren können. Die statische Symmetrie ist ein Ordnungsgefüge, das ohne Dissipation von Energie aufrecht erhalten wird. Dadurch entstehen stabile räumliche Lagen. Evolutionäre Symmetrie ist ein dynamischer Ordnungszustand, der durch eine ständige Energiedissipation unterhalten wird und von den Randbedingungen des Systems entscheidend beeinflusst wird. Das Gegenstück von Symmetrie (im statischen Sinn) ist also Selbstorganisation. Autokatalyse, Selbstorganisation, dissipative Strukturen, chaotische Attraktoren lösen den historischen Symmetriebegriff ab und werden zu den Grundprinzipien einer dynamischen evolutionären Symmetrietheorie.

### Maschinenproduzierte Spiralen und andere „Kurven des Lebens“

In populärwissenschaftlichen Büchern der Zeit um 1900 waren Spiralen und spiralenähnliche Kurven als „amüsante Wissenschaft“ (1890) weit verbreitet. Der Aufstieg der experimentellen Physiologie und das seit der impressionistischen Malerei enorm verbreitete Interesse für optische Phänomene (wie Licht- und Farbzerlegung), zusammen mit den Forschungsergebnissen von Muybridge und Marey zur maschinellen Erzeugung der Illusion von Bewegung, die unmittelbar zur technischen Erfindung des Films führten und die unter anderem zur Entwicklung von Kubismus und Futurismus beigetragen haben, haben in der Avantgardekunst zu Beginn des 20. Jahrhunderts ein Bewusstsein zur Maschine und eine enorme Beschäftigung mit maschineninduzierten und -produzierten optischen Illusionen hervorgebracht. Maschinengesteuerte Simulationen der „Kurven des Lebens“ und der Formen des Wachstums, wie zum Beispiel die Spirale, hatten Saison.

Die von optischen Präzisionsinstrumenten und anderen Maschinen produzierten Spiralen, Pseudospiralen, Symmetrien, Pseudosymmetrien verweisen den Anspruch, Spiralen etc. seien Kurven des Lebens, wie schon erwähnt, als naive „mystische“ Vorstellungen aus. Die epistemologische Frage, ob Symmetrie eine Eigenschaft des Beobachters ist, also ein anthropomorphes Prinzip ist, oder eine Eigenschaft der beobachteten natürlichen Welt, ob Symmetrie bzw. Symmetriebrechung zum Bauplan der Natur oder zum Bauplan des Beobach-

ters gehört, wird dadurch auf neue Weise berührt.

Es war wiederum Poincaré, der auf die Symmetrie der physikalischen Gesetze selbst hingewiesen hat, das heißt nicht auf die Symmetrie der in der Natur vorhandenen Dinge, sondern auf die den physikalischen Gesetzen eigene Symmetrie, das heißt auf die Symmetrie der Formalismen, mit der wir die natürlichen Dinge abbilden. Das Problem zwischen natürlicher und formaler Symmetrie, Symmetrie als Eigenschaft der beobachteten Dinge oder als Eigenschaft des Beobachtungssystems, wird durch die maschinengenerierten Symmetrien und Symmetriebrechungen verschärft gestellt. Klassischerweise wird mit der Sonnenhaftigkeit des Auges bzw. mit dem Huf als bestes Abbild der Steppe geantwortet, also mit einem evolutionären Modell der Kovarianz.

Maschinen, die Symmetrie produzieren, verstärken als physikalische Implementationen bzw. Realisationen von Formalismen den formalistischen Standpunkt zur Symmetrie. Wenn Maschinen nicht nur symmetrisch gebaut sind, sondern selbst Symmetrien produzieren, dann verstärken sie das Argument, daß Symmetrie eine Eigenschaft der Beobachtungs- und Modellierungsformalismen ist, mit der wir die Welt abbilden und konstruieren. Maschinenproduzierte Symmetrien sind offensichtlich keine Kurven oder Abbildungen des Lebens mehr. Sie sind Elemente einer hochkomplexen Geometrie, aber nicht einer Geometrie des Lebens. Symmetrien als Maschinenprodukte und -eigenschaften stellen die Frage, wie weit Symmetrie, Selbstähnlichkeit, Fraktale etc. relevante Eigenschaften von lebenden Organismen sind.

Die Entdeckung der Chiralität, der Links- und Rechtshändigkeit der Moleküle, 1860 durch den Bakteriologen Louis Pasteur, ist durch die Paritätsverletzung, die Brechung der Spiegelsymmetrie, durch die Physiker Tsung-Dao Lee und Chen Ning Yang 1956 bestätigt worden. Das organische Leben wurde seit Pasteur als dissymmetrisch definiert. Molekulare Asymmetrie unterscheidet künstliche Stoffe von unter dem Einfluß des Lebens stehenden Produkten. Physik und Chemie können nicht zwischen rechts- und linksdrehenden Molekülen unterscheiden, sondern nur beide Arten herstellen. Die Biologie dagegen vermag es. Aber als das Prinzip der Rechts- und Links-Symmetrie, also daß für die Natur Rechts und Links ein und dasselbe ist, aufgegeben wurde, und auch in der Welt der Elementarteilchen eine Verletzung der Spiegelsymmetrie festgestellt wurde, entstand zwischen Physik und Biologie eine neue Beziehung. Seitdem ist die Dissymmetrie bzw. Asymmetrie nicht mehr exklusiv eine Eigenschaft des Lebens, der organischen Materie. Wenn sich noch herausstellt, daß auch Maschinen asymmetrische Strukturen generieren können, dann fällt Pasteurs Unterscheidung zwischen künstlichen und natürlichen Stoffen mit Hilfe der Dissymmetrie.

### Maschinengenerierte Symmetrien, Fraktale und dissipative Strukturen

Die Chaostheorie untersucht das Verhalten komplexer, rückgekoppelter Systeme. Durch rekursive und rückgekoppelte Prozesse entsteht eine große Formen- und Strukturen-Viel-

falt. Katastrophe, Bifurkation, Chaos, Fraktale, dissipative Strukturen und Selbstorganisation sind also neue Begriffe, die für die Evolutionstheorie interessant und relevant sind, und als solche den Platz der Symmetrie einnehmen. John Holland hat dazu 1975 einen lesenswerten Aufsatz veröffentlicht: „Adaptation in Natural und Artificial Systems“. Holland hat in den sechziger Jahren die genetischen Algorithmen entwickelt, um die Evolution computergestützt simulieren zu können. Aber für Chaos, Fraktale, Selbstorganisation etc. gilt wie für Spiralen und Symmetrien die Frage, wie weit sind sie ausschließlich Strukturmerkmale des Lebens und von Lebewesen. Ein Fraktal zum Beispiel kann auch durch eine Videokamera und zwei Monitore produziert werden.

Eine Kamera nehme zwei Monitore auf. Dann gibt es auf jedem Bildschirm zwei Monitore zu sehen; in diesen zwei abgebildeten Monitoren gibt es jeweils wieder zwei kleine Monitore, die wieder je zwei Monitore abbilden, ad infinitum, also insgesamt schon 2 mal 14 abgebildete Monitore; die Grenze ist die Cantor-Menge. Hier handelt es sich also um eine Rückkopplung, um ein Feedback System, um eine closed circuit-Installation. Solche Installationen waren in den siebziger Jahren in der Videokunst sehr beliebt, eine aufregende Entdeckung. Es gab damals geradezu psychedelische akustische und visuelle Feedbackekstasen, die komplexe fraktale, symmetrische, chaotische Muster erzeugten.

Der Autor selbst hat ab 1969 mit Feedback, closed loops, mit Rückkopplungen (auch in der Musik) und closed circuits intensiv gearbeitet. Da-

bei zog er auch die Möglichkeit in Betracht, die Kamera oder den Monitor diagonal zu neigen bzw. vertikal zu stellen, so daß komplexe symmetrische und symmetrieähnliche Muster erzeugt wurden, Interferenzmuster ähnlich den Turingmustern. Ebenso konnte die Kamera auf positiv oder negativ umgestellt werden, so daß in der Selbstabbildung des Monitors der ursprünglich helle Bildschirm in der verkehrten Abbildung schwarz wurde, dieser wiederum bei der nächsten Stufe der Rückkopplung bzw. Verkleinerung weiß wurde, etc.

1984 hat James P. Crutchfield den definitiven Artikel dazu geschrieben: „Space-Time Dynamics in Video feedback“.<sup>21</sup> Video-Feedback entsteht, wenn die Videokamera auf ihren eigenen Monitor schaut und die Information wie beim closed loop wieder eintritt in das System, ad libitum. Zur Steuerung der Rückkopplung gibt es einige Parameter wie Luminanz, Neigungswinkel etc., aber vor allem die Überlagerung der Rasterlinien von Monitor und Kamera.

Die fraktale Geometrie von Zeitserien, die Gleichgewichtsbilder mit spatialer Symmetrie analog zu Turing-Wellen, unter Perturbation stabile Bilder, logarithmische Spiralen etc. können durch Video-Rückkopplungen erzeugt werden; ebenso können die Dynamik der zellulären Automaten, aber auch nichtlokaler Automaten, Probleme dynamischer Systemtheorie, iterativer Bildformierung und biologischer Morphogenese simuliert werden. Video- und computergenerierte, also maschinenproduzierte Symmetrien und Fraktale, selbstorganisierende und chaotische Systeme bezeugen die Geburt der Schönheit aus der Maschine, nicht aus dem Leben oder

aus der Natur. Symmetrie als Schönheit zu empfinden hat daher mit Vorgängen in unserem Gehirn und nicht in der Natur zu tun. Symmetrie ist nicht länger Schönheit der Natur, sondern des menschlichen Bewußtseins.

Die maschinengemachten Formen (der Videorückkopplung und closed circuit-Video-Installationen der sechziger und siebziger Jahre) wurden zur Zeit ihres Entstehens als Geburt der Schönheit, als Geburt der Symmetrie aus dem Geist der Technik empfunden und gefeiert. Die abstrakten Muster und synthetischen Bilder, allein aus der Maschine erzeugt, sollten ja möglichst weit weg von den Bildern sein, die entstehen, wenn die Maschine die Natur abbildet. Die maschinenproduzierten Muster sollten auf technische Weise die Effekte von künstlichen synthetischen Drogen im Gehirn simulieren. Bewußtseinsweiternde psychedelische Drogen und die psychedelischen Muster, produziert von Maschinen, korrespondierten.

Rückkopplung, wie schon Wiener betonte, gibt es bei Lebewesen und Maschinen. Rückkopplung ist sogar ein Symptom der Maschinen der industriellen Revolution.

Like all notions taken from human technology, the notion of feedback cannot properly be invoked to explain stability of biological processes,

warnet auch René Thom.<sup>22</sup> Rückkopplung ist also zur Beschreibung organischer Prozesse nicht ausreichend, ebensowenig dissipative Strukturen, da sie ja bei anorganischen chemischen Reaktionen vorkommen.

Symmetrische Formen, von Maschinen produziert, widersprechen der Vorstellung, Symmetrien seien

fundamentale Formen der Natur. Formen der Natur, von Maschinen gemacht, sind ein aufklärender Widerspruch. Es ist sogar die Frage, ob nicht auch Dissymmetrie, Asymmetrie, dissipative Strukturen, nichtlineare dynamische Systeme, selbstorganisierende Strukturen vollständig von Maschinen simuliert werden können und damit dem Programm einer Geometrie des Lebens ein Ende setzen. Im Augenblick ist allerdings gewiß, daß an die Stelle der klassischen Symmetrie nun geeignetere Begriffe wie asymmetrische, selbstorganisierende und dissipative Strukturen treten, um das Wachstum der Formen und die Prozesse des Lebens zu verstehen. Dies ist offenbar das Programm der dynamischen evolutionären Symmetrietheorie.

Vorausgesetzt, daß Maschinen nicht nur Symmetrien und Spiralen erzeugen können, sondern auch Fraktale, Asymmetrien, Selbstsimilaritäten, dissipative Strukturen und nichtlineare Formen der Selbstorganisation, dann taucht die Frage auf, ob es weiterhin zulässig ist, diese Formen als relevante Merkmale von Lebewesen bzw. als Modelle, Muster und „Kurven des Lebens“ zu betrachten. Maschinen erzeugte Symmetrien und andere Morphismen bedeuten zweifelsohne einen Triumph des geometrischen Geistes. Sie stellen aber gleichzeitig unsere klassischen Konzeptionen des Lebens und der Lebensvorgänge in Frage.

Das Problem der Evolution ist: Wie entsteht aus einer endlichen Anzahl von Möglichkeiten der Entwicklung ein Tunnel, eine Gerichtetheit? Die Antwort ist: durch Anpassung, Selektion. Die nichtlineare Rückkopplung als Verstärkerwirkung, der Wiederein-



tritt einer differentiellen Größe, kann solch einen Kanal erklären. „Life is itself a spatially canalized phenomenon“, sagt Thom.<sup>23</sup> Nun ist es aber offenbar so, daß auch Maschinen einen Kanal schaffen können, nämlich aus dem mikroskopischen Chaos des weißen Rauschens entstehen makroskopische Ordnungsmuster. Die Chiralität kann durch den Neigungswinkel der Kamera simuliert werden. Symmetrische und selbstähnliche Strukturen können also auch durch Maschinen produziert werden. Wären symmetrische und selbstähnliche Strukturen Muster des Lebens, würden anorganische Maschinen auch Formen des organischen Lebens produzieren können.

Abschließend könnte vielleicht gesagt werden: Selbstsimilarität (Fraktale) ist ein schwächeres Prinzip als Symmetrie, aber Selbstorganisation (Asymmetrie) ist stärker als Symmetrie.<sup>24</sup> Selbstorganisierende und dissipative Strukturen sind von Maschinen wahrscheinlich schwieriger zu simulieren, und sind daher relevantere Eigenschaften lebender Systeme und Organismen. Evolutionäre Symmetrietheorie beschäftigt sich daher mit Symmetrie- und Asymmetriemustern, die aus nichtlinearen dynamischen Systemen mit Selbstorganisation entstehen. Dennoch ist auch hier Vorsicht angebracht, von einer Geometrie des Lebens oder „Muster des Lebendigen“<sup>25</sup> zu sprechen, weil, wie wir angedeutet haben, diese Muster (wahrscheinlich) auch von Maschinen generiert werden können.

*Dank an Otto E. Rössler für Anregungen und Michael Klein für klärende Gespräche.*

#### Literatur

- <sup>1</sup>Frängsmyr, T./Heilbron, J.L./Rider, R.E.: The Quantifying Spirit in the Eighteenth Century. Univ. of California Press 1984. — <sup>2</sup>Coleman, W./Holmes, F.L.: The Investigative Enterprise. Experimental Physiology in Nineteenth Century Medicine. Univ. of California Press 1988. — <sup>3</sup>Coole, T.A.: The Curves of Life. Nachdruck der Ausgabe 1914 bei Dover Publ., N.Y. 1979. — <sup>4</sup>Op. cit., S. 19. — <sup>5</sup>Thompson, D'Arcy: Über Wachstum und Form. Basel 1973. S. 223. Übersetzung der Ausgabe von 1966, Cambridge Univ. Press. — <sup>6</sup>Op. cit., S. 231. — <sup>7</sup>Op. cit., S. 35. — <sup>8</sup>Ghyka, M.: The Geometry of Art and Life. Dover, N.Y., 1977. S. 85. — <sup>9</sup>Op. cit., S. 88. — <sup>10</sup>Op. cit., S. 89. — <sup>11</sup>Thom, R.: Modèles mathématiques de la morphogenèse. Paris 1974. — <sup>12</sup>Thom, R.: Topological models in Biology. In: C. H. Waddington (Hrsg.): Towards a Theoretical Biology, 3, Drafts. Edinburgh 1970. S. 91. — <sup>13</sup>Thom, R.: Théorie dynamique de la morphogenèse. Benjamin, N.Y. 1972. — <sup>14</sup>Anm. 12, S. 105. — <sup>15</sup>Thom, R.: Théorie dynamique de la morphogenèse. In: L. H. Waddington (Hrsg.): Towards a theoretical biology, 1, Prolegomena. Edinburgh 1968. — <sup>16</sup>Mandelbrot, B.B.: The Fractal Geometry of Nature. Freeman, N.Y., 1983. — <sup>17</sup>Prusinkiewicz, P./Lindenmayer, A.: The Algorithmic Beauty of Plants. Springer, N.Y. 1990. — <sup>18</sup>Wiener, N.: The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society. Garden City, N.Y., 1954. S. 61. — <sup>19</sup>Mayr, O.: The Origins of Feedback Control. M.I.T., Cambridge, 1970. Übersetzung von: Zur Frühgeschichte der technischen Regelung. München 1969. — <sup>20</sup>Turing, A.: The Chemical Basis of Morphogenesis. Phil. Trans. R. Soc. London Ser. B 327, 37, 1952. — <sup>21</sup>Crutchfield, J.P.: Space-Time Dynamics in Video Feedback. Physica, 1984. Wiederabdruck in: S. und W. Vasulka/D. Dunn (Hrsg.): Eigenwelt der Apparatewelt. Ars Electronica 1992, Linz. — <sup>22</sup>Thom, R.: in: Towards a theoretical biology, 1, Prolegomena, 1968, S. 33. — <sup>23</sup>Thom, R.: Organs and Tools: A Common Theory of Morphogenesis. In: J.L. Casti/A. Karlqvist (Hrsg.): Complexity, Language and Life: Mathematical Approaches. Berlin 1986. S. 218. — <sup>24</sup>Siehe auch: Rein, D.: Die wunderbare Händigkeit der Moleküle. Vom Ursprung des Lebens aus der Asymmetrie der Natur. Basel 1993. — <sup>25</sup>Deutsch, A. (Hrsg.): Muster des Lebendigen. München 1994.

## Erkenntnis