

Urgeschichte der Selbstorganisation – Zur Archäologie eines wirkmächtigen Paradigmas¹

1. Vorspann

Alles Werden in Natur und Gesellschaft hat mit Organisation zu tun: vor allem mit der Organisation von Systemen. Aber das Werden eines Systems wird nicht gemacht, sondern geschieht aus sich selbst heraus: durch Selbstorganisation. Dass sich Systeme selbst organisieren können, mutet auf den ersten Blick mysteriös an. Gleichwohl ist uns die Existenz solcher Systeme wohl vertraut: Alle Lebewesen und deren Evolution verdanken sich einer spontanen Bildung von mehr oder minder dauerhaften Strukturen, einem Prozess also, der offenbar ohne einen „Schöpfer“ auskommt. Dasselbe gilt aber auch etwa für unser Sonnensystem, die Plattentektonik, für Meeresströmungen, Wirbelstürme oder Kristalle und sogar für soziale und kulturelle Systeme.

Ziel dieses Artikels ist es, die Grundideen einer Theorie der Dynamik selbstorganisierender Systeme und deren philosophie- und wissenschaftshistorische Ursprünge nachzuzeichnen. Vorstellungen zu einer spontanen Entstehung von Ordnung aus Unordnung, aus dem „Chaos“, lassen sich bereits in vielen Mythen unterschiedlicher Kulturen sowie bei einigen Denkern der Antike nachweisen. Doch erst seit etwa den 1960er Jahren haben sich auch die Wissenschaften, vor allem Physik, Chemie und Biologie, dem Phänomen der Selbstorganisation als einem neuen Modell für die Dynamik komplexer Systeme verstärkt zugewandt und unterschiedliche Ansätze zu deren theoretischem Verständnis entwickelt. Im Folgenden werden die Kernideen der wichtigsten Konzepte vorgestellt. Seitenblicke sollen auch auf einige „Anwendungen“ dieser Konzepte im Bereich der Sozial- und Geisteswissenschaften geworfen werden. Der Artikel folgt weitgehend einer historischen Perspektive, um die „Urgeschichte“ der Idee der Selbstorganisation deutlich werden zu lassen, einer Idee, die mittlerweile zu einem neuen

¹ Dieser Text wurde erstmals publiziert in: Beatrice Voigt (Hg.), „Vom Werden – Entwicklungsdynamik in Natur und Gesellschaft“, München 2019; S. 60 ff.

„transdisziplinären“ Paradigma und zu einer neuen Sichtweise auf die Wirklichkeit im Ganzen herangereift ist.

Beginnen möchte ich mit einer kurzen Reflexion zu einer etwas seltsamen Sentenz des französischen Lyrikers, Philosophen und Essayisten Paul Valéry (1871 – 1945): „Diese Welt ist ständig durch zwei Dinge bedroht: Durch Ordnung und Unordnung“ Wir seien also einer doppelten Bedrohung ausgesetzt, die von beiden Seiten her die Wirklichkeit (und damit auch uns) in die Zange nimmt. Wie lässt sich dieser Satz von Valéry verstehen? Als Literat denkt Valéry wohl vor allem an gesellschaftliche Verhältnisse: starre soziale Ordnungen auf der einen Seite, die sich jeder Veränderung entgegenstemmen, und hoch „fluide“ gesellschaftliche Ordnungen auf der anderen Seite, in denen die „zentrifugalen“ (auflösenden) Kräfte die „zentripetalen“ (integrativen) Kräfte zu dominieren beginnen (ein Befund, der gerade auch im Hinblick auf den gegenwärtigen Weltzustand bedeutsam zu sein scheint). Das jeweils Bedrohliche liegt also in einem *Zuviel* entweder an Ordnung oder an Unordnung, an einem Zuviel entweder an „reduzierter Komplexität“ (Niklas Luhmann) oder an gleichzeitig offen gehaltenen Optionen mit der Gefahr der Anarchie. Natürlich werden hierdurch nur mögliche Extremlagen innerhalb des Spektrums soziokultureller Entwicklungspfade markiert.

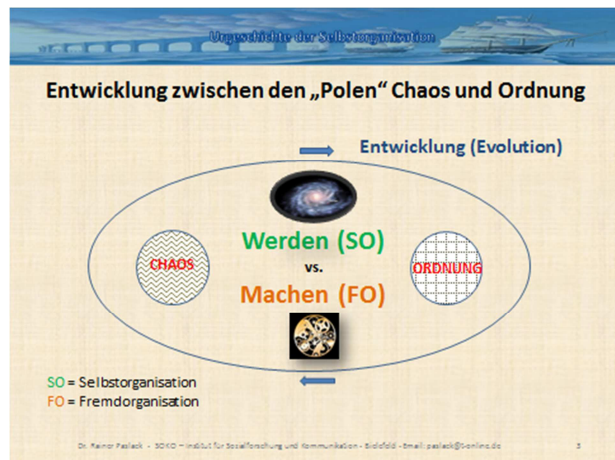
Aber auch innerhalb der Natur können wir dieses Gegenspiel von Ordnung und Chaos beobachten: Ordnung bedeutet hier Differenziertheit und die Stabilisierung von Differenzen, Unordnung (Chaos) hingegen die Auflösung bestehender Differenzen. Die Tendenz zur Auslöschung von Differenzen (etwa der Temperatur oder der Dichte) wird in der Physik bekanntlich von dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, dem berühmten *Entropiesatz*, beschrieben: jeder „Ordnungsgradient“, jedes Gefälle zwischen einem geschlossenen System gegenüber seiner Umgebung kann sich immer nur auf Zeit behaupten, bis alle bestehenden dynamischen Unterschiede (etwa der Wärme) zwischen System und Umgebung ausgeglichen sind. Wir werden jedoch noch sehen, wie es unter bestimmten thermodynamischen Umständen gleichwohl möglich ist, dass auch im physikalischen (und besonders auch biologischen) Bereich eine *Evolution* hin zu immer komplexeren Systemstrukturen in Gang kommen kann – und zwar nicht *entgegen* der Entropie, sondern überraschender Weise mit deren Hilfe, nämlich durch deren „geschickte Nutzung“!

In stark verallgemeinerter Form lässt sich sagen: Jede Entwicklung (Evolution) in Natur und Gesellschaft spielt sich zwischen zwei Polen ab: dem „Ordnungs-Pol“ und dem „Chaos-Pol“. Erst die *Spannung* zwischen beiden Polen lässt *Dynamik* entstehen, sodass jedes konkrete System gewissermaßen eine „Mischung“ aus Ordnung und Unordnung, aus relativ stabilen Strukturen und destabilisierenden „Tendenzen“ (Fluktuationen) verkörpert. Speziell für soziale Systeme gilt dabei: Die Entwicklung kann sich aus einem „Machen“ oder einem „Werden“ ergeben. In dem einen Falle spricht man oft von „Fremdorganisation“, in dem anderen von „Selbstorganisation“.

Das „Machen“ (Konstruieren, Einrichten) gründet in externen Ziel- oder Sollvorgaben (Plänen und Programmen); das „Werden“ hingegen vollzieht sich *aus dem System selbst heraus*: aufgrund von komplexen (vernetzten) und sich nicht selten gegenseitig verstärkenden Wechselwirkungen zwischen dessen Komponenten, wobei die Resultate dieser oft unerwünschten Prozesse unvorhersehbar und häufig auch nicht leicht oder gar nicht beherrschbar sein können. „Werden“ bedeutet ein Wachsen, ein Sich-Entwickeln, das zwar Impulse von außen aufnehmen kann, das aber gleichwohl *eigenen* Regeln, einer internen „Werde-Ordnung“, folgt. Das selbsttätige Werden bedarf freilich eines die Selbstentwicklung begünstigenden Umfeldes, sodass man auch sagen könnte: Das, was sich zu einem *System* entwickelt, braucht eine *Umwelt*, in die es eingebettet ist, die das Werden des Systems trägt, nährt und fördert. Dennoch liefert die Umwelt lediglich die *äußeren* Randbedingungen, unter denen das systemische Werden sich vollzieht, sich in seiner Eigenart *selbst bestimmt* und hierdurch die *inneren* Randbedingungen selbst reguliert.

Dem absichtsvollen Machen werden mithin durch das spontane Werden stets gewisse Grenzen gezogen, wobei es „kritische Schwellen“ geben kann, bei deren Überschreiten das gesamte System in Auflösung zu geraten droht. Eine *hohe* Komplexität des Sozialsystems kann sowohl förderlich für die Erhaltung seiner Stabilität sein (insofern Komplexität auch Flexibilität einschließt) als auch die Anfälligkeit des Systems für unbeherrschbare Störungen von außen oder für innere „Turbulenzen“ erhöhen. In der sozialen Realität werden wir für gewöhnlich auf Mischformen aus Fremd- und Selbstorganisation treffen, aber nur im Falle der

Selbstorganisation lässt sich von einem „Werden“ sprechen. Erst beide zusammen bilden gleichsam den „Motor“ der „soziokulturellen Evolution“.



Wir sagten schon, dass hinreichend komplexe Systeme in Grenzen durchaus tolerabel für Störungen aus ihrer Umwelt sind, auch anpassungs- und entwicklungsfähig. Dies bedeutet, dass solche Systeme ihre Organisation nicht nur in Grenzen aufrechterhalten, sondern ihre Binnenstrukturen auch so verändern können, dass sie als dynamisches Ganzes eine Evolution durchlaufen, wobei komplexere Stufen sowie nieder-komplexe Stufen und „chaotische“ (instabile) Phasen einander abwechseln können. Das Paradebeispiel für Systeme, die auf Störungen oder „Krisen“ flexibel zu reagieren vermögen, ist wohl das Lebewesen. Auch wenn die einzelnen Lebewesen, die Individuen, allesamt zum Tode verurteilt sind und mitunter sogar ganze Arten und Gattungen aussterben, so findet das Leben auf dieser Erde doch bereits seit Jahrmilliarden immer wieder neue Wege, auch den desaströsesten Veränderungen der Umwelt zu trotzen und die Evolution fortzusetzen. Zwar gibt es im Reich des Lebendigen selbst allgegenwärtige Gefährdungen wie Konkurrenzbeziehungen, Fressketten und Parasitismus, aber all dies scheint dem Leben insgesamt nicht zu schaden, sondern geradezu als ein die Evolution beschleunigender Faktor zu wirken. Mag es also auch zutreffen, dass Unordnung überall die Ordnung bedroht, so kann man gleichwohl feststellen, dass entsprechend evolutionsfähige Organisationen (Organismen wie Gesellschaften) der bedrohlichen Umwelt doch im Allgemeinen erstaunlich gut zu widerstehen vermögen.

Im Folgenden sollen uns nur die Prozesse der Selbstorganisation beschäftigen; und auch das erst einmal nur im Hinblick auf selbstorganisierende Prozesse in der Natur, genauer: bezogen auf die Selbstorganisation der Materie, deren Bedeutung bereits,

wie wir sehen werden, auf der frühen Kulturstufe der Mythenbildung durchaus erkannt worden ist. Aber auch in späteren Epochen, vornehmlich im Zeitalter der Aufklärung, wird die Idee der Selbstorganisation immer wieder eine Rolle spielen, um ein Verständnis für die Selbststrukturierung materieller Systeme (und insbesondere auch von Lebewesen) zu gewinnen. Vor allem aber werden wir uns auf die Formierung der verschiedenen Forschungsprogramme der Selbstorganisation seit Beginn der 1960er Jahre konzentrieren, da hier erstmals die Selbstorganisation zu einem *wissenschaftlich* fruchtbaren Paradigma gereift ist.

Zwei *Leitfragen* sollen uns den Weg durch die Ursprungsgeschichte der Selbstorganisation bahnen, damit wir, gleich einem Archäologen oder Geologen, selektive „Tiefenbohrungen“ in die zahlreichen Schichten der Genese dieses neuen (und zugleich im Kern uralten) Paradigmas vornehmen können:

- I. Was ist „Selbstorganisation“ und wie tritt sie in Erscheinung?
- II. Wann und wie kam es zur Ausbildung eines Forschungsprogramms der Selbstorganisation?

Anmerkung: Es ließe sich gut noch eine dritte Leitfrage hinzufügen: Handelt es sich bei dem Paradigma der Selbstorganisation um eine „wissenschaftliche Revolution“ (Thomas S. Kuhn) vom Kaliber der „Kopernikanischen Revolution“ im 16. Jahrhundert oder etwa im 19. Jahrhundert der „probabilistischen Revolution“ (mit der erstmals der Gedanke der Zufälligkeit bzw. Wahrscheinlichkeit von Naturprozessen wichtig und der „strenge Determinismus“ relativiert wird) oder auch der „darwinistischen Revolution“ (wobei ja auch die biologische Evolution durch Variation und Selektion sich selbst organisiert und ein göttliches „intelligent design“ nicht mehr benötigt wird)? Und lässt sich das Konzept der Selbstorganisation auf eine Stufe stellen mit den durch die Quanten- und Relativitätstheorie bewirkten Umwälzungen? Ich möchte dies grundsätzlich bejahen, erspare mir hier jedoch aus Platzgründen eine nähere Begründung und lasse stattdessen die unten behandelten modernen Konzepte der Selbstorganisation für sich selbst sprechen.

Unser „Fahrplan durch die Geschichte der Selbstorganisation“ sieht folgende Stationen vor:

- Von der **Idee** der Selbstorganisation zur modernen Selbstorganisationsforschung (Vorlauf)

- Die vier **Phasen** der Selbstorganisationsforschung (moderne Entwicklungen)
- Die drei zentralen **Pioniere** der Selbstorganisationsforschung: Ilya Prigogine, Hermann Haken und Manfred Eigen
- Die wesentlichen **Merkmale** von Selbstorganisationssystemen: Umweltoffenheit, operationale Geschlossenheit und die Bedeutung der Randbedingungen
- Einige „**Lehren**“, die wir aus den Erkenntnissen der Selbstorganisationsforschung für unser Leben in Gesellschaft und Kultur ziehen können.

Zur Auswahl der „Pioniere“: In meinem Buch zur „Urgeschichte der Selbstorganisation“ (1991) hatte ich insgesamt „sieben Wurzeln“ der Selbstorganisation identifiziert, von denen hier drei Wurzeln (Prigogine, Haken und Eigen), die mir aber die wichtigsten, weil wirkungsmächtigsten zu sein scheinen, zur Sprache kommen werden. Jene Leser, die auch gern auch etwas über die restlichen „Wurzeln“ erfahren möchten, mögen dies bitte dem eingefügten Kasten entnehmen!

INFOKASTEN: Die „sieben Wurzeln“ der Selbstorganisation

1. Die Theorie *dissipativer Strukturen*: Thermodynamische Fluktuationen können ein System in einen völlig neuen Zustand treiben („Ordnung durch Fluktuation“)
2. Die Theorie der *Synergetik*: Das spontane Zusammenwirken von Teilchen (gleichwelcher Art) kann eine kohärente Struktur hervorbringen, die auf die Teilchen ordnend zurückwirkt
3. Die Theorie *autokatalytischer Hyperzyklen*: Schon auf präbiotischer Ebene können sich spontan replikationsfähige Strukturen herausbilden und eine Evolution durchlaufen
4. *Chaostheorien*: Bereits kleine Schwankungen in den Anfangsbedingungen eines komplexen Prozesses können zu einem unvorhersehbaren Verhalten führen („Schmetterlingseffekt“); hierher gehört auch die Entdeckung „selbstähnlicher“ Strukturen durch die Fraktalgeometrie
5. Das *Prinzip des „order from noise“* (Heinz von Foerster): Systeme können durch die selektive Nutzung von Störungen aus der Umwelt eine systeminterne Ordnung aufbauen
6. Die Theorie der *Autopoiese*: Lebende Systeme sind rekursiv so organisiert, dass das Ganze des Systems und seine Bestandteile sich wechselseitig produzieren und erhalten.
7. Die Theorie „elastischer“ Ökosysteme: Die innere Elastizität vielgliedriger Ökosysteme macht diese „resilient“ (robust) gegenüber starken Umweltturbulenzen sowie evolutionsfähig.

Bedingt durch diese notwendigen Auslassungen werden die erhebliche Rolle neuer mathematischer Methoden und die Bedeutung des Computers als „technischer Erfolgsbedingung“ für die Etablierung des Selbstorganisationsparadigmas weitgehend unberücksichtigt bleiben. Ich werde mir aber einen gelegentlichen Seitenblick auf einige dieser anderen „Wurzeln“ der Selbstorganisation gestatten.

2. Frühe Konzepte der Selbstorganisation

Zu Beginn unserer Zeitreise durch die Geschichte der Selbstorganisation sollte man zunächst eine wichtige Unterscheidung vornehmen: nämlich zwischen der *Idee* der Selbstorganisation, die als solche uralt ist, und der *wissenschaftlichen Erforschung* (Erklärung) von Phänomenen und Prozessen der Selbstorganisation, die erst um die Mitte des 20. Jahrhundert in verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen in Gang kommt.

Als *Idee* kann man der Selbstorganisation des Kosmos bereits in einigen *Schöpfungsmythen* in ganz unterschiedlichen frühen Kulturen rund um den Erdball begegnen: etwa bei den alten Ägyptern (memphitischer Mythos), im chinesischen Kulturkreis oder bei einigen indianischen und polynesischen Kulturen. In diesen Ursprungsmythen geht es immer, wie auch später in der Erforschung der Selbstorganisation, nicht um die metaphysische Frage, warum überhaupt etwas existiert (die Seinsfrage), sondern um die Frage nach dem *Ursprung der Ordnung* im Kosmos (das Ordnungsproblem). Da ich mich auch hier möglichst kurz fassen möchte, will ich nur auf die beiden Grundantworten hinweisen, die allgemein von den Schöpfungsmythen bezüglich der Quelle der kosmischen Ordnung gegeben werden, wobei wieder die oben schon behandelte Unterscheidung zwischen Fremd- und Selbstorganisation (Machen vs. Selbstwerden) ins Spiel kommt:

- (a) Es gibt eine göttliche *Macht*, die aus dem Chaos durch gezielte Eingriffe Ordnung schafft (so etwa, wenn es im biblischen Schöpfungsbericht, der *Genesis*, heißt: „*Am Anfang schuf Gott den Himmel und die Erde ...*“; woraufhin Gott das Licht erschafft und anschließend mehrere „Scheideakte“ vornimmt: indem Gott spricht, ordnet er das Chaos des „tohu wa bohu“ dadurch, dass er verschiedene Seinsbereiche voneinander „scheidet“: die Nacht vom Tage, sodann die „Wasser unter dem Firmament“ von denen über ihm, der „Feste“ des Himmels; im nächsten Schritt scheidet Gott die „Wasser unter dem Firmament“ vom „Trockenen“, der festen Erde; das Ganze mutet, modern gesprochen, wie eine Abfolge von Symmetriebrechungen an, die hier aber nicht, wie in der modernen Astrophysik, spontan erfolgen, sondern auf göttliches Geheiß hin).

(b) Es gibt im *Chaos* so etwas wie aktive „Keime“, aus denen heraus die (zumeist dualistisch gedeutete) Weltordnung von selbst entsteht: Am Anfang steht etwa ein „Urozean“ oder schlicht der „gähnende Abgrund“ des „Chaos“, aus dem sich zahlreiche Wesen auf wunderbare Weise erheben, oder eine Art „kosmogonisches Ei“, dessen Herkunft nicht genannt wird und aus dessen Zerschneiden alles Weitere hervorgeht; wiederum kann der ersten „Spontaneität“ eine Reihe von Differenzierungen nachfolgen, die den Kosmos immer feiner strukturieren. Oft allerdings – dies muss betont werden – gehen spontane Akte der Selbstorganisation recht bald in bewusste und zielgerichtete Handlungen von erstentstandenen Wesen über: dem Chaos entspringt etwa ein göttliches Wesen, das sodann alles andere *macht* (z. B. aus seinem Samen weitere geschlechtliche Wesen generiert, die sich sodann fortpflanzen und die strukturelle Evolution des Kosmos immer weiter vorantreiben und seine Ordnung bereichern. In den mythischen Erzählungen und Kulte (etwa Kulttänzen) werden diese Urereignisse („in illo tempore“) sodann immer aufs Neue reaktualisiert und in ihrem Wahrsein bekräftigt (zyklischer Zeitlauf).

Gänzlich verschwunden ist das „mythische Denken“ mit seinen symbolischen Bildern und sakralen Geschichten auch heute noch nicht, auch wenn die kultische Dimension allenfalls noch in profanen Formen fortexistiert: Immer noch begegnen wir „Mythen des Alltags“ (Roland Barthes), nationalen und politischen Mythenbildungen („Französische Revolution“ oder „Oktoberrevolution“), die ein spontanes Ursprungsereignis an den Beginn einer neuen Epoche stellen, oder auch wissenschaftlichen Bildern von mythischer Kraft wie denen vom „Urknall“ oder von „schwarzen Löchern“. Immer noch träumt Paul Klees bzw. Walter Benjamins der Vergangenheit zugewandter „Engel der Geschichte“ von den teilweise verschütteten Anfängen „revolutionärer Erneuerung“, die es wiederzubeleben gelte.

Im europäischen Kulturraum waren es indes die Philosophen des griechischen Altertums, die so genannten „Vorsokratiker“, die wohl erstmals versucht haben, zu einer nicht-mythischen, vielmehr rationalen Erklärung der kosmischen Ordnung vorzustoßen, indem sie davon ausgingen, dass der Aufbau und die Dynamik dieser Ordnung von ewigen Gesetzen (*logos*) durchgängig bestimmt seien. Aber auch von ihnen werden noch häufig Begriffe wie „Chaos“, „Ur-Element“ oder „Ur-Wirbel“ verwendet, denen man ihren Ursprung im Mythos noch ansieht (den noch

vorphilosophischen Anfang macht die berühmte „Theogonie“ des Hesiod, des um 700 v. Chr. lebenden Dichters). Einige Vorsokratiker wie Thales, Anaximander und Anaximenes gingen von einer „Ursubstanz“ (wie etwa Wasser oder Luft) aus, aus deren Verdichtungen, Differenzierungen und Neukombinationen sich nach und nach alle partikularen Strukturen und Wesenheiten, einschließlich der Seelen, entwickelt hätten. Wir können das hier jedoch nicht im Einzelnen ausführen.

Eine besondere Bedeutung für unser Thema kommt den Ideen der antiken „Atomisten“ zu: Vor allem Demokrit (460/459 – 371 v. Chr.) hat ein Konzept der Selbstorganisation der Materie vorbereitet, das dann bei Epikur (342/341 – 271/270 v. Chr.) seine reife Gestalt annimmt. Über dessen Vorstellungen wissen wir vor allem aus einem langen Lehrgedicht, *De rerum natura* betitelt, des römischen Philosophen und Dichters Lukrez (um 96 – 55 v. Chr.): Im Rückgriff auf Epikur postulierte Lukrez einen uranfänglichen glatten Strom von einzelnen Atomen („primordia“ oder „elementa“), die das Weltall von oben nach unten auf geraden Bahnen durchheilen (bei den alten Griechen war die Vorstellung von einem *absoluten* Oben und Unten allgemein verbreitet) und aufgrund der Parallelität ihres Falles eigentlich niemals miteinander in Berührung kommen dürften. Daher nahm Lukrez überdies an, dass es in dem laminaren Strom der Atome zu minimalen *Abweichungen* („declinationes“) kommen kann, wodurch Kollisionen zwischen den Urteilchen möglich werden, sodass sich kleine *Wirbel* aus miteinander verhakten Atome bilden, aus denen sodann alle Dinge des Universums hervorgehen (so wie ursprünglich getrennte Regentropfen auf einer Fensterscheibe aufgrund von Unebenheiten des Untergrunds zusammenlaufen und größere Tropfen bilden können). Nach diesem Konzept vollzieht sich die Selbstorganisation der Materie mithin auf eine völlig *mechanistische* Weise. Oder in Lukrez' eigenen Worten:

„Denn es haben gewiss mit Vernunft nicht der Dinge Atome / jedes in Reih und Glied sich mit scharfem Spürsinn geordnet [...] / sondern dieweil auf vielfache Art viele Samen der Dinge / seit unendlicher Zeit schon, von ihren Schlägen gestoßen / und vom eignen Gewicht bewegt, zu treiben gewohnt sind, / sich zu vereinen auf jegliche Art und alles zu prüfen, / was zu schaffen imstand unter sich sie wären vereinigt [...].“ (Entnommen aus: Lucretius, *Welt aus Atomen*, 1956, V, S. 419 ff.)

Die dynamische Ordnung der Welt ist kein geplantes Werk irgendeines Gottes, sie vollzieht sich vielmehr wie die Kreisbewegung der Sterne notwendig aus sich selbst heraus; der Kosmos strukturiert sich selbst aufgrund zahlloser atomarer Kollisionen,

wobei alle nur möglichen Kombinationen erzeugt werden können. Das schöpferische Prinzip der Welt liegt in ihr selbst. Oder wie es bei Lukrez heißt:

„Zweifellos haben die Urkörper nämlich weder mit Absicht / ordnungsgemäß, nach verständigem Plan, sich zusammengeschlossen / noch gar im einzelnen [ihre Bewegungen abgestimmt]; sondern / weil sie auf ihrem Weg durch das Weltall vielfach sich wandeln, / Stößen und Schlägen auch ausgesetzt sind seit unendlichen Zeiten, / kommen sie beim Erproben jeglicher Art von Bewegung / wie auch Vereinigung schließlich zu eben den Formen und jener / Ordnung, die unser Weltall erschufen und heute erhalten.“
(Ebenda)

Wir machen nunmehr einen weiteren großen Zeitsprung bis ins 18. Jh., zu dem Königsberger Philosophen Immanuel Kant (1724 – 1804), der erstmals den Begriff der „Selbstorganisation“ gebraucht und damit geprägt hat. Parallel zu dem französischen Philosophen Pierre-Simon Laplace (1749 – 1827) hat Kant Epikurs bzw. Lukrez‘ alte Idee eines atomistischen Urwirbels auf die Entstehung des Sonnensystems aus einem turbulenten Staubnebel angewandt: Allein durch die ihre anfänglichen Bewegungsimpulse und von der Schwerkraft angetrieben (eine allgemeine Theorie der Gravitation war inzwischen durch Isaac Newton entwickelt worden) kollidieren die Staubteilchen zufällig solange, bis größere Körper (die Sonne und die Planeten) entstehen, wobei sich schließlich im Zusammenspiel von Zentrifugal- und Zentripetalkräften die Planeten auf elliptischen Bahnen um die Sonne anordnen („Nebularhypothese“ oder „Kant-Laplacesche Theorie“), was im Ganzen ein vollkommen mechanistisches Modell der Selbstordnung der Materie ergibt (um 1960 wurde diese Hypothese von der Selbstordnung des Sonnensystems in modifizierter Form wieder aktuell; heute würden wir diese Form der Selbstorganisation als „konservativ“ beschreiben, im Unterschied zu „dissipativer Selbstorganisation“, die wir weiter unten behandeln werden).

Kant und F.W.J. Schelling (1775 – 1854) wussten auch bereits von der Möglichkeit einer zyklischen Verknüpfung kausaler Prozesse, was für die Naturwissenschaften bis heute eine wichtige Einsicht bleiben sollte. Dieser zyklische Aufbau dynamischer Vorgänge wurde ebenfalls bereits von Kant (aber z.B. auch von Hegel) als ein wesentliches Merkmal lebender Systeme erkannt. Gleichwohl vermochte sich Kant nicht vorzustellen, wie auf rein mechanistischem Wege (nach dem Muster des Sonnensystems) Lebewesen entstanden sein könnten, die sich offenbar zielgerichtet und selbstzweckhaft verhalten. Hier schien der Mechanizismus an seine Grenzen zu stoßen (Kant selbst hoffte auf einen zukünftigen „Newton des Grashalms“), was

besonders im 19. Jh. zu einer „vitalistischen“ Gegenströmung führte, in der u.a. die alte aristotelische „Entelechie“-Idee wiederkehrte. Kant selbst deutete Organismen so, als wären sie *als-ob*-selbstzweckhafte Resultate von Selbstorganisationsprozessen. So schrieb er:

„In einem [lebendigen] Produkte der Natur wird jeder Teil, so, wie er nur durch alle übrige da ist, auch als um der andern und des Ganzen willen existierend [...] gedacht. [...] Und nur dann und darum wird ein solches Produkt, als organisiertes und sich selbst organisierendes Wesen, ein Naturzweck genannt werden können.“ Oder an einer anderen Stelle: *„Ein Ding existiert als Naturzweck, wenn es von sich selbst [...] Ursache und Wirkung ist.“* (*Kritik der Urteilskraft*, 1790, § 64, B 280)

Damit wird, modern gesprochen, die „operationale Geschlossenheit“ vitaler Systeme angedeutet. Gleichwohl galt Kant das Vermögen der Natur, selbstorganisierte Produkte hervorzubringen, als eine „unerforschliche Eigenschaft“ der Natur. Und eben das ist es, was die wissenschaftliche Wende in den 1960er Jahren von Kants und anderen frühen Selbstorganisationsideen unterscheidet: Erstmals wird es hier um die *Erforschung* der Selbstorganisation mit wissenschaftlichen Methoden, also mit Experiment und Mathematik, gehen.

Die Vorstellung einer selbstorganisierten Strukturbildung sollte Schule machen: Man denke etwa an die Idee von einer „unsichtbaren Hand“, die nach dem schottischen Moralphilosophen Adam Smith (1723 – 1790) zu einer Selbstregulierung des Marktes führe. Dies sollte eine Antwort auf die Frage geben, wie unter der Voraussetzung durchgängig selbstsüchtig handelnder Individuen überhaupt übergeordnete Strukturen wie ein Markt bzw. ein Sozialwesen auf stabile Weise entstehen können. Was die Organismen anbetrifft, so stand man deren Organisationsvermögen entweder mit den wohlbekanntenen mechanischen Wechselwirkungen hilflos gegenüber oder man musste auf bisher unbekannte teleologische Wirkkräfte bauen. Die mechanistische Lösung dieses „zu komplexen Rätsels“ wurde folglich der Zukunft überlassen und damit an den Rand des Forschungsinteresses verschoben: Vielleicht würden sich die Entstehung und Dynamik lebender Systeme ja eines Tages in ähnlicher Weise verstehen lassen, wie Kant und Laplace dies am Beispiel des Sonnensystems demonstriert hatten.

Um den Vorlauf der modernen Selbstorganisationsforschung seit der Aufklärung abzuschließen: Bereits 1714 hatte der deutsche Philosoph Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 – 1716) in seiner „Monadologie“ bemerkt:

„Eine durch Menschenkunst gebaute Maschine ist nicht auch Maschine in jedem ihrer Teile. So hat z. B. der Zahn eines Messingrades Teile oder Stücke, die für uns nichts Kunstvolles mehr sind [...]. Aber die Maschinen der Natur, d. h. die lebendigen Körper, sind noch in ihren kleinsten Teilen [...] Maschinen. Eben darin besteht der Unterschied zwischen Natur und Kunst [...]“.

Die durchgängige Strukturiertheit der Organismen bis in die letzten Fasern hinein und ihre offensichtliche (bzw. scheinbare) Selbstzweckhaftigkeit sollte noch für lange Zeit ein unlösbares „Lebensrätsel“ bleiben – trotz einiger Versuche von Embryologen und Physiologen im 19. Jh., etwa über das Postulat eines inhärenten „Bildungstriebes“ zu einer Lösung zu kommen – bis hin zur Entwicklung der Molekulargenetik und einer nichtlinearen Ungleichgewichtsthermodynamik sowie einer „Theorie vom Zusammenwirken“, die ihrerseits wiederum an die in der Evolutionsbiologie durch Darwin entwickelten Prinzipien der Variation und Selektion anschließen. Damit vollziehen wir aber, unter Auslassung zahlreicher Zwischenschritte, bereits einen weiteren Zeitsprung: mitten hinein in die 1960er Jahre, in denen die moderne Selbstorganisationsforschung auf den Plan tritt.

3. Moderne Konzepte der Selbstorganisation

Die Entstehungsperiode der modernen Selbstorganisationsforschung lässt sich grob in vier Phasen gliedern:

- I. Die Phase der **Etablierung fachspezifischer „Theoriekerne“** in einzelnen Naturwissenschaften (ca. 1960 – ca. 1970)
- II. Die Phase der **Analogisierung der verschiedenen Konzepte**: Entdeckung ihrer wechselseitigen Anschlussfähigkeit (ca. 1970 – ca. 1975)
- III. Die Phase der **„Globalisierung“ einzelner Konzepte**: Weitere Anwendungen, *Verallgemeinerung* und Beginn der *Popularisierung* (ca. 1975 – ca. 1985)
- IV. Die Phase der **Übertragung von Selbstorganisation-Konzepten** in (a) die Sozial- und Geisteswissenschaften sowie (b) in außerwissenschaftliche Bereiche (seit ca. 1980)

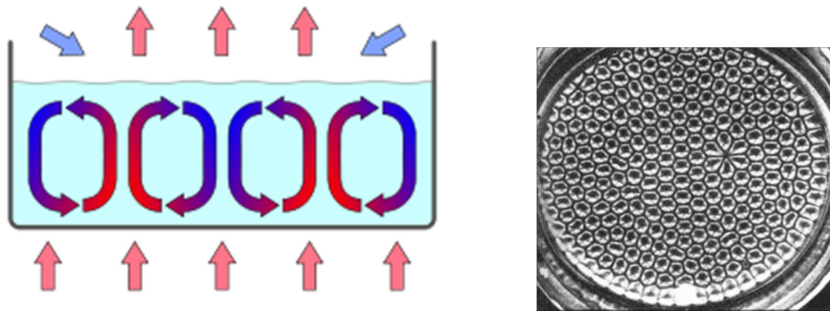
Danach beginnt eine Phase, in der das neue „Selbstorganisation-Paradigma“ breite Anerkennung erfährt und Einzug in den normalen Forschungsalltag hält, wobei es im Zuge seiner *intensivierten* Diffusion zu zahlreichen weiteren Anwendungen kommt

(etwa in der Kosmologie, Managementforschung, Psychotherapie, Medizin, Soziologie usw.). Diese Phase dauert bis heute an.

Beginnen wir unseren Durchgang mit der **Phase I (ca. 1960 – ca. 1970)**, wo es um die Herausbildung von „Theoriekernen“ der Selbstorganisation in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen geht: insbesondere in den Bereichen der Physik und Chemie bzw. Biochemie. Hier treffen wir auf die drei oben genannten „Pioniere“: den russisch-belgischen Physikochemiker Ilya Prigogine (1917 – 2003; Nobelpreis für Chemie 1977), den deutschen theoretischen Physiker Hermann Haken (*1927), sowie den deutschen Physikochemiker Manfred Eigen (*1927; Nobelpreis für Chemie 1967).



Ilya Prigogine hat in den 1960er Jahren die klassische Gleichgewichtsthermodynamik, die für thermisch abgeschlossene Systeme gilt, zu einer Thermodynamik für offene Systeme „fern ab vom Gleichgewicht“ weiterentwickelt, die verstehen lässt, wie sich durch einen Phasenübergang von Unordnung zu Ordnung so genannte „dissipative Strukturen“ ausbilden, die stabil bleiben, solange die Energiezufuhr von außen aufrechterhalten bleibt. Dass sich derartige relativ stabile Strukturen bilden können, war bereits seit Längerem bekannt: So hatte Henri Bénard (1874 – 1939) schon im Jahre 1900 das Phänomen einer *spontan* entstandenen und *zellenartig geordneten Konvektion* in konstant von unten her erhitzten dünnenschichtigen Flüssigkeiten recht präzise beschrieben, weshalb dieses Phänomen auch als „Bénard-Konvektion“ bezeichnet wird: In den Bénard-Zellen, die von oben betrachtet Bienenwabenzellen ähneln, steigt die Flüssigkeit im Zentrum auf, kühlt sich an der Oberfläche durch Verdunstung ab und sinkt mit erhöhter Dichte an den Zellrändern wieder nach unten. Offenbar „kooperieren“ die zahllosen Flüssigkeitsmoleküle miteinander, obwohl es keine zentrale „Koordinationsinstanz“ gibt, die hier regulierend eingreifen würde.

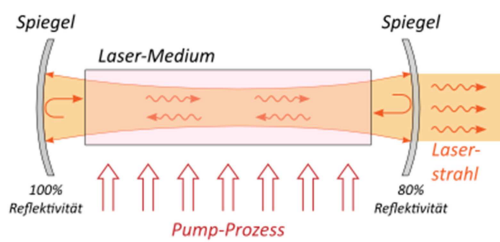


Prigogine konnte nun zeigen und theoretisch begründen, dass derartige „dissipative Strukturen“ (hexagonale Zellen, aber auch walzenartige Strukturen und andere Muster) den Wärmetransport von unten nach oben auf eine optimale Weise organisieren. Diese spontan („von selbst“) entstehenden Strukturen sorgen dafür, dass die Entropie (hier der Ausgleich von Wärmedifferenzen) maximal werden kann: sie arbeiten also nicht etwa der Entropie entgegen, sondern nutzen sie auf „raffinierte“ Weise, indem sie der Wärmeströmung den günstigsten Weg bahnen. Hierzu muss die Temperaturdifferenz zwischen Boden und Oberfläche einen kritischen Wert überschreiten, sodass die Wärme nicht mehr *ohne* gleichzeitigen *konvektiv geordneten Stofftransport* optimal nach oben hin entweichen kann, wobei sich Dichteunterschiede zwischen der Ober- und Unterseite der Flüssigkeit einstellen. Kurzum: Die Entstehung von dissipativer (also Energie „streuender“) Ordnung steht – fast paradox anmutend – geradezu „im Dienste“ der Entropie, die als solche Ordnung ja eher „zerstört“. Das System (wie das oben abgebildete Flüssigkeitsgefäß) muss dafür aber für Energiezufuhr und -abfuhr *offen* sein und den Entropiestrom gewissermaßen „durchlassen“ (Wärme exportieren) können.

Heute gilt die Bénard-Konvektion als ein Standardbeispiel für die Ausbildung dissipativer Strukturen in konvektiven, offenen Systemen fern vom thermodynamischen Gleichgewicht; vergleichbare Mechanismen liegen etwa vielen Strömungssystemen im Ozean, im Erdmantel, in der Atmosphäre (etwa bei rollen- oder schichtförmigen Wolkenformationen) oder auch der Granulation auf der Sonnenoberfläche zugrunde. Mit Hilfe von Prigogines Thermodynamik lassen sich zahllose, zunächst rätselhaft anmutende Phänomene einer spontanen raumzeitlichen Strukturbildung verstehen: wie etwa „chemische Uhren“, d. h. periodisch oszillierende chemische Reaktionen (z.B. iterierte Farbumschläge oder auch Streifenbildungen wie bei den „Liesegangschen Ringen“ oder der „Belousov-Zhabotinsky-Reaktion“). Den Konvektionszellen ähnelnde hexagonale Formen kann man auch bei der Bildung von Basaltsäulen beobachten, die

dadurch entstehen, dass so viel Energie an die Umgebung abgegeben wird, wie unter den gegebenen Umständen möglich ist.

Hermann Haken arbeitete, unabhängig von Prigogine und zunächst ohne Kenntnis von dessen Neufassung der Thermodynamik, an einem (anscheinend) ganz anderen Problem: Er kam aus der Laserforschung und bemühte sich um ein physikalisches Verständnis der Entstehung von „kohärentem Licht“ in einem Lasergerät. Bekanntlich besteht normales Licht (etwa Sonnenlicht oder das einer Taschenlampe) aus einem Gemisch von Lichtwellen (Moden) unterschiedlicher Wellenlänge, wodurch es völlig inkohärent ist. Haken konnte zeigen, dass es in einem Laser, der ebenfalls ein für Energieströme offenes System und auf eine bestimmte Weise eingerichtet ist, solange zu Wechselwirkungen zwischen dem Lichtfeld und den Laser-Atomen kommt, bis mit einem Male alle Atome miteinander „in Phase“ schwingen und Licht (Photonen) mit derselben Wellenlänge aussenden: das Verhalten der Atome wurde gewissermaßen „gleichgerichtet“ oder „versklavt“.



Schema eines Laser-Resonators

Wechselwirkung zwischen Lichtfeld und Materie (Laser-Atomen): (1) Einspeisung von Energie \Rightarrow (2) Die Atome werden energetisch angeregt \Rightarrow (3) Stimulierung eines Atoms A durch ein Photon P1 \Rightarrow (4) das stimulierte Atom A fällt in seinen Grundzustand zurück \Rightarrow (5) Atom A emittiert hierbei ein Photon P2 mit identischer Wellenlänge und Frequenz wie P1 \Rightarrow (6) P2 regt ein weiteres Atom B zur Emission eines Photons P3 an ... usw. (Kettenreaktion durch „Versklavung“)

Genauer: Laseraktive Atome einer bestimmten Substanz werden im Laser durch permanente Energiezufuhr im thermischen Ungleichgewicht gehalten. Überschreitet die Energiezufuhr einen kritischen Wert, wird aus normalem Licht Laserlicht, aus Unordnung Ordnung. Laserlicht zeichnet sich durch seine hohe Kohärenz aus: Es besteht praktisch nur aus einem einzigen unendlichen, monochromatischen Wellenzug, in dem die gesamte Energie des lichtelektrischen Feldes steckt. Die Ursache dafür liegt in der Koordination der Emissionen der Laseratome. Entscheidend dabei ist, dass diese Koordination *vom Laserlicht selbst geleistet* wird. Indem ein bestimmter Wellenzug

einen minimalen Vorteil gegenüber allen anderen erhält, sich zu verstärken, wird die Symmetrie der „gleichberechtigten“ Wellenzüge „gebrochen“ und die geringfügig bevorzugte Mode kann sehr rasch so amplifizieren, dass sie schlagartig alle anderen Laserelektronen dazu zwingt, ihre Photonenwellen in gleicher Phase mit ihr zu emittieren: dies nennt Haken „Versklavung“. Die Folge ist, dass das den Laser verlassende Licht schließlich aus nahezu vollkommen kohärenten Wellenzügen besteht. „Versklavung“ bedeutet übrigens nur, dass die stabilen Moden die Wirkung der instabilen Moden über nicht-lineare Wechselwirkungen begrenzen; keineswegs werden diese dadurch eliminiert. Vielmehr findet unter den kritischen Moden eine *Selektion* dergestalt statt, dass die „siegreiche“ Welle zum „Ordner“ wird, wie Haken sagt, und damit das Leuchtverhalten der Elektronen bestimmt. Umgekehrt bringen aber die Elektronen durch ihr gleichmäßiges Schwingen den Ordner erst hervor. Das Auftreten des Ordners und das kohärente Verhalten der atomaren Elektronen bedingen sich daher gegenseitig: beides „synergisiert“ (wie Haken später sagen wird).

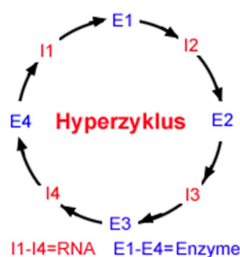
Welche Wellenlänge in diesem Prozess als „Ordner“ ausgewählt wird, das hängt u.a. davon ab, wie die Ausrichtung und wie groß der Abstand der beiden Spiegel an den Enden der Apparatur beschaffen ist, zwischen denen das Licht innerhalb des Lasermediums (einem Rubin etwa) hin und her reflektiert wird; ebenso ist die Leistung der Energiepumpe ein wichtiger Parameter. Die „Randbedingungen“, unter denen Laserlicht zustande kommen kann, müssen also exakt stimmen. Und wiederum, wie schon im Falle der Bénard-Konvektion, gibt es keine „Instanz“, die darüber entscheiden würde, auf welche Weise aus dem „chaotischen“ Lichtwellengemisch nach einem turbulenten Zwischenstadium schließlich das schöne Laserlicht „emergiert“. Das von Haken so genannte „Versklavungsprinzip“, das zugleich ein Selektionsprinzip ist, leitet den Prozess der „Koordination“ der verschiedenen Lichtmoden nicht etwa von außen her an, sondern „wirkt“ im Innern eines Selbstorganisationsprozesses, bringt mithin diesen nur auf den Begriff.

Hakens Absichten waren zu Beginn alles andere als „revolutionär“: Für ein Spezialproblem galt es eine spezielle Ableitung altbekannter Gleichungen zu entwickeln. Umso spektakulärer war dagegen Hakens schließliches Ergebnis zum Verständnis des Lasers, der heute als ein geradezu klassisches Beispiel für Selbstorganisation gilt.

Manfred Eigens Ziel hingegen war es Ende der 1960er / Anfang der 1970er Jahre, die Entstehung von präbiotischen Strukturen zu verstehen, die insbesondere der

Speicherung und Verarbeitung von Information in biomolekularen Systemen dienen – also wiederum die Lösung eines ganz anderen Problems. Letztlich wollte er wissen, wie Leben entsteht. Wie können bereits in einer rein „chemischen“ Phase sich alle wichtigen Bestandteile biologischer Makromoleküle, also Nukleotide und Aminosäuren, dergestalt zu potenziellen „Informationsträgern“ zusammenfügen, dass am Ende eine Art „primitives“ replikationsfähiges „Lebewesen“ entsteht?

Hierzu haben Eigen und seine Mitarbeiter ein Modell entwickeln und auch experimentell testen können, das zeigt, wie sich unter geeigneten Bedingungen innerhalb einer „Ursuppe“ spontan (also selbst organisiert) aus Nukleotiden bestimmte RNA-Moleküle (I1, I2, ... usw.) ausbilden, deren Abschrift anschließend Proteine (E1, E2, ... usw.) aus Aminosäuren hervorbringt, die ihrerseits wieder die Bildung von spezifischen RNA-Molekülen anstoßen (katalysieren).



In dieser ersten Phase kommt es zur Ausbildung kreisförmig geschlossener, selbstreproduktiver „Hyperzyklen“ (wie Eigen sagt), deren Wachstum „autokatalytisch“ geregelt ist und die in hohem Maße zur Korrektur von Replikationsfehlern und damit zur Erhaltung und Weitergabe komplexer Information befähigt sind. „Autokatalytische Hyperzyklen“ sind Zusammenschaltungen aus mehreren katalytischen Zyklen, die ihrerseits aus mehreren Enzymen zusammenschaltet sind: jeder dieser einzelnen Katalysezyklen (I_1 bis I_n) enthält zum einen die Information für seine eigene Reproduktion und zum andern Information für die Synthese eines spezifischen Enzyms (E), das die Tätigkeit des im Hyperzyklus jeweils nachfolgenden Katalysezyklus katalytisch unterstützt: im ganzen ergibt sich ein hyperzyklisch geschlossener Katalyse-„Ring“.

In einer zweiten Phase konkurrieren mehrere Hyperzyklen um Selektion (wiederum also stoßen wir auf das Selektionsprinzip, das nicht erst auf der Organismusstufe, sondern bereits auf der präbiotischen Stufe wirksam ist): Die Selektion geschieht hierbei äußerst scharf, d. h. sie ähnelt einem „Alles-oder-Nichts“-Verhalten. Diese Eigenschaften erlauben den miteinander konkurrierenden Hyperzyklen die Nutzung

bereits sehr geringer Selektionsvorteile. Indem die verschiedenen Hyperzyklen als „Quasispezies“ untereinander um die knappen Aminosäuren zur Produktion von Proteinen streiten, stimulieren sie wechselseitig ihre Evolution: „schwächere“ Hyperzyklen mutieren entweder vorteilhaft oder sie fallen auseinander und aus den freiwerdenden Bausteinen bilden sich neue Hyperzyklen mit neuen Eigenschaften. Voraussetzung ist einmal mehr die „Randbedingung“, dass die Umgebung ausreichend Bausteine und Energie als Ressourcen zur Verfügung stellt.

Obwohl Hyperzyklen noch keine „echten“ Lebewesen sind, weisen sie dennoch bereits einige von deren Eigenschaften auf wie Mutagenität, Selbstvermehrung, Weitergabe von Information und Stoffwechsel sowie Entwicklungsfähigkeit. Damit weist Eigens Konzept den Weg hin zu einer biochemischen Lösung jenes „Lebensrätsels“, auf die Kant gehofft hatte. An Eigens Hyperzyklen erinnert ein wenig auch die „Autopoiese“-Theorie von H. Maturana und F. Varela, die allerdings bereits auf der biotischen Ebene angesiedelt ist: Organismen werden als zirkulär geschlossene Systeme betrachtet, die sich im Prozess ihrer Aufrechterhaltung allein auf sich selbst beziehen (Selbstreferenzialität) und in deren innerem Netzwerk alle Komponenten, aus denen sie bestehen, *sich wechselseitig produzieren* (wobei natürlich auch ausdifferenzierte Subsysteme und Hierarchieebenen auftreten können). Gegenüber ihrer Umwelt sind sie offen für Energie- und Stoffströme (i. S. einer „strukturellen Koppelung“), die sie nach eigenen Regeln verarbeiten (Stoffwechsel). Das Prinzip der Autopoiese, das im Gegensatz zu dem der „Allopoiese“ (dem „Machen“) steht, verbindet alle Lebewesen miteinander, ungeachtet ihrer ansonsten unterschiedlichen Anatomie, Morphologie und Physiologie.

Was die Phase der Konkurrenz zwischen verschiedenen Hyperzyklen (als „Quasispezies“) anbetrifft, so ergeben sich hier gewisse Parallelen zu einer anderen „Wurzel“ der Selbstorganisation: Ebenfalls in den 1960er Jahren kamen in der Ökologie empirisch belastbare Vorstellungen von einer „Ko-Evolution“ verschiedener Spezies in Ökosystemen auf – ein Vorgang, der zur Stabilisierung und Entwicklung dieser Systeme wesentlich beiträgt. Eine besondere Bedeutung erlangte hier das Konzept der „Resilienz“ von Ökosystemen, das der Biologe Crawford S. Holling 1973 eingeführt hatte, um die Fähigkeit eines Ökosystems zu beschreiben, angesichts starker Umweltturbulenzen mit evolutionären Anpassungsprozessen zu reagieren: Ihre innere

Elastizität ermöglicht es Ökosystemen, diskontinuierliche Übergänge in neue Ordnungszustände zu vollziehen.

Abschließend wollen wir versuchen, die *Charakteristika selbstorganisierender Systeme* in abstrahierender Weise hervorzuheben. Was Bénard-Konvektion, Laser und Hyperzyklus miteinander verbindet, ist ein *spezifischer Systembegriff*, nach dem sich ein Selbstorganisationssystem durch *zwei wesentliche Merkmale* auszeichnet:

(1) Das System ist offen für Energie- und Materieflüsse: Es gibt in ihm im Unterschied zu geschlossenen Gleichgewichtssystemen kein „thermodynamisches Gleichgewicht“, sondern ein „*dynamisches Gleichgewicht*“, das den *globalen Ordnungszustand* des Systems definiert; wird dieser instabil, dann geht das System im Allgemeinen in einen anderen Ordnungszustand über: *Instabilitäten sind demnach der „Motor“ der Systemveränderung* (einen alternativen Begriff hatte bereits 1932 der Biologe Ludwig von Bertalanffy vorgeschlagen: er sprach bei offenen Systemen von einem „Fließgleichgewicht“); man könnte auch einer „Ordnungsbildung durch Schwankungen“ (Fluktuationen) sprechen, wobei Selbstorganisation die Fähigkeit von Systemen bedeutet, „hohe Gradienten“ gegenüber der Umwelt aufrechtzuerhalten.

(2) Das System ist „operational geschlossen“: Das System bestimmt die „Regeln“ (auch „Eigenwerte“ genannt) seiner Ordnung selbst, indem es *rekursiv* die Ergebnisse (Output) seiner internen Operationen zum Ausgangspunkt (Input) seines weiteren Operierens macht (siehe etwa Eigens „Hyperzyklen“): Das Verhalten des Systems wird nicht durch die Umwelt, sondern durch es selbst definiert, was eine spontane Bildung von Mustern oder „Ordern“ nach sich zieht.

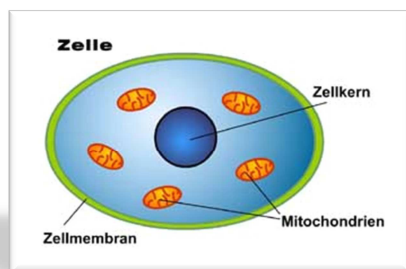
Mit dem veränderten Systembegriff kommt auch der Zeitdimension (dem „Werden“) eine erheblich größere Bedeutung gegenüber konservativen Strukturformen (dem „Sein“) zu: an die Stelle der skalaren und universellen Zeit tritt verstärkt die „Systemzeit“ als Zeitoperator. Damit wird die „Verzeitlichung der Natur“, die bereits von Darwin eingeleitet worden war (und auch in der modernen Kosmologie eine große Rolle spielt), sozusagen vollendet. Zudem werden nunmehr zirkuläre Prozesse wichtiger als lineare Prozesse: offene und polyzentrisch organisierte Systeme mit selbsterzeugter Hierarchie behaupten sich gegenüber einer Umwelt, deren Ressourcen aktiv genutzt und deren „Störungen“ (wo immer möglich) nach internen Regeln flexibel gehandhabt werden.

Eine besondere Rolle für die systemische Selbstorganisation spielen, wie bereits mehrmals betont, die **Randbedingungen**, deren Bedeutung hier gegenüber den „klassischen“ Naturwissenschaften erheblich gestärkt worden ist:

(a) In den „klassischen“ Naturwissenschaften zählen beliebige Randbedingungen zur Umwelt eines Systems (z. B. eines Lebewesens): die Naturgesetze „programmieren“ das Systemverhalten, während die Randbedingungen nur dessen situatives Verhalten beeinflussen; die klassische Physik war somit von der Erwartung getragen, dass sich auch komplexe dynamische Ordnung auf das Wirken relativ einfacher Naturgesetze zurückführen lasse.

(b) Bei selbstorganisierenden Systemen gehören spezifische („innere“) Randbedingungen zum System selbst: Die *Verfügung über seine „Ränder“* ermöglicht es dem System, seine Identität (also seine spezifische Operationsform) „autonom“ zu regulieren und zu erhalten. Nicht mehr die Umwelt strukturiert die Systeme, sondern die Systeme strukturieren sich selbst und in Grenzen auch die Umwelt (wie man bei Lebewesen beobachten kann, die ihr Habitat ihren Lebensbedürfnissen anpassen).

Ganz konkret kann ein „Rand“ etwa auch eine Membran sein, die den Energie- und Stoffaustausch einer lebenden Zelle mit der Umgebung (dem „äußeren Milieu“) regelt sowie ihr „inneres Milieu“ nach außen hin abgrenzt und schützt.



Oben haben wir drei verschiedene Konzepte kennengelernt, deren weitere Ausarbeitung nach ca. 1990 wir hier nicht verfolgen können. Entwickelt wurden sie in Hinsicht auf zunächst sehr verschieden erscheinende Problemlagen, deren Lösungen (Modelle) aber offenbar Anschlussmöglichkeiten bereithalten, sodass sie zu „Theoriekernen“ ein und desselben Paradigmas der Selbstorganisation werden konnten. Hierdurch wird das Phänomen der Selbstorganisation aus seiner einstigen Randstellung innerhalb der Forschung ins Zentrum des wissenschaftlichen Interesses gerückt.

Nachdem wir diese grundlegende Phase auf dem Wege zu dem Paradigma der Selbstorganisation durchlaufen haben, wenden wir uns nunmehr der **Phase II (ca. 1970 – ca. 1975)** zu, in der es relativ zügig zur gegenseitigen Wahrnehmung unserer „Pioniere“ und zur Analogisierung ihrer verschiedenen Problemansätze und Modelle gekommen ist. Das Wissen über die Vorgänge in dieser Phase beruht auf Interviews, die meine damaligen Kollegen (Günter Küppers und Wolfgang Krohn) und ich Mitte der 1980er Jahre mit Prigogine, Haken und Eigen im Rahmen eines an der Universität Bielefeld angesiedelten Forschungsprojekts zur Selbstorganisation durchgeführt haben. Dabei ergab sich folgendes Bild:

- (1) Die drei Forscher nehmen sich gegenseitig wahr und erkennen bald den *gemeinsamen epistemischen Gehalt* ihrer Forschungen.
- (2) Haken etwa diskutiert das plötzliche Auftreten des kohärenten Laserlichts in Analogie zur Thermodynamik des Phasenübergangs bei Prigogine.
- (3) Haken stellt zudem fest, dass seine Lasergleichungen die gleiche Struktur wie Eigens Beschreibung von zyklischen Enzym-Reaktionen aufweisen.
- (4) Auch Prigogine und Eigen führen die Analogie der Gleichungen auf *universelle Prinzipien* zurück, die den drei Konzepten gemeinsam sind: in sich selbst überlassenen Systemen fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht kommt es zu Selektion und Musterbildung.

Es schält sich allmählich ein „epistemischer Kern“ heraus, der den drei „Theorienkernen“ gemeinsam ist: Unterschiedliche fachspezifische Forschungsprogramme ließen sich nunmehr miteinander verknüpfen. Hermann Haken etwa sagte im Interview: „Das war sozusagen der Funke für mich. Wenn zwei ganz verschiedene Gebiete wie die Laserphysik und die Biomoleküle den gleichen Gleichungen genügen, dann zeigt das doch, dass hier viel tiefer liegende Prinzipien da sind als nur diese Gleichungen. Die sind ja vielleicht oberflächlich, aber dass [...] die Frage der Ausbildung von Ordnung in Systemen, die sich selbst überlassen sind, hier allerdings von außen mit Energie angetrieben werden, dass diese Frage doch grundsätzlich einheitlich behandelt werden muss.“ Kurzum: Die Entstehung von Ordnung wurde nicht mehr als ein Spezialproblem am Rande verschiedener Gebiete, sondern als ein zentrales Problem, dem man überall begegnet, begriffen. Über die Analogisierung der Konzepte wird aus unabhängig voneinander entstandenen Theorien die gerichtete Entwicklung hin zu einer neuen Theorie – und damit auch zu einem

transdisziplinären Paradigma der Selbstorganisation. Aber zunächst einmal versuchten sich zwei unserer drei Forscher an einer „Globalisierung“ ihres jeweiligen Konzepts.

Damit kommen wir zur **Phase III (ca. 1975 – ca. 1985)**, in der vor allem Prigogine und Haken eine Verallgemeinerung ihrer Modelle anstrebten. Zugleich ist dies die Phase der Popularisierung ihrer generalisierten Konzepte, die sowohl die Fach- als auch die allgemeine Öffentlichkeit mit dem neuen Paradigma bekannt machen und zu weiteren entsprechenden Forschungen in anderen Disziplinen aufrufen sollte, zu denen häufig auch Haken und Prigogine selbst angeregt haben. Nunmehr ging es darum, die Reichweite der neuen Konzepte durch die Suche nach weiteren Beispielen zu erkunden. Natürlich kam es in diesem Prozess auch zu einer gewissen Konkurrenz zwischen den beiden „Pionieren“.

Im Jahre 1979 veröffentlichte Ilya Prigogine sein äußerst erfolgreiches Buch „Vom Sein zum Werden“; 1981 dann Hermann Haken sein ebenfalls rasch zum Bestseller aufsteigendes Buch „Erfolgsgeheimnisse der Natur“ mit dem Untertitel „Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken“. Während Prigogine sein verallgemeinertes Konzept „Theorie dissipativer Strukturen“ nannte, war es bei Haken die „Synergetik“, in deren Zeichen alle möglichen Prozesse der Selbstorganisation von Ordnung – auf welchem Wissens- und Praxisfeld auch immer – zusammengefasst wurden. „Synergetik“ bezeichnet hier die Form des Zusammenwirkens von Elementen jeglicher Herkunft und Art (etwa Moleküle, Zellen oder auch Menschen), die innerhalb eines komplexen dynamischen Systems miteinander in Wechselwirkung treten. In „Erfolgsgeheimnisse der Natur“ (1981) behandelt Haken nämlich keineswegs bloß Naturphänomene, sondern das synergetische Prinzip, das er der Natur abgeschaut hatte, sollte auch auf gesellschaftliche und kulturelle Phänomene erfolgreich angewandt werden können: Im Buch werden daher nicht nur Phänomene der Physik und der biologischen Evolution sowie der Ontogenese behandelt, sondern auch solche der Ökonomie, der Politikwissenschaft (etwa der Meinungsbildung), der Kultur (Mode) und der Wissenschaftsentwicklung (etwa von „wissenschaftlichen Revolutionen“, was eine Selbstanwendung der Prinzipien der Synergetik auf ihre eigene Entstehung als der eines „revolutionären Konzepts“ einschließt). In den seit 1977 in rascher Folge erscheinenden Bänden „Springer Series in Synergetics“, deren Beiträge von zahlreichen Forschern rein wissenschaftlich gehalten sind, werden dann auch „Chemische Uhren“ und biologische Organismen, die Massenmedien, wirtschaftliche

Prozesse (wie Wettbewerb und Marktvorgänge), die Neurobiologie (etwa das Gehirnwachstum und neuronale Erregungsmuster) behandelt u.v.m. Wegweisend ist gleich der Titel des ersten Bandes „From the Laser zu Synergetics“.

Prigogine führt in seinem Buch „Vom Sein zum Werden“ (1979) ebenfalls Beispiele aus der Ökologie, der Ökonomie (etwa Aktienmarkt), der Stadtentwicklung (Brussaville-Projekt), der Wetterkunde (z.B. Wolken- und Hurrikan Bildung), der Verkehrsforschung (Staubildung), der Biologie (etwa im Hinblick auf das Sozialverhalten von Insekten wie Termiten) und sogar aus der Medizin (Tumorbildung) an. Allerdings geschehen solche Übertragungen zumeist nur auf einer metaphorischen Ebene – was dem Charakter einer Popularisierungskampagne ja durchaus gemäß ist.

Früher noch als diese beiden Erfolgsautoren hatte Manfred Eigen schon 1975, zusammen mit Ruth Winkler, das ebenfalls populäre Werk „Das Spiel – Naturgesetze steuern den Zufall“ publiziert, in dem allgemeine Betrachtungen zur Musterbildung, Spieltheorie, Sprache und Kunst vorgetragen werden. Eigen äußerte sich im Interview allerdings skeptisch bezüglich voreiliger Übertragungen naturwissenschaftlicher Konzepte auf andere Wissenschaftsbereiche: „In einem Gesellschaftssystem habe ich die Parameter nicht in der Hand. [...] Das hat interessante Anwendungen, aber ist mit Vorsicht zu genießen.“ Eine Vorsicht, die man erst recht in Bezug auf psychische und kulturelle Systeme walten lassen sollte, etwa auch auf religiöse und spirituelle Formbildungen.

Damit gelangen wir zur **Phase IV (seit ca. 1980)**, in der, vorbereitet durch die Popularisierung der „globalisierten“ Selbstorganisationskonzepte und ihre Propagierung als ein neues „transdisziplinäres Paradigma“, der *Anschluss* dieser Konzepte „nach außen“ und die Reaktion der Umwelt auf sie im Mittelpunkt steht: durch ihre *Übernahme* sei es (a) seitens der Sozial- und Geisteswissenschaften oder sei es (b) in außerwissenschaftlichen Bereichen. Dieser Prozess kann hier nur cursorisch angedeutet werden:

- (a) Eine positive Resonanz in den Sozial- und Geisteswissenschaften (wobei es natürlich auch ablehnende Stimmen gab) war fast sofort zu beobachten. Übernahmen, die gleichwohl auch fachspezifische Anpassungen einschließen, finden sich in Auswahl etwa in der
- Psychologie und Psychiatrie (Gestaltpsychologie: etwa in der Zeitschrift *Gestalt Theory*, ab 1983; Günter Schiepeks „Systemische Therapie“; George C.

Homans' Gruppendynamik; auch „Anti-Psychiatrie“ und Familientherapie: etwa Mara Selvini-Palazzoli, z.T. inspiriert durch Gregory Batesons „Ökologie des Geistes“ und „Double-bind“-Modell der Schizophrenie)

- Betriebswirtschaft (St. Galler Management-Schule: Hans Ulrich, Gilbert Probst u.a.)
 - Linguistik (Siegfried J. Schmidt: Konstruktivismus; außerdem narrative Textorganisation)
 - Rechtswissenschaft (Günter Teubner und Helmut Willke: soziale Selbststeuerung durch „reflexives Recht“)
 - Soziologie (Peter Hejl: Selbstreferenzialität sozialer Prozesse; Niklas Luhmann: Autopoiese)
 - „Theorie neuronaler Netzwerke“ und Entwicklung digitaler Lernsysteme (i. S. „künstlicher Intelligenz“, lernfähiger „Expertensysteme“ und „synergetischer Computer“: Bilderkennung und -verarbeitung).
- (b) Übernahmen in außerwissenschaftlichen Bereichen, die freilich zumeist bloß ein Verlangen nach der Bestätigung eigener Ideen befriedigten und kaum eine „produktive Umsetzung“ bedeuteten, findet man
- in den „Neuen sozialen Bewegungen“ (z. B. Umwelt-, Frauen- und „Neue Friedensbewegung“),
 - in der Selbsthilfebewegung („Do-it-yourself“- und „Neue Genossenschaftsbewegung“) sowie in der basisdemokratischen „Graswurzelbewegung“, bei Bürgerinitiativen, „Dritte-Welt“-Aktionsnetzen und „Zukunftswerkstätten“,
 - in „spirituellen“ und ähnlichen Anschlüssen: besonders in der „New Age“-Bewegung (eine starke Wirkung fanden hier etwa die Bücher von Fritjof Capra: „Wendezeit“, 1983, oder von Marilyn Ferguson: „Die sanfte Verschwörung“, 1982; gewisse Einflüsse gab es auch auf die Formulierung der „Gaia-Hypothese“ von James Lovelock und Lynn Margulis)
 - in der Formulierung kompletter „evolutionistischer“ Weltbilder (etwa bei Erich Jantsch: „Die Selbstorganisation des Universums“, 1979)

In den späten 1970er Jahren wurde das neue Konzept der Selbstorganisation bisweilen auch als zivilisationskritischer „Gegenentwurf“ zur bestehenden Gesellschaft genutzt zum Zwecke einer

- Kritik an Prozessen eines unregulierten (exponentiellen) Wachstums, die zu einer Zerstörung der Umwelt führen würden,
- Kritik am Zentralismus bürokratischer Versorgungssysteme, an großtechnologischen Zukunftsplanungen (Großflughäfen, atomare Abfallendlager, auch großräumige Stadtplanungen) oder an bestimmten Formen der „repräsentativen Volksvertretung“,
- Kritik an der Logik des Wettrüstens („Rüstungsspirale“).

Als Lösungen wurden sodann etwa vorgeschlagen: der „Dialog mit der Natur“ (in Anlehnung an einen Buchtitel von I. Prigogine und I. Stengers, 1981), „Selbststeuerung statt Fremdsteuerung“, die Dezentralisierung wichtiger Staatsfunktionen und infrastruktureller Leistungen statt Zentralismus, „Demokratie von unten“ sowie friedliche „Ko-Evolution statt Krieg“ u.a.m. Dies alles und mehr kann hier nicht im Detail erörtert oder gar in seiner Sinnhaftigkeit bewertet werden. Auf jeden Fall werden mit den genannten Kritikpunkten auch heute noch aktuelle Themen der gesellschaftspolitischen Debatte angesprochen.

Festzuhalten bleibt, dass die Diffusion des neuen Paradigmas der Selbstorganisation bis heute anhält, indem im Forschungsalltag immer neue Anwendungsbeispiele entdeckt und die Mechanismen selbstorganisierender Systeme teilweise sogar bewusst eingesetzt werden, um praktische Probleme zu lösen: etwa um komplexe Waren- und Verkehrsströme zu managen, hydrodynamische Verwirbelungen zu meistern oder dem gefährlichen Herzkammerflimmern entgegenzuwirken.

4. Epilog

Indem wir schließlich auf unserer Reise durch die „Urgeschichte der Selbstorganisation“ bei gesellschaftlichen, kulturellen und politischen Handlungs- und Konfliktfeldern angekommen sind, haben wir gewissermaßen den Rückweg zu dem Eingangszitat von Paul Valéry gefunden: zu den Bedrohungen durch ein Zuviel an Ordnung, aber auch an Unordnung. Somit möchte ich mit der Frage enden: „Was können wir von den Einsichten der Theorie der Selbstorganisation für unser gesellschaftliches Leben lernen?“ Die Antwort darauf soll hier nur skizzenhaft ausfallen und eher Hinweise zum eigenen Weiterdenken geben als endgültige und schlüssig begründete „Rezepte“

liefern. Wir können von der Theorie der Selbstorganisation vielleicht etwas lernen, das sich in folgende Thesen fassen lässt:

- Gesellschaften und Kulturen sind „umweltoffene“, aber „operational geschlossene“ Systeme, die ihre internen Strukturen (auch Wertorientierungen) immer wieder neu deuten und festlegen müssen.
- Funktionale soziale Organisationen (Verwaltung, Unternehmen) sind immer ein „Gemisch“ aus geplanter Organisation und (informeller) Selbstorganisation.
- Soziale Organisationen entwickeln stets auch eine *Eigendynamik*, der oft schwer gegenzusteuern ist, da sie als komplexe „Ganzheiten“ operieren (holistisches Verhalten).
- Geringfügige Ursachen können mitunter gewaltige (und unvorhersehbare) Auswirkungen nach sich ziehen (aufgrund nicht-linearer bzw. rekursiver Rückkopplungsprozesse).
- Je komplexer ein soziales System ist, desto störanfälliger ist es (besonders auch intrinsische Fluktuationen können zu Instabilitäten führen).
- Ein Netzwerk aus dezentralen Einheiten ist einer zentralen Systemorganisation oft überlegen (auch „flache Hierarchien“ sind häufig effizienter).
- Planungen sollten „kontextsensibel“ und „fehlerfreundlich“ angelegt sein (i. S. „reversibler Planung“ und „konditionaler Regulierung“, die nur die äußeren Randbedingungen festlegt und der Selbstorganisation autonome Spielräume belässt).

Ich bin mir bewusst, dass ich mit diesen Thesen viele neue erläuterungsbedürftige Begriffe einführe und neue weitreichende Fragen aufwerfe, die eine eingehende, hier jedoch nicht zu leistende Erörterung verdient hätten. Zumal an diesen Thesen eine sowohl gegenwartsdiagnostische als auch zukunftsorientierte Diskussion über die Ziele und Grundwerte unseres sozialen Zusammenlebens sowie über die Möglichkeiten einer „krisenfesten“ Organisation der soziopolitischen Verhältnisse anschließen könnte. Eben dies war auch das Anliegen des Symposiums „Vom Werden“: In den verschiedenen Vorträgen und Diskussionen ging es nicht zuletzt auch um den perspektivischen Aufweis von Chancen und Risiken in einer stets von Fluktuation und Selbstorganisation durchdrungenen (bedrohten?) und daher innovations- und wandlungsfähigen Gesellschaft. *Vom Werden* zu sprechen, bedeutet immer auch: *von*

der Zukunft zu sprechen: von den Möglichkeiten einer *Zukunftsgestaltung*, die uns die wissenschaftlichen Erkenntnisse über das Werden eröffnen.

Unsere Gesellschaftssysteme sind derzeit weltweit gekennzeichnet – um nicht zu sagen: *gezeichnet* – von Finanz- und Wirtschaftskrisen, einem insgesamt enthemmten Neoliberalismus, von nationalistischem Partikularismus, antidemokratischen und fundamentalistischen Bewegungen, einer schleichenden Erosion von grundlegenden Wertmustern (etwa humanistischen Werten und Idealen), von Flüchtlingsdramen und ökologischen Krisen (wie dem Klimawandel und Artenschwund) und von einer besorgniserregenden Verknappung überlebenswichtiger Ressourcen im Energie- und Rohstoffsektor sowie von Überbevölkerung in vielen Weltgegenden. Den „zentripetalen“ Bindekräften (vor allem verbindlichen Wertorientierungen, solidarischen Netzwerken sowie zentralen nationalen und supranationalen Institutionen) stemmen sich zunehmend „zentrifugale“ Auflösungskräfte entgegen, die die Vorboten eines tief greifenden soziokulturellen Wandels, ja Umbruchs, zu sein scheinen. Damit nun diese Vorboten nicht zu „apokalyptischen Reitern“ werden, sondern vielmehr Anlass geben, engagiert und mit Augenmaß an einer „neuen Weltverfassung“ zu arbeiten, die von mehr wechselseitigem Respekt, Solidarität, Wertvertrauen und Wohlstand für alle geprägt ist, dafür können die selbstorganisierenden Systeme der Natur, da sie als solche wertfrei sind, zwar nicht als ein normatives Vorbild dienen, wohl aber können die Erkenntnisse der Selbstorganisationsforschung (die ja auch soziale Systeme besser verstehbar gemacht hat), dabei helfen, den Kräften der sozialen und kulturellen Selbstorganisation dort ihren Lauf zu lassen, wo sie neue Optionen (Alternativen) und „utopische Horizonte“ eröffnen, deren Nutzung nicht ins Chaos abgleiten muss, sondern den Kopf „freier“ macht und neue „soziale Experimente“ auf den Weg bringt, welche die „zentripetale“ Kohäsion gerade durch die friedliche Koexistenz von Vielfalt (statt falscher Einheit) wieder zu stärken vermag.

Hierbei könnte auch der *Kunst*, die ja nicht zufällig ein essenzieller Bestandteil des Symposiums „Vom Werden“ gewesen ist, in all ihren ästhetischen Artikulationsformen eine wichtige „welt-reflexive“ Rolle zufallen: Und dies nicht nur, weil der Prozess der Genese von Kunstwerken und Performances bereits selbst einen Prozess der Selbstorganisation verkörpert (vollzogen zwischen dem Ausdrucksbedürfnis des Künstlers, den Besonderheiten des gewählten Sujets und dem „widerständigen“ Material, das es mit allem Geschick zu „meistern“ gilt, obwohl auch das werdende Werk

seinerseits den Künstler „formt“), sondern auch deshalb, weil das Freisein des Kunstwerks von pragmatischen Zwecken und seine formfokussierte Konzentration auf *neue Möglichkeiten* des Wahrnehmens und Erfahrens von Wirklichkeit über das allzu Gewohnte und Eingespielte hinausweist und so das Denken zu irritieren, zu provozieren und zu verändern vermag (worin man das „ästhetisch-evokative Potenzial“ der Kunst sehen kann). Von jeher gilt die Kunst als jener Bereich des Schöpferischen, in dem nicht nur etwas *gemacht* wird, sondern auch etwas *wird*, das auch den Künstler selbst überrascht und begeistert. – Hinzu kommen schließlich noch gewisse Artikulationsformen der Kunst, die direkt oder indirekt (vom Zeitgeist getrieben) auf die neuen Konzepte der Selbstorganisation reagieren: etwa der „Dekonstruktivismus“ in der Architektur (z. B. bei Rem Koolhaas und Zaha Hadid) oder bestimmte Weisen des postmodernen Schreibens, wo stark mit Rekurrenzen, Metaebenen und Zitaten gearbeitet bzw. gespielt wird (schon früh etwa bei Italo Calvino), dabei flankiert von „dekonstruktionistischen“ und „poststrukturalistischen“ Strömungen in der Philosophie (zu nennen sind insbesondere François Lyotard und Jacques Derrida).

Und auch damit diese „Experimente“ selbstorganisierter Freizügigkeit, dort wo sie als „soziale Experimente“ existenzwichtige Strukturen der Gesellschaft tangieren, nicht ungewollt aus dem Ruder laufen, auch hierfür können wir von den Ergebnissen der Selbstorganisationsforschung lernen, wie wir mit Komplexität und Instabilität besser umgehen können. – Gleichwohl bleibt in jedem Falle das Wort Paul Valéry's wie in „flammender Schrift“ an der Wand stehen: *„Diese Welt ist ständig durch zwei Dinge bedroht: Durch Ordnung und Unordnung“*. Aber diese doppelte Bedrohung kann auch als eine positive Herausforderung gelesen werden, kann somit auch als ein Weckruf zur engagierten Veränderung kritisch gewordener Weltverhältnisse wirksam werden! Und eben auch hier könnte sich das Paradigma der Selbstorganisation als ein *wirkmächtiges* Paradigma erweisen.

Literatur

Lucretius, *Welt aus Atomen*, Lateinisch und Deutsch, übers. von K. Büchner [Bibliothek der Alten Welt], Zürich 1956.

Paslack, Rainer: *Urgeschichte der Selbstorganisation – Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas*, Braunschweig/Wiesbaden 1991.

Paslack, Rainer: „Sagenhaftes Chaos: Der Ursprung der Welt im Mythos“, in: *Chaos und Ordnung – Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft*, hrsg. von Günter Küppers, Stuttgart, S. 1996, S. 11 ff.

Paslack, Rainer: „Vom Mythos zum Logos: Chaos und Selbstorganisation bei den Griechen“, in: *Chaos und Ordnung – Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft*, hrsg. von Günter Küppers, Stuttgart 1996, S. 28 ff.