

## Anwendungsmöglichkeiten der Selbstorganisation †

Werner Ebeling, Jan Freund, Frank Schweitzer

*Institut für Physik der Humboldt-Universität, Invalidenstrasse 110, 10115 Berlin*  
*e-mail: schweitzer@physik.hu-berlin.de*

### 1 Was ist Selbstorganisation?

Der Begriff *Selbstorganisation* umfaßt heute eine Reihe von Konzepten, wie *Synergetik* (Haken 1978), *Autopoiese* (Maturana/Varela 1987), *dissipative Strukturen* (Nicolis/Prigogine 1977), *selbst-referente Systeme* (Schmidt 1986), die trotz unterschiedlicher Ansatzpunkte eines gemeinsam haben: es handelt sich um Ansätze zur Beschreibung von komplexen dynamischen Systemen.

Ungeachtet der Vielzahl und Bandbreite von Phänomenen in Natur, Gesellschaft und Geisteswissenschaft, die heute im Rahmen der Selbstorganisationstheorie betrachtet werden, sind wir zur Zeit noch weit davon entfernt, von *einer* Selbstorganisationstheorie sprechen zu können. Vielmehr sind die verschiedenen Zweige innerhalb der Selbstorganisationstheorie erst dabei, gemeinsam zu einer Wissenschaft vom Komplexen zusammenzuwachsen. Bisher steht einem einheitlichen Selbstorganisations-Paradigma nicht nur ein unterschiedlicher Begriffsapparat in den verschiedenen Teilgebieten entgegen, sondern auch eine teilweise Inkompatibilität der Konzepte.

*Unter Selbstorganisation verstehen wir Prozesse, die, fern vom Gleichgewicht ablaufend, durch systemimmanente Triebkräfte zu komplexen Ordnungsstrukturen führen.*

Die Selbstorganisation ist sozusagen das Gegenstück zur allgemein beobachtbaren Tendenz des spontanen "Auseinanderfließens". Sie ist, wie jener Prozeß auch, ein irreversibler Prozeß; allerdings ein sehr spezieller, dafür aber für unsere Existenz absolut zentraler Prozeß. Irreversibilität ist die Voraussetzung für Selbstorganisation. Die physikalische Analyse hat gezeigt, daß Systeme nur unter gewissen Voraussetzungen zur Selbstorganisation in der Lage sind. Dazu gehört die Existenz eines überkritischen Abstandes vom Gleichgewicht und die Zuführung hochwertiger Energie (*Entropie-export*) (Ebeling/Engel/Feistel 1990).

Was lehren uns alltägliche Erfahrungen? Unsere Beobachtungen zeigen, daß unter ganz bestimmten Bedingungen Ordnung aus dem molekularen Chaos entstehen kann. Der gesamte Verlauf der Evolution, der von der Bildung von Galaxien, Sternen und Planeten bis hin zur Entstehung des Lebens und seiner Strukturierung in ökologische und soziale Gemeinschaften führte, ist ein Beweis dafür. In den letzten Jahren verstärkt sich die wissenschaftliche Einsicht, daß die komplizierte

---

†Der Beitrag erschien in der Fassung von 1995.

ökologisch-ökonomische und sozio-kulturelle Welt, in die der Mensch einbezogen ist, nur als ein komplexes dynamisches System verstanden werden kann. Auch in diesem System spielen Chaos und Phänomene der Selbstorganisation eine zentrale Rolle.

Im folgenden wollen wir auf ausgewählte Aspekte einer technischen Nutzung von Konzepten der Selbstorganisation eingehen. Die hier dargelegten Gedanken sind in einer Studie (Ebeling et al. 1993), welche im Rahmen des SFB 230 verfaßt wurde, ausführlicher behandelt. Da der genannten Arbeit ein umfangreiches Literaturverzeichnis angehängt ist, werden wir im folgenden auf Zitate verzichten; statt dessen verweisen wir für Referenzen generell auf diese Studie.

## 2 Material- und Bauelementprobleme

Dissipative Strukturen sind ein Standardprodukt selbstorganisierender Systeme in der Physik. *Dissipativ* heißt eigentlich zerstreuend, aber in diesem Zusammenhang bedeutet es "mit verallgemeinerten Reibungskräften versehen." Diese Systeme sind in der Lage Entropie zu exportieren. Dissipative Strukturen, wie sie durch Selbstorganisation in physikalischen, chemischen oder biologischen Systemen entstehen, weisen bestimmte Charakteristika auf, die die Konstruktion von *Energiewandlern* auf einer neuen technischen Grundlage möglich machen. In diesem Zusammenhang erwähnen wir neuartige Energiequellen, Explosionsmotoren, Katalyse, Sensoren, Stofftrennverfahren etc.

Ein Gebiet, auf dem die Entwicklungen der nichtlinearen Dynamik zunehmend an Bedeutung gewinnen, ist die *Materialforschung*. Einer bestimmten Klasse von Nichtgleichgewichtsphänomenen begegnet man bei der Bestrahlung verschiedener Materialien mit leistungsstarken Lasern oder Teilchenquellen, die es gestatten, innerhalb kürzester Zeit große Energiemengen in die Oberflächenschicht dieser Materialien einzubringen. Solche extremen Nichtgleichgewichtsbedingungen sind unter anderem sehr vielversprechend für die Synthese von neuen elektronischen Materialien. Als Beispiel erwähnen wir hier etwa die intrinsisch leitenden Polymere (ICP's).

*Spontane Oberflächenverformungen*, die zu regelmäßigen räumlichen Mustern auf der Oberfläche, zu Strömungen in angrenzenden Flüssigkeiten und zur Tropfenbildung führen können, sind wichtig in Gebieten wie der Pharmakologie, der Lebensmittelindustrie und bei der Ölgewinnung. Auch ein unter Spannung stehendes Material kann als ein aktives (gepumptes) Medium betrachtet werden, dem in jedem Raumpunkt freie Energie zugeführt wird. Bei überkritischen Belastungen (Pump-raten) organisiert sich das Material neu; es entstehen Risse, Spalten und andere neue Strukturen.

Die Untersuchung *granularer Stoffe*, wie Sand, ist zum einen vom rein physikalischen Standpunkt aus von großem Interesse; weicht doch ihr Verhalten sowohl von dem der Gase als auch dem der Flüssigkeiten ab. Die mikroskopische Dynamik der einzelnen Partikel ist nicht schlüssig geklärt. Verschiedene Modellierungsansätze führen bei Untersuchung mit Methoden der Molekulardynamik, i.e. numerische Simulation eines Vielteilchensystems, zu interessanten Beobachtungen bezüglich des kollektiven Verhaltens. Es ist evident, daß die beobachteten Strukturen nur als Nichtgleichgewichtserscheinungen zu verstehen sind. Die Bedeutung für technische Vorgänge liegt insbesondere in der Klärung von verfahrenstechnischen Optimierungsfragen, so z.B. bei Schütt- und Mischprozessen.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet von Prozessen der Selbstorganisation ist der *Korrosionsschutz*. Aufbringen korrosionsschützender Schichten kann durch Selbstorganisation sowohl gefördert, als auch behindert werden. Beim Aufbringen von Lacken auf Metall ist die Ausbildung von Zellen, durch Grenzflächeninstabilitäten beim Verdunsten des flüchtigen Lösungsmittels, ein unerwünschter Nebeneffekt. Die Homogenität der Lackflächen wird dadurch verringert, und es entstehen dünne Stellen, an denen die Korrosion angreifen kann.

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die *Tribotechnik*. Es hat sich gezeigt, daß sich unter Ausnutzung von Mechanismen der Selbstorganisation der Verschleiß von Lagern beträchtlich senken läßt. Ein Lager ist hierbei als offenes System zu betrachten, in das ständig hochwertige mechanische Energie hineingepumpt wird. Der Mechanismus der *selektiven Reibung* (Nullverschleiß), der in den 50er Jahren von Garkunov und Kragelski entdeckt worden ist, beruht darauf, daß mit einem Teil der Pumpenergie physiko-chemische Prozesse angetrieben werden, die den Verschleiß verringern oder aufheben.

Eine besondere Form der Strukturbildung beobachtet man auch in Halbleiterstrukturen, die sogenannten *lokalisierten Stromdichtefilamente*. Das Entstehen, Vergehen, Wandern und periodische Variationen der Breite dieser Stromfäden, das sogenannte "Atmen", sowie Teilung und Verschmelzung von Filamenten sind experimentell beobachtet und eingehend untersucht worden. Das Verständnis dieser Phänomene eröffnet Perspektiven zur Konstruktion neuartiger Oszillatoren.

Auf den Gebieten der Entwicklung von *Bauelementen* für die Mikro- und Optoelektronik zeichnen sich weitere Nutzungsmöglichkeiten ab, z.B. Verhinderung des Ausfalls von Bauelementen durch bessere Beherrschung von Durchbruchphänomenen, Erzeugung von Autowellen in Halbleitern, Holographische Bildverarbeitung in aktiven Halbleitern, Pumpen von Lichtleitern nach dem Vorbild der Nervenleitung, Konstruktion dynamischer Kurzzeitspeicher, die ähnlich wie das Gehirn arbeiten, Entwicklung einer funktionalen Elektronik auf der Grundlage selbstorganisierender Medien, Entwicklung eines Infrarotwandlers auf der Basis eines Gasentladungssystems.

### 3 Biotechnologische Anwendungen

Der *Biotechnologie* kommt ebenso wie der Mikroelektronik eine Rolle als Schlüsseltechnologie zu. Deren Ausbau ist notwendig, wenn statt bloßer Nachahmung der Natur biotische Evolution nach menschlicher Maßgabe erfolgen soll. Besonders Gen- und Enzymtechnik haben bereits weitgehende wirtschaftliche Auswirkungen, die offenkundig eine neue wissenschaftlich-technische Revolution einleiten. Für die wissenschaftliche Beherrschung der Prozesse der Biotechnologie sind die Erkenntnisse der Theorie der Selbstorganisation von einiger Bedeutung.

Eine typische Frage in diesem Zusammenhang lautet: Wenn ein System aus einer größeren Zahl wechselwirkender, ähnlicher und relativ selbständiger Teile besteht (z.B. eine Mikrobenpopulation) und wenn diese Teile die Fähigkeit langsamer Veränderung ihrer Eigenschaften haben (Mutationen, Lernprozesse), wie verändern sie dann ihre individuellen Eigenschaften, die des Gesamtsystems, und wie antwortet das System auf Änderung der Randbedingungen?

Erhebliche Veränderungen in der Chemieindustrie sind beim umfassenden Einsatz von *Enzymen* abzusehen. Diese Veränderung zeichnet sich heute allerdings erst als theoretische Möglichkeit ab, jedoch können die Fortschritte in der *Gentechnologie* und der Mikroelektronik hier schnell zu einem veränderten Bild führen, denn die Chemieindustrie der Gegenwart bewerkstelligt Stoffumwandlungen häufig bei hohen Temperaturen, d.h. unter Einsatz großer Energiemengen. Bei allen Erfolgen der Synthesechemie muß man einräumen, daß das Spektrum der mit ökonomisch vertretbarem Aufwand hergestellten Verbindungen relativ klein ist. Dagegen bewerkstelligen lebende Zellen sehr komplexe Synthesaufgaben mit hoher Geschwindigkeit, hoher Präzision und minimalem Energieeinsatz. Eine Schlüsselfunktion in der Zellchemie nehmen Nukleinsäureketten als Programme und Enzyme als Werkzeuge ein. Einen ersten Schritt zur Enzymchemie bildet die Gentechnologie. Zum einen stellt sie die Enzyme bereit, zum anderen entwickelt sie die erforderlichen experimentellen Techniken. Später wird diese Entwicklung sich stark selbstbeschleunigen, da die "Werkzeuge", d.h. die Enzyme, von der Produktion selbst geliefert werden können, ähnlich wie dieses bei der irdischen Biogenese gewesen sein mag.

Ein industrielles Kopieren der Zellchemie ist gegenwärtig noch nicht möglich; einerseits, weil die Funktion der Enzyme noch unzureichend bekannt ist, andererseits, weil die Herstellung von Enzymen noch sehr teuer ist. Eine zentrale Rolle in der biochemischen Regulation nehmen sogenannte *allosterische Enzyme* ein. Die Geschwindigkeit, mit der sie einen bestimmten Stoff in einen anderen umsetzen, wird durch die Konzentration eines dritten Stoffes bestimmt. Es besteht deshalb eine weitgehende Analogie zur Funktion des Transistors in elektronischen Schaltungen. Mathematisch kommt diese Analogie zwischen elektrischen und chemischen Netzwerken besonders deutlich in der Netzwerk-Thermodynamik zum Ausdruck. In diesem Sinne ist eine Zelle vergleichbar mit einem hochintegrierten Schaltkreis, und die technische Bedeutung der elektronischen Schaltkreise von heute deutet die Potenzen künftiger "chemischer Schaltkreise" an. Die Idee, *chemische Reaktionsnetze* nach dem Vorbild der Elektronik zu entwerfen, ist besonders von Conrad und Selkov entwickelt worden.

Im Gegensatz zu elektronischen Schaltkreisen, die als Festkörper realisiert sind, arbeiten biochemische Netzwerke in der flüssigen Phase. Die räumliche Anordnung der Bauelemente kann im letzteren Fall nur sehr bedingt vorgegeben werden, da in der Flüssigkeit Diffusions- und Konvektionsvorgänge die Eigenschaften des Gesamtsystems wesentlich mitbestimmen. Hier kann die Theorie der Selbstorganisation Aussagen darüber machen, unter welchen Bedingungen sich die gewünschte Funktion des Systems von selbst ergeben wird. Eine wichtige Grundfrage für diese Theorie bilden die gegenwärtigen Untersuchungen der Eigenschaften von *Reaktions-Diffusions-Systemen*, die in der ganzen Welt mit großer Intensität betrieben werden.

## 4 Informationstechnische Anwendungen

Als abschließenden Punkt betrachten wir Anwendungen auf Probleme der Informatik. Die heutige automatische Informationsverarbeitung beruht von der Theorie her auf dem Grundschema eines Rechners, das der geniale ungarische Physiker und Mathematiker John von Neumann entworfen

hat: Informationsprozesse werden in Sequenzen binärer logischer Operationen zerlegt. Zu den überzeugenden Vorteilen der *von-Neumann-Rechner* gehören Programmierbarkeit und Universalität. Die modernen von-Neumann-Rechner können zwar im Prinzip alles lösen, was programmierbar ist, aber sie bewältigen bestimmte Aufgaben nur mit großem Aufwand.

Als entscheidende Nachteile der heutigen informationsverarbeitenden Maschinen sind dabei der Mangel an Lernfähigkeit, Anpassungsfähigkeit und Effektivität, sowie die hohe Störanfälligkeit zu betrachten. Bei einem Rechenprozeß arbeiten in modernen Computern nur etwa 10% der Elemente. Weiterhin bedeutet die feste Verschaltung eine hohe Störanfälligkeit; jeder äußere Eingriff zerstört das System.

Komplexe Probleme werden im Rahmen der *Informationsverarbeitung* dagegen *in Organismen* mühelos gelöst. Erkennungs- und Entscheidungsprobleme werden sogar von primitiven Organismen gemeistert, Anpassungsfähigkeit und Lernfähigkeit sind gut entwickelt und durch Parallelverarbeitung wird eine geringe Störanfälligkeit erreicht. Die Nachteile der biologischen Informationsverarbeitung sind dagegen ihre Langsamkeit (Signalgeschwindigkeit 10–100m/s) und das Fehlen von Universalität und Programmierbarkeit.

Von diesen Überlegungen ausgehend wurde in vielen hochindustrialisierten Ländern die Aufgabe gestellt, einen neuen Typ von Informationssystemen zu entwickeln, der die von-Neumann-Computer in geeigneter Weise ergänzt. Wir betonen: *Ergänzt, nicht ersetzt*. Diese sog. *Netzwerkmaschinen* orientieren sich am Vorbild der Neuronennetzwerke, ohne deren Struktur im Detail nachahmen zu wollen. Ein Fernziel der Arbeit an Netzwerkmaschinen besteht darin, zur Entwicklung eines neuen Rechnertyps, der in der internationalen Literatur häufig als "*Neuronencomputer*" bezeichnet wird, beizutragen. Nach unserer Auffassung gibt es starke Argumente dafür, daß dieser neue Typ der Informationsverarbeitung sehr aussichtsreich ist.

Heute beruht eine große Zahl von Zugängen zur Mustererkennung auf *neuronalen Netzen*. Die meisten Arbeiten beruhen auf dem Modell für Neuronen als bistabile Schaltelemente und dem Konzept des assoziativen Gedächtnisses und sind verbunden mit dem Spinglasmodell. Der Zugang zur Mustererkennung als dynamischer Prozeß in einem synergetischen System wurde von Haken 1987 vorgeschlagen. Lernen wird dabei als Reproduktion der von den Input-Mustern bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung durch Messung der Korrelationsfunktion des Inputs und Vergleich mit intern produzierten Mustern interpretiert.

Die *Speicherung von Information* spielt eine zentrale Rolle bei der Informationsverarbeitung lebender Systeme. In diesem Zusammenhang sind besonders assoziative Speicher interessant. Die von ihnen gespeicherten Informationen werden durch Eingabe einer unvollständigen bzw. teilweise falschen Information abgefragt. Erinnert dieser Stimulus hinreichend stark an einen Speicherinhalt, so wird dieser als vollständige bzw. korrigierte Information ausgegeben. Zu solcher Assoziativität sind die Zentralnervensysteme vieler entwickelter Lebewesen in der Lage, in besonders vollkommener Art ist sie dem menschlichen Gehirn eigen. Demgegenüber arbeiten die heute üblichen numerischen Speicher mit Adressen, also nicht assoziativ.

Interessante Anwendungen von Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution sind dar über hinaus bei der *Roboterentwicklung* denkbar. Der Mensch überläßt dem Automaten immer mehr Einzelent-

scheidungen, die Maschinen gewinnen eine gewisse "Handlungsfreiheit". Das Produktionssystem insgesamt erhält damit mehr innere Freiheitsgrade (im physikalischen wie auch im systemtheoretischen Sinne).

Ein großes Feld für die Anwendungen von Evolutionsprinzipien bietet auch das aktuelle Problem der *Automatisierung* von Entwurfsprozessen und der *Optimierung* von Entwürfen. Optimierung ist ohne Zweifel eine der Hauptaufgaben der modernen Ökonomie und Technologie. Die Beispiele der Nutzung von Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution für die Lösung von Optimierungsaufgaben verdanken wir besonders den Arbeiten von Holland, Rechenberg und Schwefel, die eine große Anzahl interessanter technischer Probleme erfolgreich behandelt haben. Im Zusammenhang mit solchen *evolutionären Algorithmen* ist auch die Klasse der *genetischen Algorithmen* zu nennen.

## Literatur

- W. Ebeling, A. Engel, R. Feistel: *Physik der Evolutionsprozesse*. Berlin 1990.
- W. Ebeling, J. Freund, H. Malchow, A. Scharnhorst, F. Schweitzer, O. Steuernagel: Anwendungsmöglichkeiten von Prinzipien der Selbstorganisation (Studie für den SFB 230). In: *Analyse & Bewertung Zukünftiger Technologien: Technologieanalyse Nichtlineare Dynamik*, (Hrsg. VDI-Technologiezentrum und DECHEMA im Auftrage des BMFT), Düsseldorf, 1993, Anhang 2, 66 S.
- H. Haken: *Synergetics. An Introduction*. Berlin/Heidelberg/New York 1978.
- H.R. Maturana, F.J. Varela: *Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens*, Bern/München 1987.
- G. Nicolis, I. Prigogine: *Selforganization in Non-equilibrium System*, New York 1977.
- S. J. Schmidt (Hrsg.): *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*. Frankfurt a.M. 1986.