

ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN VON PRINZIPIEN DER SELBSTORGANISATION

von

*Werner Ebeling, Jan Freund,
Horst Malchow, Andrea Scharnhorst,
Frank Schweitzer, Ole Steuernagel*

**Institut für Theoretische Physik
Humboldt–Universität zu Berlin**

Studie

**Teilprojekt E2/YE1
SFB 230**

Berlin
Juni 1993

Inhaltsverzeichnis

1	Selbstorganisation: Auf dem Weg zu einer Wissenschaft vom Komplexen	2
1.1	Zu Geschichte und Anwendungen der Selbstorganisationstheorie	2
1.2	Auf dem Weg zu einer einheitlichen Selbstorganisationstheorie	5
1.3	Unser Verständnis von Selbstorganisation	6
2	Zeitliche, räumliche und raumzeitliche Strukturbildung	9
2.1	Musterbildung in räumlich ausgedehnten Systemen	9
2.2	Verständnis und Kontrolle chaotischer Systeme	11
3	Technische Anwendungen	13
3.1	Energetik	13
3.2	Material- und Bauelemente-Probleme	14
3.3	Probleme der Biotechnologie	17
4	Anwendungen in Optimierung und Informatik	20
4.1	Automatisierung und Optimierung	20
4.2	Speicherung von Information	24
4.3	Netzwerkmaschinen und Neuronenrechner	27
5	Prozesse in sozialen und ökologischen Systemen aus der Sicht der Selbstorganisation	34
5.1	Phänomenologische Kinetik	34
5.2	Thermodynamische Beschreibung	35
5.3	Deterministische Dynamik	36
5.4	Stochastische Dynamik	36
5.5	Mögliche Anwendungen und Beispiele	37
6	Abschließende Bemerkungen	42
7	Literaturverzeichnis	43

Kapitel 1

Selbstorganisation: Auf dem Weg zu einer Wissenschaft vom Komplexen

Der Begriff Selbstorganisation umfaßt heute eine Reihe von Konzepten, wie Synergetik, Autopoiese, dissipative Strukturen, selbstreferente Systeme, die trotz unterschiedlicher Ansatzpunkte eines gemeinsam haben: es handelt sich um Ansätze zur Beschreibung von komplexen dynamischen Systemen.

1.1 Zu Geschichte und Anwendungen der Selbstorganisationstheorie

Die historischen Wurzeln der modernen Theorie der Selbstorganisation reichen zurück bis in das 18. und das 19. Jahrhundert (vgl. dazu Paslack 1991; Krohn, Krug und Küppers 1992). Allerdings lassen sich auch frühere naturphilosophische Ansichten im Sinne der Selbstorganisationstheorie verstehen (Kessler 1992).

In seiner *Kritik der Urteilskraft* von 1790 gebraucht Kant den Begriff der Selbstorganisation, um die Zweckfreiheit eines Organismus zu erklären (Krohn und Küppers 1992). In der romantischen Naturphilosophie war es vor allem Schelling, der den Gedanken der Selbstorganisation thematisierte. Es wird allerdings kontrovers diskutiert, inwieweit seine Auffassungen von Selbstorganisation mit der heutigen Selbstorganisationstheorie kompatibel sind (Heuser–Kessler 1986; Küppers 1992). Weitere Ansätze einer Naturbeschreibung, in der der Selbstorganisationsgedanke, zum Teil als eigenständiges Konzept, zum Teil beeinflusst durch Schelling, Verwendung findet, lassen sich im 19. Jahrhundert unter anderem bei Goethe (Schweitzer 1992), bei Ritter (Bartel 1992) oder bei Fechner (Heidelberger 1990) aufzeigen, ohne daß deren Gedanken jedoch prägend für die Hauptrichtungen der weiteren Wissenschaftsentwicklung wurden.

Im 20. Jahrhundert gewinnt der Selbstorganisationsansatz vor allem seit den 40er Jahren an Bedeutung (vgl. Paslack und Knost 1990), nachdem durch die Naturwissenschaft

wesentliche Grundlagen für das Verständnis komplexer Phänomene ausgearbeitet wurden; so zum Beispiel durch Arbeiten zur Autokatalyse in der physikalischen Chemie, zu Stabilitätsbedingungen dynamischer Systeme in der Mathematik, zur Gestaltwahrnehmung in der Psychologie, zur Morphogenese in der Biologie.

Insbesondere sind hier die Vorläuferarbeiten von *Poincaré, Bénard, Rayleigh, Lyapunov, Duffing, van der Pol, Mandelstam, Andronov, Witt, Chaitin, Schrödinger, Prigogine und Bertalanffy* zu nennen, ohne die die moderne Selbstorganisationstheorie undenkbar wäre.

Die Selbstorganisationstheorie der Gegenwart wurde seit 1960 durch verschiedene Entwicklungslinien geprägt, die sich zunächst im wesentlichen unabhängig voneinander ausbildeten.

Als Beginn der modernen Selbstorganisationsforschung kann man, nach wichtigen Vorarbeiten von Bertalanffy, Heinz von Foersters Artikel "On Self-Organizing Systems and their Environment" ansehen (Foerster 1960), in der mit Hilfe der Shannonschen Informationsentropie ein Maß für die Zunahme von Ordnung im System gefunden wird. Die von Foerster begründete kybernetische Richtung innerhalb der Selbstorganisationstheorie gewann auch entscheidenden Einfluß auf die moderne biologische Systemtheorie und den Konstruktivismus.

Seit Ende der 60er Jahre ist die Theorie dissipativer Strukturbildung ein wichtiger Forschungsschwerpunkt innerhalb der Selbstorganisationstheorie. Ilya Prigogine, der bereits Mitte der 40er Jahre die Grundprinzipien der Thermodynamik irreversibler Prozesse ausarbeitete, wandte sich zu dieser Zeit der Frage nach der Entstehung von Ordnung in dissipativen Systemen zu und legte 1971 eine thermodynamisch fundierte Theorie dazu vor (Prigogine und Glansdorff 1971).

Im gleichen Jahr erschienen auch zwei andere Arbeiten, mit denen wesentliche Richtungen innerhalb der modernen, naturwissenschaftlich orientierten, Selbstorganisationstheorie begründet wurden. Hermann Haken, der seit den 60er Jahren anhand des Lasers die Entstehung kohärenten Verhaltens aus dem Zusammenwirken unabhängiger Teile studierte, formulierte 1971 gemeinsam mit Graham die Ansätze einer allgemeinen Theorie der Synergetik (Haken und Graham 1971), die in der Folgezeit eine sehr umfangreiche Erweiterung und Anwendung erfahren hat (vgl. dazu u.a. Haken 1978, 1983 und die von ihm herausgegebene Reihe *Springer Series in Synergetics*).

Manfred Eigen zeigte, daß Selbstorganisation durch Selektion und autokatalytische Reaktionen auch bei der Entstehung organischer Makromoleküle eine Rolle spielte (Eigen 1971), wobei Hyperzyklen als Bestandteil der präbiotischen Evolution die Grundlage für die Erhaltung und Weitergabe von Information bilden (Eigen und Schuster 1979).

Einen anders gearteten Zugang zum Problem der Selbstorganisation verfolgten die Neurobiologen Humberto Maturana und Francisco Varela, die sich Anfang der 70er Jahre der Frage nach den Organisationsprinzipien des Lebendigen zuwandten. Die von ihnen begründete Autopoiese-Theorie beschreibt Lebewesen als strukturdeterminiert, selbstreferentiell, selbsterzeugend und selbsterhaltend und propagiert damit eine modifizierte Auffassung von Evolution (Maturana und Varela 1987).

Auch die sich seit dem letzten Jahrzehnt stark entwickelnde Chaos-Theorie lieferte wichtige Beiträge zum Verständnis der Entstehung von Ordnung in komplexen Systemen, indem sie Bedingungen für das chaotische Verhalten deterministischer Systeme und damit Grenzen für deren Vorhersagbarkeit angeben konnte. Das Studium der fraktalen Eigenschaften der Natur führte weiterhin zu der Einsicht, daß auch zwischen den euklidischen Dimensionen Strukturbildung möglich ist, und förderte damit ein neues Verständnis dessen, was als Ordnung in der Natur erfaßt werden kann (vgl. Mandelbrot 1982).

Mit den genannten Richtungen sind noch nicht alle Ansätze umrissen, die Einfluß auf die heutige Selbstorganisationstheorie genommen haben. Ergänzend zu nennen wären an dieser Stelle auch die Beiträge der modernen Ökologie (Elastische Ökosysteme, Koevolution) zur heutigen Theorie komplexer Systeme.

Seit Mitte der 70er Jahre bemerken wir, daß die Ideen zur Selbstorganisation, die zunächst weitgehend unabhängig und eingegrenzt auf bestimmte fachspezifische Fragestellungen entwickelt worden waren, langsam generalisiert und auf andere Wissenschaftsgebiete übertragen wurden.

Dies wird daraus ersichtlich, daß die Begründer der verschiedenen Richtungen innerhalb der Selbstorganisation ihre Ansätze interdisziplinär weiterverfolgen. Bücher, wie *Vom Sein zum Werden* (Prigogine 1979), *Dialog mit der Natur* (Prigogine und Stengers 1986) oder die *Erforschung des Komplexen* (Nicolis und Prigogine 1987), *Das Spiel – Naturgesetze steuern den Zufall* (Eigen und Winkler 1975), *Erfolgsgeheimnisse der Natur* (Haken 1988), *Der Baum der Erkenntnis – Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens* (Maturana und Varela 1987), *Chaos, Ordnung und Information* (Ebeling 1989) behandeln neben den für die jeweilige Richtung paradigmatischen Beispielen auch bereits Verallgemeinerungen im Hinblick auf eine generalisierte Selbstorganisationstheorie und unternehmen den Versuch, Phänomene anderer Wissenschaftsgebiete mit den entwickelten Methoden zu erklären.

Eine zweite Richtung zeichnet sich dadurch aus, daß Fachwissenschaftler aus Gebieten, die nicht vornehmlich an der Fundierung der Selbstorganisationstheorie beteiligt waren, die neuen Gedanken aufgreifen und auf ihr Fachgebiet anwenden, sie dabei konstruktiv erweitern und auch Annäherungen zwischen den unterschiedlichen Standpunkten ermöglichen.

Aus der Fülle der Beispiele, in denen die Anwendung der Selbstorganisationstheorie wichtige Einsichten in die Entstehung von Komplexität außerhalb von Physik, Chemie, Biologie ermöglicht, seien hier einige genannt.

- Die Autopoiese-Theorie erwies sich in Erweiterungen als fruchtbarer Ansatz für die Beschreibung von sozialen Systemen als Kommunikationsnetzwerke (Luhmann 1987, 1988, 1990).
- Darüber hinaus können auch die Literatur (Schmidt 1992) oder die Wissenschaft (Krohn und Küppers 1989) als sich selbst organisierende soziale Systeme verstanden werden, die über Randbildung und Selbstreferenz eine eigenständige Dynamik entwickeln.

- Das Rechtssystem kann ebenfalls als ein autopoietisches System aufgefaßt werden (Teubner 1989; Ladeur 1992), ebenso die moderne Gesellschaftsplanung (Willke 1989).
- Die Kognitionstheorie wendet die Autopoiese–Theorie auf das Gehirn an und zeigt im Rahmen eines konstruktivistischen Ansatzes, wie Information und Bedeutung über Selbstorganisationsprozesse entstehen können (vgl. Roth 1992).
- Die Gestaltpsychologie profitiert von der Selbstorganisationstheorie durch die Neufassung des Wahrnehmungsproblems über die Theorie neuronaler Netze (Stadler und Kruse 1986; Haken und Stadler 1990) In der klinischen Psychologie basiert zum Beispiel die Systemische Familientherapie auf der Theorie selbstreferenter Systeme, die sich selbst organisieren und nur über Störungen in einen neuen Ordnungszustand gelangen können (vgl. Tschacher 1990). Auch die Entstehung psychischer Krankheiten läßt sich dank der Selbstorganisationstheorie besser verstehen (Simon 1992; Schiepek und Schoppek 1991).
- In der Soziologie wird versucht, mit Methoden der Synergetik quantitative Aussagen über die soziale Strukturierung oder über Meinungsbildungsprozesse zu gewinnen (z.B. Ulrich und Probst 1984; Weidlich und Haag 1983, 1988).
- Im Rahmen der Regionalwissenschaft kann die Selbstorganisationstheorie einen Beitrag zum Verständnis der Herausbildung von Wegesystemen und Transportnetzen, aber auch von Ballungsgebieten leisten und Methoden zur Charakterisierung der urbanen Strukturen bereitstellen (vgl. z.B. Schaur 1988; Frankhauser 1988).
- In der Ökonomie wird unter anderem das Verständnis von Management durch die Selbstorganisationstheorie verändert. Auch komplexe ökonomische Systeme lassen sich demnach nicht hierarchisch kontrollieren; vielmehr muß die Eigendynamik des Systems erkannt und ausgenutzt werden (Bierfelder 1991; Malik 1989).
- Auch in der Linguistik und in der Wissenschaftsgeschichte werden Ideen aus der Selbstorganisationstheorie zunehmend verwendet.

1.2 Auf dem Weg zu einer einheitlichen Selbstorganisationstheorie

Ungeachtet der Vielzahl und Bandbreite von Phänomenen in Natur, Gesellschaft und Geisteswissenschaft, die heute im Rahmen der Selbstorganisationstheorie diskutiert und zum Teil auch erklärt 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.

Offene Fragen innerhalb der Physik betreffen zum Beispiel das Verhältnis der Synergetik zur Thermodynamik irreversibler Prozesse oder Identifikationsstrategien für Ordnungsparameter.

Ein weiteres grundlegendes Problem besteht heute auch in der Beziehung zwischen den Ansätzen, die vornehmlich durch die Autopoiese-Konzeption bestimmt sind, und denen, deren Selbstorganisationsbegriff sich mehr am physikalischen Herangehen orientiert. Dies betrifft zum Beispiel die Frage nach dem Verhältnis von Strukturbildung (als Selbstorganisation vorhandener Elemente) zur Systembildung, bei der neben der Selbstorganisation auch die Selbsterschaffung der Elemente und die Konstitution des Systems als Ganzheit durch Herausbildung eines Randes berücksichtigt werden muß.

Auf dem Wege zu einer Wissenschaft vom Komplexen ist die Interdisziplinarität des wissenschaftlichen Diskurses gefragt. Insbesondere die Philosophie ist aufgefordert, diesen Prozeß durch Begriffsbestimmung und –synthese, durch eine Neubestimmung des Verhältnisses von Reduktionismus und Holismus unter dem Aspekt der Selbstorganisation, sowie durch Diskussion der epistemologischen Konsequenzen aus der Anwendung der Selbstorganisationstheorie auf den Erkenntnisprozeß zu unterstützen.

Heute existiert bereits eine Reihe von Möglichkeiten, den interdisziplinären Dialog über das sich herausbildende einheitliche Paradigma **Selbstorganisation** zu führen. Neben den zahlreicher werdenden Sammelbänden, die Fachwissenschaftler und Philosophen zu diesem Thema vereinigen (z.B. Schmidt (Hrsg.) 1986, 1992; Ebeling, Peschel und Weidlich 1991; Krohn und Küppers (Hrsg.) 1990, 1992) sei auch auf Niedersen und Pohlmann (1990, 1991) sowie Krohn, Krug und Küppers (1992) verwiesen.

1.3 Unser Verständnis von Selbstorganisation

Im Anschluß an die allgemeinen Ausführungen sollen an dieser Stelle unsere Vorstellungen von Selbstorganisation näher umrissen und damit zugleich die Erwartungen an diese Studie eingegrenzt werden.

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 (Entropieexport) (vgl. Nicolis und Prigogine 1987; Ebeling 1989).

Von besonderer Bedeutung ist weiterhin die Erkenntnis, daß komplizierte Dynamik

nicht a priori zu ungeordneten Strukturen führt. Nimmt man die Entropie als Ordnungsmaß, so können z.B. auch turbulente Strömungen einen relativ hohen Ordnungsgrad besitzen. Selbstorganisation ist eine, oder vielleicht sogar *die* Komponente der Evolution von Komplexität. So wie die Irreversibilität eine Folge des “kreativen Charakters” der mechanischen Bewegungen ist, nämlich ihrer Tendenz zum Auseinanderlaufen, zur Divergenz, zur Vielfalt, so bildet die Selbstorganisation eine neue Form der kreativen Potenzen der Materie.

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 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 Rahmen unserer Selbstorganisationsauffassung können die vielfältigen ökologisch-ökonomischen und sozio-kulturellen Prozesse, die wir mit gestalten und erleiden, von zwei verschiedenen Seiten aus gesehen werden. Bezieht man den Menschen als immanenten Teil in diese Systeme ein, so kann man die ablaufenden Prozesse als Selbstorganisationsprozesse auffassen. Die Alternative wäre Fremdsteuerung nach einem von außen vorgegebenen Programm. Nimmt man den Menschen als bewußt handelndes Subjekt aus dem System heraus, so kann er – zumindest bis zu einem gewissen Grade – als “Organisator” der Prozesse im System betrachtet werden. Beide Betrachtungsweisen sind komplementär. Vom Standpunkt der Selbstorganisationstheorie aus kann das Gesamtsystem als eine komplexe dynamische Einheit betrachtet werden. Um die darin ablaufenden Selbstorganisationsprozesse zu verstehen, muß aber von vornherein deutlich gemacht werden, daß ein solches Vorhaben nur interdisziplinär, durch Kooperation zwischen Wissenschaftlern der verschiedensten Gebiete, bewältigt werden kann. Dem Naturwissenschaftler kommt in einem solchen Ensemble die Rolle des Statikers beim Bau eines Gebäudes zu, er ist für die mathematische Modellierung und für Berechnungen zuständig, er sollte sich jedoch in die Fragen von Funktion und Zweck nicht allzusehr einmischen.

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit ausgewählten Aspekten der technischen Nutzung der Selbstorganisation, beschreibt aber auch ansatzweise Konsequenzen für die Beschreibung von sozialen und ökologischen Systemen. Es ist eine Tatsache, daß nur eine kleine Anzahl von wissenschaftlichen Entdeckungen Basisinnovationen auslösen kann; viele Forschungsergebnisse erweisen sich im Nachhinein als technisch nicht oder sehr beschränkt nutzbar. Wir halten es deshalb für wichtig, Trends in der Grundlagenforschung aufmerksam zu verfolgen, um ihre Bedeutung für eine eventuelle spätere Applikation in der Technik abzuschätzen.

In diesem Zusammenhang sollten auch die nachfolgenden Betrachtungen über die Nutzung von Prinzipien der Selbstorganisation, sowie von Strategien der Evolution gesehen

werden. Um bei der Fülle der vorliegenden Literatur zur Selbstorganisation wenigstens ein einigermaßen überblickbares Feld abzugrenzen, haben wir uns folgende Einschränkungen auferlegt:

1. Wir diskutieren im folgenden diejenigen Aspekte der Selbstorganisation, die aus dem physikalisch orientierten Verständnis des Begriffes folgen. Auf Anwendungsmöglichkeiten, die im Zusammenhang mit der Autopoiese-Konzeption stehen, wurde im Abschnitt 1.1. dieses Kapitels kurz eingegangen.
2. Die von uns diskutierten Anwendungsmöglichkeiten stellen eine Auswahl dar; sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Aufgrund der großen Materialfülle können viele Beispiele nicht ausführlicher diskutiert, sondern nur angerissen werden.
3. Bei der Literatúrauswahl kann ebenfalls kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Wir haben uns bemüht, vor allem auch auf Arbeiten aus dem osteuropäischen Raum zu verweisen, da diese im Westen leider oft nicht bekannt sind. Über die im Text zitierten Referenzen hinaus enthält das Literaturverzeichnis eine Fülle weiterer Arbeiten, die im Zusammenhang mit den von uns diskutierten Fragestellungen stehen. In gewisser Hinsicht sind die Ausführungen in den Kapiteln 1–6 nur als Einführung in die Originalarbeiten zu verstehen. Unsere Hinweise und Kommentare können das Studium der primären Quellen in keiner Weise ersetzen.
4. Wir haben weiterhin darauf verzichtet, diejenigen Anwendungen der Selbstorganisationstheorie zu diskutieren, auf die sich die Arbeit des SFB 230 ohnehin konzentriert und die wir deshalb als gut bekannt vorausgesetzt haben.

Wir verstehen unsere Studie als ein Diskussionsmaterial, das weniger einen vollständigen Stand der Anwendungsmöglichkeiten dokumentieren soll, als vielmehr durch die Breite der Beispiele zur Beschäftigung mit der Selbstorganisationstheorie anregen will. Eine Fortsetzung oder Ergänzung dieser Studie würden die Autoren ausdrücklich begrüßen.

Kapitel 2

Zeitliche, räumliche und raumzeitliche Strukturbildung

Phänomene der Musterbildung in räumlich ausgedehnten Systemen erschließen sich einer mathematisch-physikalischen Beschreibung in besonderer Weise. Die zeitliche Entwicklung lokaler Größen wird unter dem Einfluß am gleichen Ort wirkender “Kräfte” wie auch bei Berücksichtigung der nächsten Umgebung durch Reaktions-Diffusionsgleichungen modelliert. Stationäre, (quasi-)periodische und chaotische Nichtgleichgewichtsstrukturen werden auf diese Weise – wenigstens prinzipiell – verstanden. Die Nichtlinearität der Gleichungen ist dabei ein wesentliches Element für die Generierung chaotischer Strukturen. Ein interessanter Aspekt ist die Steuerung eines zur Ausbildung von Chaos fähigen Systems; controlling chaos

2.1 Musterbildung in räumlich ausgedehnten Systemen

Als einfachste Strukturform ist die *lokale Mehrfachstabilität* anzusehen, die bereits in einkomponentigen nichtlinearen Systemen auftreten kann. In Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen, z.B. den Anfangswerten von Temperatur, Druck, Dichte, Lichtstrahlung etc., stellen sich unterschiedliche stabile stationäre Systemkonfigurationen ein. Eine Änderung der Steuerparameter zieht einen Sprung des Systems in einen anderen stabilen Zustand nach sich. Dies ist das Prinzip eines primitiven nichtlinearen Schaltelements und hinreichend aus der elektronischen und optischen Bauelementetechnik bekannt. Die Forschungen zur Konstruktion chemischer und biochemischer Schalter und Sensoren werden im folgenden Kapitel 3 ausführlicher behandelt. Letztere beruhen auf der Mehrfachstabilität chemischer Reaktionen, deren bekannteste Vertreter das Belousov-Zhabotinskii-System, einige ihrer separierbaren Teilreaktionen, sowie verschiedene enzymatisch katalysierte Reaktionen sind. Die ungewöhnlich hohe Effizienz der Enzymkatalyse unterstützt die Idee, daß die Gesamtheit der Enzym-Makromoleküle durch Evolution zu einer organisierten Struktur, die als eine Art von Maschine arbeitet, perfektioniert wurde (Volkenstein

1983; Symogyi et al. 1984; Jenssen 1989; Eigen 1992).

Die nächsthöhere *lokale* dissipative Strukturform sind *reguläre Grenzzyklus-Oszillationen*, die in zwei- und mehrkomponentigen nichtlinearen Systemen beobachtet werden können. Wichtige Vertreter sind z.B. Schwingungen in elektrischen Netzwerken, die Glykolyse-Oszillationen, wiederum die Belousov-Zhabotinskii-Reaktion, stationäre Schwingungen bei der katalytischen Oxidation von Kohlenmonoxid auf Platinoberflächen (Plath 1989; Eiswirth et al. 1990), die Räuber-Beute-Oszillationen in populationsdynamischen Modellen und andere. Einen Überblick vermitteln verschiedene Monographien, wie die von Andronov et al. (1965, 1969), Winfree (1980), Field und Burger (1985) oder Murray (1989).

Kombiniert man die lokalen strukturbildenden Prozesse mit aktiver oder passiver räumlicher Bewegung, können Strukturen in Raum und Zeit entstehen. Frontwellen, Pulse, Zielscheiben- und Spiralwellen, raumzeitliches Chaos und stationäre periodische Raumstrukturen sind beobachtet worden. Erneut können die Belousov-Zhabotinskii-Reaktion und die katalytische Oxidation von *CO* auf *Pt*-Oberflächen als Beispiel dienen, da nahezu alle bisher bekannten raumzeitlichen dissipativen Strukturierungen bei diesen beiden Standardbeispielen nachgewiesen werden konnten.

Die Frage der Existenz dissipativer Strukturen in der heterogenen Katalyse wurde erstmalig 1976 von Barelko et al. aufgeworfen. In einer Reihe von nachfolgenden Arbeiten (Barelko und Volodin 1983; Pechatnikov und Barelko 1985) wurden stehende Wellen als spezieller Typ dissipativer Strukturen untersucht. Die Bedeutung von Frontwellen in lokal mehrfachstabilen Systemen für das Keim- und Clusterwachstum in physikalischer Chemie, Kristallographie, Epidemiologie u.a. Gebieten ist weitgehend anerkannt (Malchow und Schimansky-Geier 1985; Ulbricht et al. 1989; Murray 1989).

Während der letzten zehn Jahre hat sich das Verständnis genereller Mechanismen der Musterbildung in physikalischen, chemischen und biologischen Systemen beträchtlich beschleunigt (vgl. *Springer Series in Synergetics*). Die vielfältigen Studien über biologische Strukturbildung haben im wesentlichen mit verschiedenen Modifikationen des von Turing 1952 vorgeschlagenen Mechanismus zu tun, welcher auf der Kopplung von chemischen Reaktionen mit Diffusion und der Bildung von stationären dissipativen Strukturen (sogenannten *Turing-Strukturen*) beruht. Eine als morphogenetisches Vormuster interpretierte Struktur bildet sich nach Instabilität einer homogenen (Morphogen-)Verteilung gegen räumlich inhomogene Fluktuationen. Eine der wesentlichen Bedingungen ist die unterschiedlich schnelle Diffusion der mindestens zwei beteiligten Morphogene. Die resultierende stationäre Raumstruktur erzeugt ein morphogenetisches Feld, auf dessen lokale Werte die Zellen mit unterschiedlicher Differentiation reagieren (Meinhardt 1982). Diese *Gradiententheorie der biologischen Formbildung* ist immer noch sehr umstritten. Experimente mit Hydra und Drosophila stützen sie jedoch.

Auch Kristalle entwickeln bei Beschuß mit Teilchen (Elektronen, Neutronen, Ionen) räumlich geordnete Defektstrukturen (Jäger und Trinkaus 1993). Diese werden in Analogie zur biologischen Musterbildung (etwa Streifenmuster von Tierfellen) ebenfalls durch ein Aktivator-Inhibitor Reaktionsdiffusionsmodell gedeutet. Die unterschiedlich schnell diffundierenden Komponenten sind in diesem Fall komplementäre Fehlstellen (Eigenzwei-

schengitteratome/Leerstellen) und die Reaktion entspricht einer Wechselwirkung derselben mit – durch den Beschuß ständig und homogen verteilt erzeugten – Leerstellenclustern (Pigmente des Tierfelles).

Es ist der Beweis erbracht worden, daß laufende Wellen bei der biologischen Struktur- bildung eine ebenso große Rolle spielen, wie die genannten Turing-Strukturen (Agladze und Krinsky 1984; Vasiliev et al. 1987). Puls- und wellenartige Signalausbreitung spielen aber auch eine tragende Rolle bei Prozessen der Nervenleitung. Die Monographie von Murray (1989) kann zur Gewinnung eines Überblicks besonders empfohlen werden.

2.2 Verständnis und Kontrolle chaotischer Systeme

Einen wesentlich höheren Stellenwert unter dem Aspekt der Anwendbarkeit scheinen die *lokalen irregulären (chaotischen) Schwingungen* in deterministischen Systemen zu haben. Mit der Entdeckung dieses sogenannten *deterministischen Chaos* wurde klar, daß Systeme, die durch deterministische Gleichungen kontrolliert werden, sich in irregulärer und nur begrenzt vorhersagbarer Weise verhalten können (Schuster 1980; Berge et al. 1984; Holden 1986). Experimente auf den verschiedensten Gebieten – von der Mechanik, Hydrodynamik, Elektronik und Chemie bis hin zu biologischen Systemen – zeigen, daß Chaos eine universelle Erscheinung ist.

Seit Mitte der 80er Jahre wurden Methoden zur Quantifizierung ergodischer Eigenschaften von Chaos, wie *Attraktordimension* und *Lyapunov-Exponenten* entwickelt (Eckmann und Ruelle 1985; Mayer-Kress 1986). Dabei sind insbesondere die Algorithmen von Grassberger und Procaccia (1983) zur Abschätzung der *Korrelationsdimension* und von Wolf et al. (1985) zur Abschätzung des maximalen Lyapunov-Exponenten hervorzuheben. Diese Algorithmen wurden erfolgreich auf hydrodynamische und chemische Experimente angewandt (Brandstätter et al. 1983; Wolf et al. 1985) sowie zur Zeitreihenanalyse genutzt (Solarzeitreihen: Kuhrts und Herzel 1987; Klimadaten: Graf 1986; Ebeling et al. 1990; Neugeborenen-schreie: Mende et al. 1990; Lautbildung im Vokaltrakt: Herzel und Wendler 1991). Weiterhin wurden Methoden entwickelt, um aus vorgegebenen Zeitreihen die zugrundeliegende chaotische Dynamik zu rekonstruieren (vgl. Stollenwerk 1992).

Zwei Ideen lieferten in der Theorie der nichtlinearen Dynamik in den vergangenen Jahren einen entscheidenden Impuls für potentielle Anwendungen. Das war zum ersten die Methode des gesteuerten Chaos (*controlling chaos*), die einerseits auf Hübler (Hübler 1989) und andererseits auf Grebogi (siehe Ott et al. 1990) zurückgeht. Hüblers Methode besteht darin, das betrachtete dynamische System mit – nötigenfalls starken – Störungen zu einem erwünschten Verhalten zu zwingen. Diese Methode funktioniert i.a. auch, wenn über die zugrundeliegende Dynamik wenig bekannt ist. Grebogi versteht Chaos als Überlagerung von instabilen periodischen Orbits. Das Interessante an dieser Methode ist, daß es möglich wird, ein sich chaotisch verhaltendes System durch gezielte Steuerung in einen periodischen Orbit zu zwingen. Zu dieser Theorie gibt es bereits auch Experimente. Interessante Anwendungen sind beispielsweise auf den Gebieten der Medizin (Behandlung von Herzrhythmusstörungen) und der Biochemie (Steuerung von chemischen Reaktoren

bzw. Bioreaktoren) vorstellbar. Es konnte gezeigt werden, daß periodisch getriebene Systeme aus der Phase geraten können, daß es also unter Umständen günstiger sein kann, Systeme mit vorgeschriebener Schwingungscharakteristik (wie z.B. Herzschrittmacher) durch chaotische Signale anzuregen, um eine konstante Oszillation zu sichern (Pecora 1992). Weitere potentielle Anwendungen wären also neue Diagnose- und Therapiemethoden in der Medizin (EEG- und EKG-Analyse, Parkinsonsche Krankheit, Nierendruck- bzw. Hormonregulation, Stimmstörungen).

Der zweite große Fortschritt auf dem Gebiet der nichtlinearen Dynamik betrifft die methodische Auswertung eines Zusammenhangs zwischen chaotischem Verhalten und Prognostizierbarkeit eines Prozesses. Das Problem der Vorhersage von mehr oder weniger irregulären Prozessen ist ein klassisches Problem der Wissenschaft mit einem breiten Anwendungsspektrum (z.B. Wettervorhersage, ökonomische oder ökologische Szenarien). Eine große Zahl von Beispielen zeigte im vergangenen Jahrzehnt, daß beobachtetes irreguläres Verhalten von Systemgrößen auf niedrigdimensionales Chaos zurückzuführen ist. Aufgrund der exponentiellen Instabilität von Trajektorien setzt Chaos eine fundamentale Grenze für Langzeit-Vorhersagen. Kurzzeitige Vorhersagen können hingegen sehr genau sein. Es gibt verschiedene Ansätze zur Aufstellung von lokalen oder globalen Modellen aus Daten, die zur Vorhersage, Rauschreduzierung und sogar für die Abschätzung von Dimensionen und Lyapunov-Exponenten verwendet werden können (Farmer und Sidorovich 1987, 1988; Crutchfield und McNamara 1987).

Potentielle Anwendungen der Theorie der nichtlinearen Dynamik sind auf Grund ihres universellen Auftretens in nahezu allen Gebieten denkbar. Jede nichtlineare Anlage kann auch chaotisch schwingen. Interessant wäre die Anwendung auf Probleme der Stabilität, wie zum Beispiel beim Bau von Häusern oder Brücken, in elektrischen Schwingkreisen etc. Es wird zur Zeit verstärkt versucht, die aus Physik und Chemie bekannten synergetischen Prinzipien auch auf die raumzeitliche Strukturierung verschiedener Hierarchieebenen von Ökosystemen anzuwenden. Eine erste Einführung in die Modellierung populationsdynamischer Systeme gibt die Monographie von Okubo (1980). Es gilt zu prüfen, ob dissipative *Reaktions-Diffusions-Advektions-Konvektionsprozesse* nicht auch eine wesentliche Rolle bei den beobachteten globalen Klimaänderungen spielen.

In den vergangenen Jahren hat das Interesse an der Erforschung von Systemen mit fraktalen Zeit- oder Raumeigenschaften ständig zugenommen (vgl. Havlin und Ben-Avraham 1987, Feder 1988). Einer der Gründe für dieses Interesse ist die Hoffnung, daß die Untersuchung von *fraktalen Systemen* zu einem besseren Verständnis von Systemen mit *Unordnung* führen. Die praktische Bedeutung und Interpretation der *fraktalen Geometrie der Natur* (Mandelbrot 1982) und der für verschiedene natürliche Strukturen auch am SFB 230 ermittelten Komplexitätsmaße ist aber noch weitgehend unklar.

Kapitel 3

Technische Anwendungen

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 können zudem Entropie exportieren. Die dissipative Struktur hat also selbst einen Weg gefunden Entropie, den Unordnungsmüll, abzugeben und sich dank dieses Mechanismus hochgradig zu organisieren. Kein Wunder also, daß dissipative Strukturen in den verschiedenen Bereichen der Technik intensiv untersucht werden oder werden sollten.

3.1 Energetik

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:

1. Energiequellen: Die technischen Kennwerte herkömmlicher Batterien und Akkumulatoren müssen zumindest erreicht werden. Theoretische Abschätzungen haben gezeigt, daß der Wirkungsgrad dissipativer Strukturen als Energiewandler nur bei wenigen Prozent liegt und daher kaum eine Konkurrenz für die in Gleichgewichtsnähe arbeitenden Batterien und Akkumulatoren darstellt (Feistel und Ebeling 1984). Andererseits sind neuartige Energiequellen möglich, wie Wechselstrombatterien, für die es spezielle Einsatzmöglichkeiten geben könnte.
2. Explosionsmotoren: Hier sind bereits wertvolle Resultate durch die Untersuchung der stochastischen Streuung des Explosionszeitpunktes erzielt worden (Rigos und Deutch 1982; Baras et al. 1983). Von großem Interesse ist auch die Neuberechnung des Wirkungsgrades von Kraftmaschinen unter Verwendung modernster theoretischer Methoden (Richter et al. 1981), denn die klassische Theorie der energieumwandelnden Wärmekraftmaschinen basiert auf der Annahme des reversiblen Ablaufs der Prozesse, aber in der Realität vollziehen sich die Prozesse in solchen weitab vom Gleichgewicht und sind mit Entropieproduktion verbunden. Die theoretische Durchdringung solcher Prozesse hat sich als außerordentlich schwierig erwiesen (Andresen

et al. 1977). Bei der Meisterung dieser Schwierigkeiten ist eine weitere Optimierung der derzeit benutzten Kraftmaschinen zu erwarten (Richter und Ross 1978).

3. Katalyse: Die Untersuchung komplexer Strukturen bei der chemischen Katalyse geben Anlaß zu der Hoffnung zum einen mehr über chemische Reaktions- Diffusionssysteme zu erfahren, zum anderen eines Tages effizientere Katalysatoren herstellen zu können (Imbihl, Cox, Ertl 1989; Eiswirth, Ertl et al. 1988, 1989, 1990).
4. Sensoren: In vielen Fällen ist der Wirkungsgrad der Energieumwandlung bei dissipativen Strukturen relativ gering, und die erzeugten Leistungen sind klein. Für den Sensoreinsatz sind Wirkungsgrade und Leistungen dagegen völlig ausreichend. Die Vielfalt möglicher dissipativer Strukturen läßt im Prinzip eine entsprechende Vielfalt von Sensortypen für verschiedene Einsatzgebiete zu (Malchow und Felber 1989).
5. Meßverfahren: Dissipative Strukturen reagieren häufig sehr empfindlich auf Änderung der Randbedingungen und können dabei kinetische Phasenübergänge verschiedenster Art durchlaufen. Phasenübergänge gestatten genaue Meßverfahren; so erlauben beispielsweise chemische dissipative Strukturen den präzisen Nachweis schwacher elektrischer Felder.
6. Transport: Dissipative Strukturen bilden sich nur in offenen Systemen, die ständig von einem äußeren Fluß freier Energie oder auch Stoffen durchsetzt werden. Der Aufbau von Strukturen bewirkt häufig einen effektiveren inneren Transport, der für Energie-, Wärme- oder Informationsübertragung genutzt werden könnte (Wheatley et al. 1983).
7. Stofftrennverfahren: Viele dissipative Strukturen liefern chemische Konzentrationsunterschiede. Diese sind mit herkömmlichen Techniken oft schwer erzeugbar. Hingegen wird der Aufbau energiesparender, "kalter" Stofftrennverfahren auf der Grundlage dissipativer Strukturen im Prinzip möglich (Feistel und Ebeling 1984).

3.2 Material- und Bauelemente-Probleme

Ein Gebiet, auf dem die Entwicklungen der nichtlinearen Dynamik zunehmend an Bedeutung gewinnen, ist die Materialforschung. Die Synthese neuer Materialien hat einen entscheidenden Anteil an neuen technologischen Entwicklungen. So hat sich herausgestellt, daß die, während des Kristallwachstums oder der Verfestigung von Legierungen in der fluiden Wirt-Phase, stattfindenden Transportprozesse großen Einfluß auf die Struktur und Qualität der festen Phase haben. Konvektion spielt dabei eine dominierende Rolle. So kann etwa die Konvektion irregulär werden, was zu Unregelmäßigkeiten in der Kristallstruktur führt (Nicolis und Prigogine 1977). Beim Wachstum eines reinen Festkörpers oder einer Legierung aus der Schmelze, wenn das Wandern der Trennfläche durch eine extern gesteuerte Gefriergrenze induziert wird, die sich in Richtung der Schmelze bewegt, wird

eine Vielfalt von räumlichen Strukturen, wie z.B. Lamellen oder Dendriten beobachtet (Langer und Müller–Krumbhaar 1978, Langer 1980).

Dabei übersteigen die charakteristischen Dimensionen alle kristallographischen Längen um mehrere Größenordnungen. Desweiteren existiert zwischen dem Festkörper und der Flüssigkeit eine homogene Phase, deren Eigenschaften sich sowohl von denen der Schmelze als auch von denen des Kristalls unterscheiden. Untersuchungen der Lichtstreuung an dieser Schicht – deren Abmessungen wesentlich größer als die Gitterabstände sind – ergeben einen thermischen Diffusionskoeffizienten in der Größenordnung von 10^{-8} cm/s gegenüber dem typischen Wert von 10^{-3} cm/s für reines Wasser. Dadurch werden thermische Störungen viel weniger gedämpft. Dieses läßt darauf schließen, daß sich die ganze Schicht, ähnlich wie in der Nähe eines Bifurkationspunktes, unter kritischen Bedingungen befindet (Nicolis und Prigogine 1977).

Einer anderen 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 (Nicolis und Prigogine 1977).

So gibt es etwa bei den intrinsisch leitenden Polymeren (ICP's) Ansätze, das Prozeßergebnis einer Mischung verschiedener Polymere bzw. anderer Mehrphasen Polymersysteme (z.B. Ruß in Polyurethan/Polyethylenglykol–Blend → Weßling 1991) als dissipative Struktur, i.e. eine Phasenumwandlung von dispergierter zu flokkulierter Phase durch Betrachtung von Grenzflächenkräften und nicht als Gleichgewichtsstruktur zu verstehen. Dazu wurde von Wessling (1991) eine Betrachtung der für dissipative Strukturbildung notwendigen thermodynamischen Voraussetzungen angestellt.

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 (Nicolis und Prigogine 1987). 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 (Pumpraten) organisiert sich das Material neu; es entstehen Risse, Spalten und andere neue Strukturen. Die Modellierung solcher Erscheinungen basiert auf Reaktions–Diffusions–Gleichungen und führt zu einer ganzen Hierarchie symmetriebrechender Übergänge, die Versetzungsmuster beschreiben, welche den experimentell beobachteten sehr ähnlich sind (Nicolis und Prigogine 1977; KFA-Mitteilungen 4/1992).

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 (Herrmann 1992; Pöschel 1992; Ristow und Herrmann 1993). 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 (Linde 1984). 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 immens 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 (Garkunov 1982; Polzer und Meianer 1979).

Die Anwendungen bei der Konstruktion von modernen Lichtquellen sollen durch ein konkretes Beispiel verdeutlicht werden. Instabilitäten im Brennverhalten von Hochdruckentladungslampen, die allgemein durch ihren Einsatz für die Straßenbeleuchtung bekannt sind, werden bisher durch die zusätzliche Bestückung der Lampen mit einer intelligenten (und kostspieligen) Vorschaltel Elektronik kompensiert. Aus der Theorie der nichtlinearen dynamischen Systeme läßt sich jedoch ein einfacherer Lösungsvorschlag ableiten. Die genannten Instabilitäten treten vor allem beim Hochfrequenzbetrieb der Lampen auf und äußern sich in Schlangenbewegungen, Einschnürungen etc. des Entladungsbogens. Es besteht allgemeine Übereinstimmung in Bezug auf die Annahme, daß die Ursache für die Instabilitäten in akustischen Resonanzen des Entladungsgefäßes zu suchen ist, die durch die periodische (harmonische) Wechselspannung im Lampenschwingkreis hervorgerufen werden (Stormberg und Schäfer 1983; Davenport und Petti 1985). Die herkömmlichen Methoden zur Unterdrückung dieser Störeffekte nutzen die Tatsache aus, daß sich die akustischen Resonanzen und damit die Bogeninstabilitäten erst nach einer bestimmten Einschwingphase ausbilden, und basieren auf einer äußeren Modulationen der Wechselspannung (stochastische Phasensprünge, Wobbeln der Frequenz u.a.), um diesen Einschwingvorgang zu stören. Denselben Effekt kann man jedoch auch auf eine andere Art, durch *Selbstgenerierung* zusätzlicher Schwingungsmoden im Lampenschwingkreis erreichen (vgl. Patent von Ebeling et al. 1991): der Lampenschwingkreis enthält vermöge die Lampe selbst ein stark nichtlineares Bauelement und kann damit bei äußerem harmonischen Antrieb höhere Schwingungsmoden oder sogar chaotische Schwingungen hervorbringen. Eine numerische Simulation (Mügge 1988) hat gezeigt, daß bei geeigneter Wahl der übrigen Bauelemente im Schwingkreis (einfache Spulen und Kondensatoren) stark anharmonische Strom- und Spannungsverläufe auftreten, mit deren Hilfe Bogeninstabilitäten wirkungsvoll unterdrückt werden können. Damit eröffnet sich der Weg für eine

neue technische Lösung des genannten Problems beim Betrieb von Hochdruckentladungslampen, die eine längere Lebenszeit für die Lampe und einen höheren Wirkungsgrad für die Lichtausbeute in Aussicht stellt.

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 (Niedernosterheide et al. 1992; Schimanzky-Geier et al. 1991). Theoretisch modelliert man dieses Phänomen durch zweikomponentige Reaktionsdiffusionssysteme (lokale Stromdichte und lokaler Spannungsabfall). Die autokatalytische Rückkopplung von Stromdichteschwankungen steht dabei im Wettbewerb mit dem dämpfenden Einfluß des Spannungsabfalls. Das Verhältnis der Zeit- bzw. Diffusionskonstanten beider Komponenten bestimmt im wesentlichen, welche Art lokalisierter Filamente sich in dem System entwickeln: Stehende, wandernde oder flackernde Filamente. 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.:

1. Verhinderung des Ausfalls von Bauelementen durch bessere Beherrschung von Durchbruchphänomenen. Nach Kerner und Osipov (1974–1981) werden sehr viele Ausfälle durch Stromeinschnürungen und Durchbrennen verursacht. Hierzu liegen bereits umfangreiche Erkenntnisse vor (Kerner und Osipov 1981; Balkarej und Elinson 1979).
2. Erzeugung von Autowellen in Halbleitern. Es gibt eine Reihe von Vorschlägen von Balkarej und Mitarbeitern, von denen einige bereits experimentell erprobt werden (Balkarej und Elinson 1977,1979,1983).
3. Holographische Bildverarbeitung (Bukatova et al. 1978; Balkarej 1980,1981) in aktiven Halbleitern.
4. Pumpen von Lichtleitern nach dem Vorbild der Nervenleitung.
5. Konstruktion dynamischer Kurzzeitspeicher, die ähnlich wie das Gehirn arbeiten (Evtichov et al. 1978; Krinsky und Mikailov 1984).
6. Entwicklung einer funktionalen Elektronik auf der Grundlage selbsorganisierender Medien (Kalnin und Luchinin 1981,1983).
7. Entwicklung eines Infrarotwandlers auf der Basis eines Gasentladungssystems (Purwins et al. 1993).

3.3 Probleme der Biotechnologie

Es besteht heute kein Zweifel mehr daran, daß die Biotechnologie, ebenso wie die Mikroelektronik, eine Schlüsseltechnologie ist, deren Ausbau notwendig ist, 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? Ohne Zweifel verbergen sich hinter diesen Fragen zahlreiche äußerst komplizierte Probleme. Zur Zeit gibt es auch nur Ansätze zur Beschreibung und Lösung dieser Probleme (Feistel und Ebeling 1982,1989), deren Verwendbarkeit wir hier nur kurz umreißen:

Ein Beispiel ist der Einsatz von Antibiotika gegen Krankheitserreger. Die natürliche Evolution der Bakterien führt zur Immunität gegen die Medikamente. So kennt man z.B. schon Erregerstämme von Malaria oder von Geschlechtskrankheiten, die gegen Chinin bzw. Penicillin resistent sind. Die Frage an die Evolutionstheorie ist, ob man Bedingungen schaffen kann, unter denen die natürliche Evolution nicht gegen, sondern für die menschlichen Interessen arbeitet. Analog liegt die Situation bei der Schädlingsbekämpfung und dem Düngemiteleinsetz in der Landwirtschaft bzw. Arzneimiteleinsetz in der Tierproduktion. 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.

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 (Oster et al. 1973; Schnakenberg 1976). In diesem Sinne ist eine Zelle vergleichbar mit einem hochintegrierten Schaltkreis, und die technische Bedeutung der elektronischen Schaltkreise von heute deutet die Potenzen künftiger "che-

mischer Schaltkreise” an (Conrad 1985). Die Idee, chemische Reaktionsnetze nach dem Vorbild der Elektronik zu entwerfen, ist besonders von Conrad und Selkov entwickelt worden. In diesem Zusammenhang sind u.a. Arbeiten von Haddon und Lomola (1983), Conrad (1985, 1986) und Noldechen (1986) zu erwähnen.

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 (Romanovsky et al. 1984; Cartianu 1986; Vasiliev et al. 1987).

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 (Ebeling und Feistel 1982).

Kapitel 4

Anwendungen in Optimierung und Informatik

Auch in der Informatik, bei Automatisierungstechnologien oder bei neuen Speicherkonzepten tragen Ideen aus der Theorie selbstorganisierender Systeme inzwischen zur Formulierung neuer Fragen bei. Zum Teil helfen sie sogar schon bei konkreten Entwürfen oder Realisierungen neuer Lösungen.

4.1 Automatisierung und Optimierung

Interessante Anwendungen von Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution sind besonders bei der Roboterentwicklung denkbar. Neue Robotergenerationen zeichnen sich durch höhere Präzision, Geschwindigkeit und Variabilität ihrer Manipulationen aus, aber auch durch verbessertes Erkennen und Verarbeiten von Umweltinformationen, z.B. durch Sensoren und elektronische Kommunikation mit “Roboterkollegen”. Der Mensch überläßt dem Automaten immer mehr Einzelentscheidungen, die Maschinen gewinnen eine gewisse “Handlungsfreiheit”. Das Produktionssystem insgesamt erhält damit mehr innere Freiheitsgrade (im physikalischen wie auch im systemtheoretischen Sinne).

Die Theorie der Strukturbildung zeigt, daß jenseits eines kritischen Umfangs dieser Freiheitsgrade Selbstorganisation einsetzt; gewisse “Moden” werden von anderen gesteuert. Im Ergebnis entsteht eine neue Struktur (Arbeitsweise des Systems), die erwünscht oder unerwünscht und deren Herausbildung unter Umständen sehr unerwartet sein kann.

Wir erläutern dies an dem einfachen Beispiel eines Systems von Transportautomaten, z.B. Beschickungsautomaten oder Fahrstühlen. Diese Automaten haben die Freiheit, nur bei Anforderung in Funktion zu treten und bei mehreren gleichzeitigen Anforderungen die Reihenfolge ihrer Bearbeitung selbst zu entscheiden. Bei überkritischer Rate an Anforderungen reichen diese Freiheitsgrade zur Selbstorganisation aus: das System minimiert oder maximiert die Transportleistung oder –geschwindigkeit. Das Fahrstuhlssystem in großen Hotels mit mehreren Aufzügen bietet ein typisches Beispiel für diese Selbstorganisation. Wollen viele Gäste befördert werden, so synchronisieren sich alle Fahrstühle automatisch, alle fahren gleichzeitig auf- und abwärts. In der Folge ist die mittlere Warte-

zeit für den Benutzer maximal. Dieser unerwünschte Effekt war von den Konstrukteuren sicher nicht beabsichtigt. Die Selbstorganisation des Fahrstuhlsystems hat eine negative Wirkung für die Nutzer.

Ein analoger Effekt tritt auch im öffentlichen Personennahverkehr auf. Wenn ein Autobus oder eine Straßenbahn gegenüber dem Fahrplan etwas zurückbleibt, so werden viele Fahrgäste warten und die Abfahrt zusätzlich verzögern. Auf der anderen Seite profitiert davon der nachfolgende Bus; es kommt zur zeitlichen Clusterung. Fachleute befürchten auch, daß die riesigen Automatenetze, die mit der Schaffung moderner Raketenwaffen verbunden sind, eine lebensgefährliche Tendenz zur Selbstorganisation zeigen könnten. Effekte der Selbstorganisation in komplexen Programmsystemen und Computernetzen sind ebenfalls bekannt; ihre Beherrschung ist von großer Bedeutung.

Ein weiteres Beispiel für unerwünschte Prozesse der Selbstorganisation sind die selbst-erregten Schwingungen von Schienen. Ein großer Teil der Antriebsenergie von Schienenfahrzeugen wird in Schwingungen der Schienen und des Schienenbettes umgesetzt, welche letztlich zur Zerstörung der Systeme führen. Eine genauere Beherrschung dieser schädlichen Prozesse könnte helfen, die Zeitabstände zwischen den aufwendigen Erneuerungsarbeiten an Gleisstrecken der Straßen- und Eisenbahn zu vergrößern.

Diese Beispiele sollen zeigen, daß die Kenntnis von Prozessen der Selbstorganisation bei der Konzipierung von automatisierten Produktionseinrichtungen wichtig ist, um unerwünschte Möglichkeiten der Selbstorganisation auszuschließen und – wenn möglich – Selbstorganisation für die Optimierung technischer, ökonomischer, ökologischer u.a. Prozesse zu nutzen.

Ein großes Feld für die Anwendungen von Evolutionsprinzipien bietet auch das aktuelle Problem der Automatisierung von Entwurfsprozessen und der Optimierung von Entwürfen (Rechenberg 1973; Schwefel 1977). Optimierung ist ohne Zweifel eine der Hauptaufgaben der modernen Ökonomie und Technologie. Die Gesellschaft braucht Lösungen, die einfach, zuverlässig und preiswert sind. 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. Wir besprechen hier nur eine spezielle Klasse von schwierigen Optimierungsaufgaben, deren Repräsentanten in ganz verschiedenen Gebieten der Wirtschaft und Technik angesiedelt sind.

- Beispiel 1: In der Mikroelektronik besteht die Aufgabe, eine gegebene relativ große Menge von Schaltkreisen $n = 10^2$ bis 10^7 nach einem vorgegebenen Schaltschema durch Leiterbahnen zu verbinden. Wie ordnet man die Elemente am günstigsten auf dem Chip an, damit die Leiterbahnen eine möglichst kleine Gesamtlänge haben? In der Praxis sind dabei natürlich noch viele Nebenbedingungen, z.B. Vermeidung von Kreuzungen usw., zu beachten.
- Beispiel 2: Ein zentrales Problem der modernen Verfahrenstechnik besteht darin, optimale Düsenprofile für Mehrphasenströmungen bzw. für reaktive Strömungen zu konstruieren. Eine vollständige theoretische Berechnung der dabei ablaufenden komplizierten Prozesse ist zur Zeit noch nicht möglich. Rechenberg (1973) und Schwefel

(1977) haben gezeigt, wie man mit Hilfe von Evolutionsstrategien günstige Lösungen finden kann. Die Aufgabe bestand darin, mit einem heißen Gemisch aus dampfförmigem und tröpfchenartigem Kalium maximalen Schub zu erzeugen. Für die experimentelle adaptive Optimierung wurden bis zu 330 konisch durchbohrter Segmente zu den verschiedensten Profilen zusammengesetzt. Im Ergebnis einer adaptiven Zufallssuche folgte eine optimale Form.

- Beispiel 3: Handels- und Transportprobleme erfordern es, die Reihenfolge der Empfänger so zu gestalten, daß sie den kürzesten Weg oder die geringsten Kosten garantiert. Dieses Problem des Reisenden Handelsmannes ist schon von vielen Forschern intensiv bearbeitet worden (Kirkpatrick et al. 1983).
- Beispiel 4: Ein wichtiges Problem für die Effektivität von Betrieben ist die Maschinenbelegungsplanung. Dabei geht es darum, einen vorhandenen Maschinenpark so auszunutzen, daß möglichst wenig Stillstands- oder Umrüstkosten entstehen. Abley (1987) hat gezeigt, daß man auch solche Fragen mit Evolutionsstrategien behandeln kann.

Der Grund für die Schwierigkeit der Lösung von Aufgaben aus der oben skizzierten Klasse besteht darin, daß der Aufwand exponentiell mit der Anzahl der Elemente steigt (NP-Vollständigkeit). Das führt zu enormen Rechenzeiten und einem Versagen der klassischen Standardmethoden der Optimierung. Zur Demonstration neuer Lösungswege betrachten wir als Prototyp ein Rundreiseproblem. Gesucht ist ein ringförmiger Kantengeweg, der im Rahmen einer passenden Metrik möglichst kurz ist. Der Lösungsweg besteht darin, ausgehend von einer willkürlichen Anfangsstruktur des Ringes durch stochastische Variation der Kanten möglichst dicht an das unbekannte Optimum heranzukommen. Es existiert eine große Zahl mathematischer Arbeiten dazu, die neben der klassischen Gradientenstrategie noch eine Reihe weiterer praktikabler Lösungen liefern.

Einen ganz neuen, physikalisch motivierten Zugang bringt die Arbeit von Kirkpatrick, Gelatt und Vecchi (1983). Die Autoren nennen ihre Methode Strategie des simulierten Ausglühens (simulated annealing). Die Idee ist folgende: Man simuliere einen Prozeß der stochastischen Variation der Ringe mit Übergangswahrscheinlichkeiten nach Boltzmann, die einer Pseudo-Temperatur entsprechen (Monte-Carlo-Technik, Metropolis-Algorithmus). Man beginne mit hohen Temperaturen und senke dann die Temperatur ab. Als Hamilton-Funktion dient die Gesamtlänge des Weges

$$\mathcal{H} = L = \sum_i L_{i,i+1}$$

Mit anderen Worten, man packe das Problem so an wie der Hochöfner, der einen guten Stahl produzieren möchte. Die Methode der simulierten Abkühlung, auch Boltzmann-Strategie genannt, ist an vielen Forschungseinrichtungen der Welt aufgegriffen und erfolgreich bearbeitet worden. Eine spezielle Variante ist auch unter Mitwirkung der Autoren entwickelt worden (Ebeling und Engel 1986; Boseniuk, Ebeling und Engel 1987). Die Idee besteht in einer Kombination der Boltzmann-Strategie mit einer Darwin-Strategie. Am

Anfang der Untersuchungen stand folgende Überlegung: Das Beispiel der Evolution lehrt, daß neben Boltzmann– auch Darwin–Strategien notwendig sind, um aus Ansammlungen wechselwirkender Atome qualitativ Neues und Überlegenes zu schaffen (Ebeling 1986). Dann gelang ein theoretischer Beweis der möglichen Vorteile von Mischstrategien (Ebeling und Engel 1986) und schließlich die Demonstration der Überlegenheit durch Simulation auf einem Personal–Computer. Es wurden drei Strategien systematisch miteinander verglichen:

1. Stochastische Gradientenstrategie: Die Ringwege werden stochastisch abgeändert (schnelle Dynamik). Positive Resultate, d.h. solche, die verkürzten Wegen entsprechen, werden sofort akzeptiert, negative Änderungen werden nicht ausgeführt.
2. Simulierte Abkühlung: Positive Resultate von Mutationen werden stets akzeptiert, negative Änderungen werden mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit $e^{(-DL/T)}$ ausgeführt. Diese Strategie ermöglicht es dem System, ungünstige Nebenminima wieder in Richtung besserer Minima zu verlassen. Die Temperatur wird langsam abgesenkt (langsame Dynamik).
3. Gemischte Boltzmann–Darwin–Strategie: Es wird ein Ensemble von n Handelsleuten betrachtet, die in gewissen stochastisch verteilten Zeitabständen paarweise einen Vergleich vornehmen. Der schlechtere Handelsmann übernimmt nach dem Vergleich den besseren Weg. Im Verlauf der weiteren Entwicklung werden sich die Wege beider Handelsleute wegen des stochastischen Mutationsprozesses in aller Regel wieder trennen. Die oben demonstrierten stochastischen Ringnetzwerke können als Beispiele für die Arbeit mit Evolutionsstrategien interpretiert werden. Für die Optimierung sind Ringnetzwerke von besonderem Interesse. Diese Netzwerke werden im Computermodell und inzwischen auch in Hardware recht gut beherrscht. Die Mitarbeiter der Bell–Laboratorien stellten in letzter Zeit verschiedene Entwürfe für Si–Chips vor, die über die Messung des Stromes auf einem Chip mit $n \times n$ Bauelementen das Problem des reisenden Handelsmannes lösen. Die mit VLSI–Technologien mögliche hohe Flächendichte der Elemente gestattet es, die Zahl der Städte relativ groß zu machen. Für die serienmäßige Lösung von Optimierungsaufgaben vom Typ des reisenden Handelsmannes werden vermutlich in naher Zukunft spezielle Chips zur Verfügung stehen (Hopfield und Tank 1985,1986).

1979 versuchte Haken, die Gebiete der Musterbildung und Mustererkennung zu vereinigen, was wegen der Nichtlinearität in den Gleichungen für Systeme mit Strukturbildung mit mathematischen Schwierigkeiten verbunden war. Die meisten Prozeduren, die in der Mustererkennung genutzt wurden, wie z.B. die Methode der kovarianten Diagonalisierung oder die Karkunen–Loeve–Expansion sind lineare Methoden zur Klassifikation von Mustern (Watanabe 1985). Heute beruht eine große Zahl von Zugängen zur Mustererkennung auf neuronalen Netzen (IEEE 1987,1988; ISNN 1988). Die meisten Arbeiten beruhen auf dem Modell für Neuronen als bistabile Schaltelemente und dem Konzept des assoziativen Gedächtnisses (Steinbuch 1963, Kohonen 1988) und sind verbunden mit dem Spinglasmodell (Hopfield 1982). 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. Heutige digitale Computer besitzen eine makroskopische Architektur. Es kann bezweifelt werden, ob ein solches Computer-Konzept intelligentes Verhalten zeigen kann.

Conrad schlägt ein hierarchisches System mit mikroskopischem und makroskopischem Niveau als Mechanismus für die Informationsverarbeitung vor (macro molecular self assembly mechanism). Die Leistungsfähigkeit dieses Mechanismus besteht darin, daß sie das Problem einer symbolischen Mustererkennung in das Problem der Minimierung einer freien Energie umwandelt. Eine Grundschwierigkeit bei der Analyse von Biosequenzen ist die Definition der Information, die in biologischen Makromolekülen enthalten ist. Bei den Untersuchungen von Ebeling et al. (1987) stellte sich heraus, daß es kein universelles Maß für Komplexität gibt; jedes konkrete Maß beschreibt nur einen bestimmten Aspekt der Komplexität eines Strings.

4.2 Speicherung von Information

Die Speicherung von Information spielt eine zentrale Rolle bei der Informationsverarbeitung lebender Systeme (Hinton und Anderson 1981; Amari und Arbib 1982; Kohonen 1988). 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.

Vom physikalischen Standpunkt aus ist ein assoziativer Speicher ein dynamisches System mit vielen Attraktoren, die die gespeicherten Informationen darstellen. Jeder Speicherinhalt ist von einem, durch die spezielle Dynamik bestimmten, Einzugsbereich umgeben, so daß Anfangskonfigurationen, die in der Nähe eines Attraktors liegen, unter der Dynamik des Systems den Attraktor asymptotisch anlaufen. Auf diese Art und Weise kann eine teilweise Information als Stimulus für die Ausgabe des vollen gespeicherten Inhalts dienen (Hogg und Hubermann 1985). Will man über diese sehr allgemeinen Vorstellungen hinaus physikalische Untersuchungen assoziativer Speicher durchführen, so benötigt man ein konkretes Modell, das einerseits eine detaillierte mathematische Behandlung erlaubt und andererseits möglichst viele der aus der Biologie und Psychologie bekannten Phänomene wiedergeben kann.

Ein solches Modell ist 1982 von J.J. Hopfield vorgeschlagen worden und hat eine Reihe interessanter Resultate geliefert; es nutzt wesentlich einige Analogien zur Spinglasproblematik, denn die Verwandtschaft zum Spinglas besteht vor allem wegen der Multimodalität

der Spinglas–Hamilton–Funktion (4.1) und dem ausgeprägten bistabilen Charakter von Neuronen. Neuronen können zwei deutlich voneinander verschiedene Zustände, einen aktiven und einen Ruhezustand, einnehmen, die entsprechend durch eine Ising–Spinvariable $S = 1$ beschrieben werden können. In einer groben Näherung läßt sich die Dynamik als einfache Schwellwertdynamik darstellen: Jedes Neuron $i = 1, \dots, N$ empfängt von den anderen Neuronen j entsprechend dessen Zustand S_j über Synapsen J_{ij} ein Potential

$$E_i = \sum_j J_{ij} S_j \quad (4.1)$$

und vergleicht dieses mit einem Schwellwertpotential E_i^0 , das wir im folgenden zur Vereinfachung zunächst für alle Neuronen gleich Null, $E_i^0 = 0$, setzen. Für $E_i > 0$ geht das Neuron nun in den aktiven Zustand $S = 1$, für $E_i < 0$ in den Ruhezustand über. Unter der zusätzlichen Annahme symmetrischer Synapsen

$$J_{ji} = J_{ij} \quad (4.2)$$

entspricht diese Dynamik einer Minimierung der Funktion

$$\mathcal{H}\{S_i\} = - \sum_i E_i S_i = - \sum_{ij} J_{ij} S_i S_j. \quad (4.3)$$

Da es sowohl erregende ($J_{ij} > 0$) wie hemmende ($J_{ij} < 0$) Synapsen gibt, ist in dieser Näherung die Funktion (4.3) gleich der Hamilton–Funktion eines Spinglases (4.1) und man kann erwarten, daß eine komplizierte Phasenraumstruktur mit vielen lokalen Minima erzeugt werden kann. Da diese Minima gerade den Attraktoren unserer Dynamik entsprechen, ist das System als assoziativer Speicher geeignet. Als wesentliches Problem verbleibt die Angabe einer Vorschrift für die synaptischen Kopplungen J_{ij} , welche sichert, daß gerade ein vorher bestimmter Satz von p Konfigurationen – $\{\xi_i^\mu\}$, $\xi_i^\mu = \pm 1$; $i = 1, \dots, N$; $\mu = 1, \dots, p$ – zu den Minima der Funktion (4.3) wird. Diese Konfigurationen repräsentieren dann die Speicherinhalte, die assoziativ abgefragt werden können.

Inzwischen gibt es eine Vielzahl sogenannter Lernregeln $J_{ij} = J_{ij}(\xi_i^\mu)$. Hier werden nur einige genannt. Die einfachste geht auf Hebb (1949) zurück und ist auch von Hopfield ursprünglich verwendet worden:

$$J_{ij} = \sum_{\mu=1}^p \xi_i^\mu \xi_j^\mu, \quad (4.4)$$

mit dieser Vorschrift lassen sich bis zu $p = 0.15 \cdot N$ orthogonale Muster $\{\xi_i^\mu\}$ speichern und assoziativ abrufen, wenn man einen kleinen Fehler ($\approx 1,5\%$) in Kauf nimmt. Bis zu $p = N$ nicht orthogonale Muster lassen sich fehlerfrei mit der Lernregel

$$J_{ij} = \sum_{\mu, \nu=1}^p \xi_i^\mu (C^{-1})_{\mu\nu} \xi_j^\nu \quad (4.5)$$

speichern und abrufen, wobei C^{-1} die Inverse der Überlappungsmatrix

$$C_{\mu\nu} = \frac{1}{N} \sum_i \xi_i^\mu \xi_i^\nu \quad (4.6)$$

bezeichnet (Kanter und Sompolinsky 1987). Für orthogonale Muster ist $C_{\mu\nu} = \delta_{\mu\nu}$ und (4.5) vereinfacht sich zu (4.4). Die ersten Untersuchungen solcher Spinglasmodelle für assoziative Gedächtnisse waren numerischer Art (Hopfield 1982; Kinzel 1985). Ein großer Schritt vorwärts auf diesem Gebiet war die analytische Behandlung des Hopfield-Modells mit den Methoden der Spinglastheorie (Amit et al. 1985,1987).

Inzwischen kann man viele Eigenschaften solcher Modelle genau charakterisieren. Im allgemeinen lassen sich $\mathcal{O}(N)$ Informationen speichern, d.h. die Anzahl p von Speichereinhalten wächst proportional zur Neuronenzahl N . Für das Verhältnis $a = p/N$ gibt es einen kritischen Wert a_c , der das Regime der Speicherung und des assoziativen Abfragens ($a < a_c$) vom sogenannten Konfusionszustand ($a > a_c$), in dem alle eingespeicherten Informationen verlorengegangen sind, trennt. So findet man $a_c = 0.14$ bzw. $a_c = 1$ für die Lernregeln (4.4) und (4.5) in Übereinstimmung mit den numerischen Resultaten. Verschiedene Vorschläge, die Überlastungskatastrophe der Konfusion durch gezieltes Vergessen zu vermeiden, wurden diskutiert (Vedenov und Levchenko 1985; Parisi 1986; Nadal et al. 1986; Mezard et al. 1986; Hoffmann et al. 1986).

Weiterhin ist die störende Rolle von Mischinhalten untersucht worden. Speichert man mehrere Inhalte, so entstehen ungewollte Minima der Funktion (4.3) bei Konfigurationen, die Teile verschiedener eingespeicherter Informationen kombinieren. Diese stören die Funktion des Speichers und geben zu Fehlinterpretationen Anlaß. Ihr Einfluß kann interessanterweise durch Einbeziehung von Rauschen in die Neuronendynamik stark zurückgedrängt werden (Amit et al. 1985,1987). Eine weitere sehr interessante Möglichkeit zu ihrer – zumindest teilweisen – Eliminierung ist das sogenannte “Rückwärtslernen”, das in Beziehung zum REM-Schlaf gebracht worden ist (Hopfield et al. 1983; Crick und Mitchison 1983). Ferner wurden die Reaktion des Systems auf Ausfall eines gewissen Prozentsatzes von Synapsen oder auf stochastische Fehler bei den Lernprozessen studiert, sowie Neuronennetze mit Synapsen, die nur die Werte 0 und 1 annehmen können, was für technische Anwendungen von großem Interesse ist. Auch wurden nach und nach die ursprünglich gemachten Einschränkungen gelockert; so wurden etwa Situationen untersucht, in denen die Schwellwerte E_i^0 von Neuron zu Neuron variieren oder die Synapsen unsymmetrisch sind, also die Gleichung (4.2) nicht mehr erfüllen. In allen Fällen sind die Fähigkeiten zur assoziativen Speicherung erhalten geblieben, so daß man davon ausgehen kann, daß es sich um einen kooperativen Effekt handelt, der sich spontan in einem großen System wechselwirkender Einheiten ausbildet und nach der Universalitätshypothese der statistischen Mechanik nicht von den Details der Subsysteme abhängen sollte. Dadurch wird auch die grobe Beschreibung der Neuronen als binäre Variable im nachhinein gerechtfertigt.

Einen guten Überblick über den Stand der Forschung auf diesem interessanten Gebiet vermittelt ein Tagungsband von van Hemmen und Morgenstern (1987). Abschließend sei auf den Zusammenhang der assoziativen Speicherung mit dem wichtigen und komplizierten Problem der Mustererkennung verwiesen. Ordnet man die N Spinvariablen in einer Fläche an und stellt $S = 1$ durch ein schwarzes und $S = -1$ durch ein weißes (Leer-) Feld dar, so entspricht jeder Spinkonfiguration S ein zweidimensionales Muster. Den $\{\xi_i^\mu\}$ entsprechen p gespeicherte Muster, die durch Vorgabe eines verrauschten Anfangsmusters assoziativ abgefragt werden können. Es sei aber darauf verwiesen, daß sich die

Assoziationsfähigkeit auf Nachbarschaftsverhältnisse im Konfigurationsraum beschränkt, also ausschließlich über den Hamming-Abstand erfolgt. Gegenwärtig gibt es noch keine genauen Vorstellungen, wie man die oben vorgestellten Spinglasmodelle assoziativer Speicher erweitern muß, damit sie auch für die komplizierten Probleme der Erkennung rotierter oder verschobener Muster Anwendung finden können. Das heißt z.B., daß ein auf dem Kopf stehendes "V nicht als solches erkannt würde, ja selbst eine Verschiebung eines exakten Musters um nur einige Gitterplätze würde die assoziativen Fähigkeiten des Hopfield-Modells bereits überfordern. Es bleibt abzuwarten, ob auch diese Klasse von Problemen von assoziativen Speichern gelöst werden kann.

Von einer neuartigen Implementierung eines Kohonen-Netzes berichten Purwins et al. (Ruwisch 1993). Kohonens Algorithmus fordert, daß in einem lernfähigen Netz auf ein Eingabesignal genau ein Neuron antwortet; nämlich das Neuron, welches dem Signal am "nächsten liegt" (d.h. welches auf das Signal am stärksten reagiert) und damit die anderen Neuronen unterdrückt. Außerdem sollen die Verbindungen zwischen den Neuronen so beschaffen sein, daß die Repräsentierung der angebotenen Eingabemuster durch das Netz optimiert wird.

In der erwähnten Implementierung hat man nun eine sehr einfache Vernetzung zwischen den Neuronen realisiert. Jedes Neuron ist autonom, reagiert auf *eine* Eingabe mit *einem* Ausgabesignal und ist lernfähig. Alle zusammen sind über ein "entflammbares" Reaktionsdiffusionsmedium miteinander gekoppelt. Wird ein Muster angeboten, so reagieren alle Neuronen darauf. Jenes, welches am stärksten reagiert, mithin am besten an das vorgegebene Muster adaptiert ist, zündet das koppelnde Reaktionsdiffusionsmedium. In diesem breitet sich eine "Flammenfront" aus und schaltet die jeweils erreichten Neuronen auf den Lernmodus um. Je weiter entfernt vom initiiierenden Neuron ein anderes liegt, desto später wird der Lernmodus für letztgenanntes aktiviert. Da dem System nach erfolgter Zündung nur eine begrenzte Lernzeit eingeräumt wird, adaptieren das initiiierende Neuron und seine Nachbarn am besten auf das angebotene Signal, die weiter entfernten immer schlechter. So differenziert sich das Netz in mehreren Zyklen immer mehr, die Neuronen erkennen abhängig von ihren Nachbarschaftsverhältnissen ähnlichere Muster je näher sie räumlich beieinander liegen.

4.3 Netzwerkmaschinen und Neuronenrechner

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. Zumindest im Prinzip können damit fast beliebige Aufgaben gelöst werden. Praktisch, d.h. in Hardware, wird der von Neumann-Rechner heute auf der Basis elektronischer Prozesse in Si-Chip-Schaltkreisen realisiert. Über die ungeheure Bedeutung dieser modernen Computer-Generation braucht hier kein Wort mehr verloren zu werden.

Die Experten verweisen jedoch zu Recht auch immer wieder auf die strukturellen Grenzen der heutigen Rechnergeneration. Der amerikanische Computerexperte Conrad aus Detroit nennt als Beispiele das Problem der Erkennung von Strukturen und Mustern, das Entwurfsproblem komplexer Systeme, z.B. mikroelektronischer Chips, und das Entscheidungsproblem in komplexen Situationen (Conrad 1985). Die modernen von-Neumann-Rechner können zwar im Prinzip alles lösen, was programmierbar ist, aber sie bewältigen bestimmte Aufgaben nur mit großem Aufwand. Insbesondere betrifft das die Software. Nehmen wir ein Beispiel: Kleine Kinder erkennen die Stimme der Mutter unter Tausenden, sie unterscheiden mühelos Tierarten, Fahrzeugtypen, können das Alter von Personen schätzen, den Charakter von komplexen Situationen beurteilen, erkennen auch Gefahren, denen sie ausweichen.

Conrad betrachtet als entscheidende Nachteile der heutigen informationsverarbeitenden Maschinen den Mangel an Lernfähigkeit, Anpassungsfähigkeit und Effektivität, sowie die hohe Störanfälligkeit. 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.

Solche Probleme werden im Rahmen der Informationsverarbeitung 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.

Conrad hat dazu einige grundsätzliche Überlegungen angestellt und das sogenannte Kostenprinzip formuliert. Es besagt, daß man nicht alle gewünschten Eigenschaften eines Rechners wie Programmierbarkeit, Universalität, Effektivität, Anpassungsfähigkeit, Lernfähigkeit und Störsicherheit gleichzeitig erreichen kann. Die von-Neumann-Computer sind in bezug auf Programmierbarkeit und Universalität optimiert, die organischen Informationssysteme in bezug auf Effektivität, Lernfähigkeit und Störsicherheit.

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*. Die hier vorzustellenden Netzwerkmaschinen orientieren sich am Vorbild der Neuronennetze, ohne deren Struktur im Detail nachahmen zu wollen. Wegen der ungeheuren Komplexität von realen Neuronennetzen können Netzwerkmaschinen bestenfalls einige ihrer Aspekte simulieren. Ein Fernziel der Arbeit an Netzwerkmaschinen besteht darin, zur Entwicklung eines neuen Rechnertyps, der in der internationalen Literatur häufig als "Neuronencomputer" bezeichnet wird, beizutragen (Ackley 1985).

Eine Netzwerkmaschine besteht schematisch aus einem System von n multistabilen Elementen, die stochastisch miteinander verknüpft werden können. Das System besitzt einen Eingangsteil, einen Ausgangsteil und einen inneren Teil, dessen Elemente über eine stochastische Dynamik verfügen. Jedem Netzwerk kann ein farbiger Graph zugeordnet werden; die den Kanten zugeordnete Matrix heißt synaptische Matrix. Die Farbe des Knotens bezeichnet den internen Zustand, z.B. Ein oder Aus. Die Verknüpfungen sol-

len variabel sein und einer bestimmten Dynamik folgen. In aller Regel hat das System eine schnelle, deterministische oder stochastische Dynamik und eine langsame, adaptive Dynamik (Prinzip der Doppeldynamik nach Conrad). Weitreichende Kopplungen werden ausdrücklich zugelassen. Systeme dieses Typs haben u.a. in der Kybernetik und Physik, in der Theorie elektrischer Netzwerke und linearer Filter, sowie in der Theorie der Neuronensysteme schon gewisse Tradition.

Der Vater der Netzwerktheorie ist bekanntlich Gustav Robert Kirchhoff, der von 1876 bis 1889 an der Berliner Universität den ersten Lehrstuhl für theoretische Physik innehatte. Für die spezielleren Netzwerke, welche wir hier betrachten, sind die Modelle von Steinbuch, McCulloch und Pitts, Grossberg, Rosenblatt und Minsky, Ackley, Hinton, Sejnowski und Rosenberg von besonderer Relevanz (Amari und Arbib 1982; Rumelhart und McClelland 1986; Hoppensteadt, 1986). Wir erwähnen auch die enge Beziehung der betrachteten Netzwerke zur Theorie zellulärer Automaten, die wiederum auf von Neumann zurückgeht, und zwar auf seine Vorlesung *“The General and Logical Theory of Automata”* (September 1948). Trotz vieler Gemeinsamkeiten mit klassischen, wohl untersuchten Netzwerktypen gibt es eine Reihe von Besonderheiten der hier betrachteten Netzwerke, die in folgendem bestehen:

1. Die Dynamik der Zustandsänderung ist nichtlinear und kooperativ.
2. Die Zustände der Knoten sind bi- oder multistabil, die Zustände des Gesamtsystems sind “frustriert”, und die Anzahl der alternativen Zustände wächst exponentiell mit der Knotenzahl.
3. Die Knoten des Netzwerkes sind in verschiedenen Ebenen hierarchisch geordnet.

Die ersten grundlegenden Untersuchungen von Netzwerkmaschinen stammen von Rosenblatt (1962), der den Namen Perzeptron geprägt hat, sowie von Minsky und Papert (1969). In bezug auf Anwendungen sind in letzter Zeit besonders zwei Typen interessant geworden:

- Boltzmann-Maschinen (Ackley et al. 1985);
- Fehlerausbreitungsmaschinen (Sejnowski und Rosenberg 1986).

Die Theorie dieser vielversprechenden Lernmaschinen ist noch ganz unterentwickelt. Um so erstaunlicher sind die schon punktuell erreichten Leistungen. Als Boltzmann-Maschine bezeichnen wir im folgenden ein stochastisches Netzwerk mit folgenden Basiselementen

1. Das Netzwerk hat eine hierarchische Ordnung und besteht aus einer Eingangs- und einer Ausgangsebene; dazwischen liegt eine interne Ebene.
2. Zwischen den Knoten in den drei Ebenen bestehen stochastische Kopplungen; es existiert eine Hamilton-Funktion.
3. Die Zustände der Knoten (Spins oder Farben) sind einer Flip-Dynamik unterworfen, die Boltzmann-Übergängen entspricht.

4. Das System läuft abwechselnd in einer Belehrungsphase mit festgeklemmten Input–Output–Relationen, einer Testphase mit festgeklemmtem Input und freiem Output und einer Korrekturphase.
5. Proportional zur vorhandenen Abweichung der gewünschten von der tatsächlichen Input–Output–Relation wird die Kopplungsmatrix korrigiert.
6. Die Maschine wird solange trainiert (Wechsel der drei Phasen), bis sie bei gegebenem Input den gewünschten Output bei freiem Spiel der Dynamik erzielt. Sie hat dann sozusagen gelernt, einem gegebenen Input mit Hilfe seiner inneren Dynamik einen Output sicher zuzuordnen.

Die Boltzmann–Maschine ist ein trainierbares Netzwerk; sie erfordert einen Trainer, der die gewünschten Input–Output–Relationen kennt und davon ausgehend entsprechend den Abweichungen von der Zielreaktion die Korrekturen steuert. Die Dynamik der Korrektur ist langsam und adaptiv; dagegen ist die Dynamik der Zustands–Flips schnell und entspricht einem Boltzmann–Prozeß. Die Leistungsfähigkeit von Boltzmann–Maschinen ist erstaunlich. So können die Maschinen nach entsprechendem Training lernen, Figuren in Bezug auf die Symmetrieklassen, zu denen sie gehören, auch bei beliebiger Orientierung richtig einzuordnen. Eine noch eindrucksvollere Lernleistung wurde im Hinblick auf Kodierungsprobleme erreicht (Ackley et al. 1985).

Noch leistungsfähiger scheinen die von Sejnowski und Rosenberg (1986) entwickelten Fehlerausbreitungsmaschinen zu sein. Im Unterschied zur Boltzmann–Maschine hat diese Lernmaschine einen kontinuierlichen inneren Zustandsbereich mit Attraktoren bei 0 und 1. Bei gegebenem Input wird für die Outputebene der Fehler

$$E(z) = \sum_{k \in OUTPUT} (z_k - z_k^*)^2$$

berechnet (z_k – aktueller Outputzustand, z_k^* – angestrebter Outputzustand). Im Rahmen der langsamen, adaptiven Dynamik werden Matrixelemente der Kopplungen T_{ij} gemäß einer Gradientenstrategie nach jedem Belehrungsakt abgeändert: $T - \nabla E(z)$.

Nach einer größeren Zahl von Belehrungsphasen ($10^2 - 10^4$) hat das System es in aller Regel gelernt, gegebenen Inputzuständen die angestrebten Outputzustände mit großer Sicherheit zuzuordnen. Das bisher eindrucksvollste Beispiel einer Lernleistung ist das von Sejnowski und Rosenberg entwickelte Programm NRTtalk. Dieses System ist nach einem Lernprozeß in der Lage, einen gegebenen (unbekannten) Text lautrichtig vorzulesen. Das Problem besteht darin, einem gegebenen gedruckten Wort ein lautrichtiges optisches Signal zuzuordnen. Es wurden Boltzmann–Maschinen entwickelt, die nach längerem Training etwa die Lesequalität eines Kindes im 2.–3. Schuljahr erreichten. Dabei werden auch typische Lernfehler beobachtet, die beispielsweise seltene Worte und Ausnahmen betreffen. Andere Experimente betreffen den Effekt von Wiederholungen, von Lernpausen usw. Bei Zerstörung von 65% der Verbindungen im Netzwerk geht die Fähigkeit zum Vorlesen verloren, die Geschwindigkeit des Wiederlernens ist jedoch weit höher als beim

ersten Lernen. Die vorliegenden Experimente zeigen, daß die Boltzmann-Maschine geeignet ist, psychologische Hypothesen zu testen. Der Einsatzbereich von Netzwerkmaschinen ist längst nicht ausgeschöpft.

Wir betrachten nun die möglichen bzw. schon existierenden technischen Realisierungen der diskutierten Modelle. Die Zielstellung der Untersuchungen geht dahin, solche Netzwerke, die auf der Modellebene ihre Leistungsfähigkeit gezeigt haben, möglichst einfach und elegant physikalisch umzusetzen. Über eine spezielle Hardwarerealisation, den Chip für das Problem des reisenden Handelsmannes, ist bereits berichtet worden. Das sind Chips, die nichtlineare RC-Kreise verknüpfen (Aleksander 1965,1988; Hopfield und Tank 1986). Jedes Element besitzt mehrere Eingänge und einen Ausgang und erinnert damit an die Neuronenstruktur. Die Kirchhoffschen Bilanzgleichungen für den Stromknoten i lauten:

$$C_i \frac{du_i}{dt} + \frac{u_i}{R_i} - \sum_j T_{ij} V_j = I_i,$$

wobei $T_{ij} V_j$ für die synaptischen Eingangsströme steht und I_i den Ausgangsstrom bezeichnet. Zwischen der Spannung am RC-Kreis u_i und der Ausgangsspannung wird eine Abbildung mit nichtlinearer Kennlinie angenommen, $V_i = g(u_i)$ wobei g eine Sigmoid-Funktion ist. Damit gewinnt der RC-Kreis die Fähigkeit, aktiv zu sein (zu feuern) oder zu blockieren. Wieder ist eine Analogie zur Nervenzelle durchaus erkennbar. Wie man beweisen kann, besitzt das Netzwerk die Hamilton-Funktion

$$\mathcal{H} = -\frac{1}{2} \sum_{ij} T_{ij} V_i V_j - \sum_i I_i V_i + \sum_i \frac{1}{R_i} \int_0^{V_i} g^{-1}(V) dV$$

Man kann mit diesem System bei fester Verschaltung leicht eine Gradientenstrategie realisieren, da $\frac{d\mathcal{H}}{dt} \leq 0$ (d.h. \mathcal{H} ist eine Lyapunov-Funktion des Systems für $T_{ij} = T_{ji}$). Die Strategie zur Entwicklung von Bauelementen sieht so aus, daß man zunächst im Computermodell eine günstige synaptische Matrix sucht und dann die entsprechenden Leiterbahnen auf dem Si-Chip anbringt. Wegen der festen Verdrahtung können solche RC-Netzwerke nur eine Aufgabe lösen, z.B. das Erkennen einer Objektklasse. Potentielle Anwendungen dürften im Bereich der Mustererkennung, etwa bei der Massenkontrolle von Produkten liegen.

Der Nachteil von Netzwerken, die in der Si-Technologie hergestellt werden, liegt in der mangelnden Variabilität der Verdrahtung; i.e. die synaptische Matrix wird nach der Erprobungsphase festgeschrieben. Eine wesentlich größere Flexibilität zeigen optische Realisierungen, die – zumindest als unvollkommene Labormuster – ebenfalls bereits in der Erprobung sind. Die Rolle der synaptischen Matrix übernimmt dabei ein Volumen- oder Flächenhologramm. Dadurch wird eine hohe Flexibilität und Variabilität gesichert. Es sind zwei Grundtypen in der Erprobung (Gibbs et al. 1986):

1. Als Knoten fungieren transparente Scheiben in einem Schirm, evtl. mit nachgeschalteten nichtlinearen optischen Elementen. Durch halbdurchlässige Spiegel wird die Matrix gezielt auf andere Scheiben gelenkt. Die Steuerung erfolgt über ein Volumenhologramm.

2. Als Knoten fungieren GaAsLED und Detektoren, die über eine VLSI-Technologie auf einem Chip angeordnet werden. Die synaptische Matrix wird über einen darüberliegenden Spiegel mit einem Flächenhologramm dargestellt.

Es besteht wohl kaum ein Zweifel, daß optische Netzwerke eine besonders elegante Lösung darstellen. Die anfängliche Euphorie in Bezug auf die Realisierbarkeit digitaler optischer Computer ist seit den siebziger Jahren einer sehr nüchternen Einschätzung gewichen. Man darf jedoch nicht übersehen, daß seit wenigen Jahren sehr leistungsfähige nichtlineare optische Bauelemente zur Verfügung stehen (Gibbs et al. 1986). Führende Experten für optische Informationsverarbeitung vermuten, daß die Chancen des optischen Computers in der Parallelverarbeitung liegen. Prototypen optischer Netzwerkmaschinen werden bereits diskutiert.

Eine dritte Richtung der Realisierung von Netzwerken sind die von Conrad, Kirby und Hong entwickelten enzymatischen Neuronen (Kirby und Conrad 1984,1986). Die Idee besteht darin, lichtempfindliche Molekeln (Rhodopsin) auf künstlichen Membranen zu plazieren. In enger Beziehung dazu stehen optisch-chemische Netzwerke, wie sie experimentell von Kuhnert und Mitarbeitern untersucht werden. Das Prinzip entspricht mehr oder weniger dem des enzymatischen Neurons, abgesehen von der ganz anderen chemischen Struktur, die dem Netzwerk zugrunde liegt. Die optisch-chemischen Netzwerke basieren auf der von Kuhnert (1986) gefundenen lichtempfindlichen Variante der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion. Wegen der Lichtempfindlichkeit des verwendeten neuen Katalysators (Ruthenium) kann der lokale Reaktionszustand unmittelbar über einen optischen Input gesteuert werden. Das interne Netzwerk ist extrem einfach, da nur eine Diffusionskopplung mit Nachbarzellen vorliegt. Die Auskopplung erfolgt möglicherweise über nichtlineare Elektroden, deren Position adaptiv variiert werden kann. Während die optische Aussteuerung von Kuhnert (1986) überzeugend nachgewiesen worden ist, existiert zur Zeit für die adaptive Auskopplung nur eine theoretische Untersuchung (Ebeling 1986). Weiterhin erwähnt wird die Möglichkeit, komplizierte Netzwerke mit Hilfe zeolithartiger Materialien darzustellen (Dress et al. 1982).

Schließlich müssen wir noch die naheliegende Simulation von Netzwerken mit Hilfe von Prozessoren nennen. Die Firma TRW in Californien bietet einen sogenannten Neuronenprozessor an. Der Typ Mark IV, der seit 1987 auf dem Markt ist, besteht aus acht Spezialprozessoren, mit denen ein Netzwerk mit 1/4 Millionen Knoten und 5 Millionen Verknüpfungen simuliert wird; 85% des Wertes liegen in einem großen RAM-Speicher für die synaptische Matrix. Mit modernen Neuronenrechnern können alle gängigen Netzwerktypen von Hopfield bis Hinton simuliert werden. Ein solcher, auf Netzwerke spezialisierter Computer, kann für einen relativ niedrigen Preis die gleichen Leistungen wie eine Simulation auf einem Großcomputer in einem Bruchteil des zeitlichen Aufwandes erreichen. Es wird die besondere Eignung der Netzwerkrechner für adaptive Steuerungen, Entscheidungsprobleme, Regellernen, Verarbeitung unexakten Wissens, Archivierung, Edition, Retrieval und Massenkontrolle hervorgehoben.

Am Schluß betonen wir nochmals, daß die Netzwerkmaschinen in der Tat noch in den Kinderschuhen stecken. Ein Vergleich mit Leistungen moderner Computer wäre deshalb

weder gerecht noch fair. Nach unserer Auffassung gibt es starke Argumente dafür, daß dieser neue Typ der Informationsverarbeitung sehr aussichtsreich ist. Außerdem ist seine Entwicklung mit einem vergleichsweise mäßigen Aufwand verknüpft.

“All das wird zu Theorien (der Berechenbarkeit) führen, die viel weniger starr und nicht von der Alles-oder-Nichts-Struktur der formalen Logik sind. Diese werden viel weniger kombinatorischen und mehr analytischen Charakter tragen. In der Tat gibt es zahlreiche Hinweise, die uns glauben machen, daß das neue System der formalen Logik sich einer Disziplin nähern wird, die in der Vergangenheit wenig mit Logik zu tun hatte. Es handelt sich um die Thermodynamik, in erster Linie in der Form, die von Boltzmann stammt, und die den Teil der theoretischen Physik darstellt, der in einigen Aspekten der Verarbeitung und Messung von Information am nächsten kommt”

(Aus.: John von Neumann, Gesammelte Werke, Bd. 5, S. 304).

Zu einer solchen Symbiose der statistischen Thermodynamik mit der Informatik, die von Neumann voraussah, sollte dieser Abschnitt einen bescheidenen Beitrag liefern.

Kapitel 5

Prozesse in sozialen und ökologischen Systemen aus der Sicht der Theorie der Selbstorganisation

Es gibt eine Reihe von fruchtbaren Ansätzen zur Beschreibung der Selbstorganisation bei ökologisch-ökonomischen und sozio-kulturellen Prozessen. Eine bestimmte Auswahl daraus soll hier besprochen und (unter Berücksichtigung eigener Ansätze seit 1980) im Literaturverzeichnis reflektiert werden. Wir werden uns grundsätzlich auf Ansätze aus der Sicht der Synergetik bzw. Theorie der Selbstorganisation – im engeren, naturwissenschaftlich orientierten Sinne – beschränken. Dabei sollen die im SFB 230 von anderen Gruppen (z.B. Weidlich/Haag) verfolgten Richtungen lediglich gestreift werden.

Im folgenden wollen wir zwischen vier Typen von theoretischen Modellen (im Hinblick auf die Beschreibungsebene) unterscheiden: Die phänomenologische Kinetik, thermodynamische Modelle, die deterministische Dynamik und schließlich die stochastische Dynamik.

5.1 Phänomenologische Kinetik

Modelle der Selbstorganisation bei komplexen Prozessen müssen grundsätzlich die Zeit enthalten, denn der zeitliche Ablauf der Erscheinungen, der Prozeßcharakter, gehört untrennbar zu ihrem Wesen. Ausgehend von dieser Forderung kann man als einfachste Modelle, welche den komplexen Charakter abbilden, grafische Darstellungen oder Listen von Ereignissen über der Zeit als Laufvariable betrachten. In Analogie zur Mechanik bezeichnen wir im folgenden diese Art der Beschreibung als **Kinematik**.

Kinematische Darstellungen gehören zum traditionellen Instrumentarium der Ökonomie, Ökologie und Technikwissenschaften. Sie können bei geschickter Auswahl der über der Zeit aufgetragenen Kenngrößen eine beträchtliche Aussagekraft besitzen. Wir wollen diese traditionelle Richtung hier nicht weiter betrachten.

5.2 Thermodynamische Beschreibung

Als **thermodynamisch** bezeichnen wir alle Modelle, die sich auf thermodynamische Größen, wie Stoffmengen, Energie und Entropie sowie ihre Flüsse beziehen. Die thermodynamische Beschreibung besitzt ebenfalls eine große Tradition in den ökonomisch-technischen und ökologischen Wissenschaften. Allerdings tritt sie meist in Kombination mit anderen Modelltypen auf. Thermodynamische Modelle ökologischer Systeme wurden z.B. von Morowitz entwickelt und einen Versuch der Aufstellung eines thermodynamischen Gesamtmodells ökonomischer Prozesse hat bereits Georgescu-Roegen Anfang der 70er Jahre dieses Jahrhunderts unternommen (Georgescu-Roegen 1971).

Die traditionellen thermodynamischen Untersuchungen ökologischer, ökonomischer und technischer Prozesse beschränken sich auf die Untersuchungen der Flüsse und Bilanzen der Energie und der Stoffe. Die systematische Analyse der Entropie, ihrer Flüsse und ihrer Bilanz gehört zur Zeit zu den nur teilweise gelösten Fragen der Modellbildung (vgl. Ebeling u. Feistel 1982). Dieses Feld entwickelt sich zur Zeit sehr intensiv. Nicht nur für eine korrekte Modellierung der Probleme der Umwelt und Ressourcen, sondern auch für die vollständige thermodynamische Modellbildung des Produktionsprozesses ist die Einbeziehung der Entropie unabdingbar. Sie ist notwendige Voraussetzung für eine richtige Behandlung der Wirkungsgrade von Prozessen, und nur auf diesem Wege können auch die Erkenntnisse der modernen Thermodynamik irreversibler Prozesse einbezogen werden.

Das entscheidende thermodynamische Maß für die Effektivität der Prozesse ist die Entropieproduktion sowie der zur Selbstorganisation erforderliche Entropieexport. Mit anderen Worten, es muß wertvolle Energie aus den Ressourcen zugeführt werden. Die thermodynamische Situation qualifiziert Produktion als einen Ordnung und Strukturen schaffenden Vorgang, als Prozeß der Selbstorganisation im Sinne der Physik. Wie jeder andere Evolutionsprozeß wird Produktion nicht von außergesellschaftlichen Faktoren gesteuert, sondern entwickelt sich aufgrund innerer Triebkräfte.

Natürlich ist die Thermodynamik nicht imstande, diese inneren Triebkräfte, zu denen auch die Innovationsmechanismen, die Beziehungen Wissenschaft-Bedürfnisse usw. gehören, zu erklären; sie bildet jedoch das Wirken dieser Faktoren korrekt ab. Ganz im Sinne der Auffassung von der Persistenz der physikalischen Bewegungsform in allen höheren Bewegungsformen können thermodynamische Gesetze niemals verletzt werden, sie reichen lediglich für kausale Erklärungen nicht aus. Ganz offensichtlich kann eine umfassende Theorie ökologischer und ökonomischer Prozesse auf das Arsenal der thermodynamischen Methoden nicht verzichten. Da Energie- und Stoffbilanzen schon heute das Rückgrat jeder wirtschaftlichen Planung und Steuerung darstellen, dürften umfassende thermodynamische Analysen zweifellos noch an Bedeutung gewinnen. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß das Problem einer Quantifizierung von Entropieflüssen für ökonomisch-technische Prozesse ebenso wie für ökologische Flüsse und für Flüsse von Ressourcen heute noch nicht gelöst ist.

5.3 Deterministische Dynamik

Als deterministische dynamische Modelle komplexer Prozesse werden solche bezeichnet, die auf Differentialgleichungen (bzw. Differenzgleichungen bei diskreten Zeitschritten) beruhen. Hierbei sind die Variablen bestimmte quantitative Charakteristika der Teilsysteme. Als Beispiel könnten die Variablen die Anteile einer Technologie an der Produktion einer bestimmten Ware darstellen.

Ein Spezialfall ist das Modell von Fisher und Pry, welches den prozentualen Anteil einer neu entstandenen besseren Technologie darstellt. Hierbei wird ein quantitatives Maß für die Überlegenheit der neuen Technologie definiert. Komplizierte Modelle für Selektionsprozesse in ökologischen bzw. ökonomischen Systemen basieren auf Gleichungen vom Lotka–Volterra–Typ (Ebeling et al. 1990). Moderne Untersuchungen zeigen, daß Elemente des Chaos, auch hier definiert durch die Instabilität der Trajektorien der Bewegungen, ein immanenter Bestandteil vieler Modelle und wohl auch der abgebildeten realen Systeme sind. Für die Analyse konkreter Systeme hat die Synergetik ein Fülle von Methoden bereitgestellt, die heute in zunehmenden Maße, z.B. durch die Schule von Weidlich, zur Behandlung ökologisch–ökonomischer Systeme eingesetzt werden (Weidlich und Haag 1988).

5.4 Stochastische Dynamik

Die Methode der deterministischen Dynamik ist sehr leistungsfähig und gestattet bereits die Aufstellung detaillierter Modelle, die das Durchsetzen von neuen Sorten im ökologischen Zusammenhang bzw. neuen Technologien oder auch neuen Denk– und Verhaltensweisen vor dem Hintergrund älterer beschreiben.

In einem Punkt allerdings versagt das deterministische Herangehen: Der stochastische Charakter der Entstehung des Neuen wird nicht widerspiegelt. Die Entstehung von **Neuem** ist in Evolutionsprozessen zwar als Tendenz gesetzmäßig begründet, die genauen Zeitpunkte und Orte des Auftretens sind aber ebensowenig wie die Schöpfer des Neuen genau festgelegt. Zufällige Einflüsse spielen bei der kausalen Festlegung dieser und anderer Umstände der Entstehung des Neuen und insbesondere auch neuer Technologien eine entscheidende Rolle (vgl. Bruckner u.a. 1992).

Mit anderen Worten, gerade die kreativen Aspekte entziehen sich weitgehend einer rein deterministischen Beschreibung. Die Berücksichtigung zufälliger Aspekte erfordert die Benutzung der Theorie der Zufallsprozesse, der Stochastik und der Chaosforschung. Die Entstehung der stochastischen Evolutionstheorie ist historisch eng an die Frage der Modellierung der Biogenese sowie biologischer Populationen geknüpft. Die Leistungsfähigkeit stochastischer Methoden erweist sich aber gerade bei der Anwendung auf die komplexen Prozesse der Evolution im ökologischen Bereich, wie auch bei der Evolution gesellschaftlicher Strukturen (vgl. Ebeling, Engel und Feistel 1990).

5.5 Mögliche Anwendungen und Beispiele

Kommen wir nun zu einer Diskussion vorhandener oder möglicher Anwendungen, wobei wir mit dem Feld sozialer Anwendungen beginnen wollen. Deterministische und stochastische dynamische Modelle unter Berücksichtigung von Evolution und Wandel sind bei der Beschreibung sozialer Systeme von großer Bedeutung.

Weidlich (1991) beschreibt den Weg, der bei der Anwendung von Konzepten der Selbstorganisation zur quantitativen Beschreibung einer breiten Klasse von kollektiven Phänomenen in der Gesellschaft begangen wird. Ausgehend von den Entscheidungen der Individuen und unter Einführung des Konzepts des dynamischen Nutzens können Übergangsraten zwischen Haltungen und Handlungen konstruiert werden. Die zentrale Bewegungsgleichung ist eine Mastergleichung für die Wahrscheinlichkeitsverteilung über die möglichen Makrokonfigurationen der Gesellschaft. Aus der Mastergleichung können die Bewegungsgleichungen für die Erwartungswerte der Makrovariablen der Gesellschaft abgeleitet werden. Sie sind im allgemeinen nichtlinear. Ihre Lösungen können stationäre Lösungen, Grenzyklen und seltsame Attraktoren sowie Phasenübergänge zwischen den verschiedenen Moden gesellschaftlichen Verhaltens einschließen.

Die potentiellen Anwendungsgebiete innerhalb der Gesellschaftswissenschaften sind Soziologie, Demographie, Regionalwissenschaften und Ökonomie, die nun im folgenden einzeln behandelt werden sollen.

Soziologie

Eine Reihe von Veröffentlichungen sind der soziopolitischen Meinungsbildung gewidmet. Effekte von Mehrheitsentscheidungswahlen in hierarchischen Systemen werden von Galam (1991) behandelt. Troitzsch (1988) vergleicht Modelle zur Meinungsänderung von Personen, die in Wechselwirkung mit den Kollektiven stehen, in denen sie leben. Weidlich (1991) beschäftigt sich mit der kollektiven Meinungsbildung in demokratischen Mehrparteiensystemen.

Demographie

Weidlich und Mitarbeiter untersuchten seit einigen Jahren die Wanderung von Populationen in zwei oder mehr Regionen auf stochastischem und deterministischem Niveau. Das Resultat dieser Untersuchung ist, daß Migrationssysteme mit zwei wechselwirkenden Populationen und mindestens drei Regionen hochkomplexes dynamisches Verhalten zeigen. Er stellte strukturelle Analogien zwischen Migration und Meinungsbildung fest. Das Modell wurde auf die interregionale Bewegung innerhalb eines Landes (Frankreich) angewandt.

Reiner (1991) demonstrierte durch dynamische Simulation, daß in Migrationssystemen – in Abhängigkeit von der Art und Stärke der Wechselwirkungen der Teilpopulationen – reguläres und chaotisches Verhalten vorkommen kann.

Regionalwissenschaft

Menschliche Ansiedlungen gehören zu den komplexesten Systemen der Welt. Erst im letz-

ten Jahrzehnt wurde das Problem der Siedlungsbildung dynamisch betrachtet. Wir nennen besonders vier Gruppen von Autoren, die sich dieser Frage widmen: die Gruppe von Allen et al. (1979,1981,1982,1984), Pumain et al. (1987,1989), Clark und Wilson (1983) sowie Weidlich et al. (1988,1990,1991). Allen gemeinsam ist der Versuch, die Selbstorganisation von räumlichen Populationsstrukturen mit Hilfe von nichtlinearen Gleichungen zu beschreiben. Der Kern der Modelle von Allen et al., Pumain et al. sowie Clark und Wilson sind Bewegungsgleichungen des logistischen Typs für die Populationen mit einem Sättigungsniveau, das von der lokalen Arbeitsplatzkapazität abhängt. Die Gleichungen werden durch Einführung neuer Arten von ökonomischen Aktivitäten schrittweise modifiziert, was zu neuen räumlichen Gleichgewichtssituationen führt. Weidlich (1991) unterteilt die Organisation bei der Siedlungsbildung in eine Hierarchie von räumlichen Skalen. Auf der Mikroskala findet die Entwicklung von detaillierten Stadtkonfigurationen statt. Die Mesoskala entspricht der Entwicklung der Dichten von Teilpopulationen. Regionale Populationen entwickeln sich auf der Makroskala. Die einzelnen Skalen wechselwirken über bestimmte Mittelwerte. So wird z.B. die Mesoskala von der Mikroskala durch gemittelte Parameter wie Lebenshaltungskosten und Lebensbedingungen beeinflusst. Die Dynamik ergibt sich aus nichtlinearen und nichtlokalen Migrationsgleichungen (Weidlich und Munz 1990). Weidlich (1991) unternimmt eine formalisierte Beschreibung von Stadtkonfigurationen, bestehend aus Gebäuden und Straßen, und deren Entwicklung auf der Mikroskala. Er betrachtet die Makroskala im Hinblick auf die Agglomeration von Populationen. Ein nichtlineares Modell der interregionalen Migration zeigt den Selbstorganisationscharakter der Agglomerationsprozesse. Auf der Mesoskala werden ökonomische Aktivitäten einbezogen, um die zeitliche Entwicklung der räumlichen Dichten von ökonomisch wechselwirkenden Teilpopulationen einer geschlossenen Gesellschaft zu beschreiben.

Die Abschätzung der Effekte der technologischen Innovation auf die räumliche Organisation von Stadtssystemen erlangte in den letzten Jahren eine ständig wachsende Bedeutung für Geographen. Haag und Lombardo (1991) halten Synergieeffekte für wesentlich, um das Wachstumsmuster von Stadtssystemen zu verstehen. Sie untersuchten die Existenz, die Natur und das Ausmaß der Beziehungen zwischen der Anwendung von neuen Informationstechnologien und den Prozessen der Veränderung von Stadtssystemen anhand eines dynamischen Modells. Speziell prüften sie, ob eine geplante räumliche Entwicklung (Netzwerk) einer neuen Informationstechnologie in der Lage ist, das räumliche Muster von ökonomischen Aktivitäten zu beeinflussen. Das Modell wurde auf die Entwicklung der Stadtfläche von Rom angewandt.

Ökonomie

Ökonomie ist die Gesellschaftswissenschaft mit der stärksten Tradition in der quantitativen Theorie. Die klassische Ökonomie bediente sich bei der Beschreibung wirtschaftlicher Vorgänge vorwiegend linearer Modelle. Es stellte sich heraus, daß solche Modelle für eine Vielzahl von Erscheinungen adäquat sind. Jedoch nicht alle ökonomischen Phänomene lassen sich damit beschreiben. In letzter Zeit gab es vielversprechende Ansätze zur nichtlinearen ökonomischen Dynamik (Arthur 1988,1990; Puu 1989; Wei-Bin Zhang 1991). Mit ihrer Hilfe werden ökonomische Instabilitäten, Übergänge von einer dynamischen Mode zu

einer anderen, ökonomische Zyklen und chaotische Dynamik beschreibbar. Im folgenden sollen einige Arbeiten genannt werden, die sich mit der dynamischen Modellierung von Teilproblemen der Ökonomie beschäftigen:

Ebeling et al. (1990,1991,1992) untersuchten stochastische Modelle von Konkurrenzprozessen sowie stochastische Modelle für das Entstehen des *NEUEN*. Feistel (1991) beschäftigte sich mit dem Wertkonzept in der Ökonomie. Weidlich (1991) erstellte eine Analyse von Markt-Instabilitäten. Beckenbach untersuchte die Entwicklung einer ökologischen Sensibilität in der Ökonomie als einen Prozeß der Selbstorganisation. Selbstorganisation spielt auch in der Managementtheorie eine große Rolle (Balck 1990, Boos und Doujak 1990). Kramer (1991) untersuchte Modelle der Ausbeutung von begrenzten Ressourcen. Es ist zu hoffen, daß quantitative Modelle weitere Einsichten in die strukturellen Beziehungen zwischen scheinbar unzusammenhängenden Phänomenen in den Gesellschaftswissenschaften liefern.

Ökologie

In einem viel diskutierten Buch hat Ossip Flechtheim die Frage aufgeworfen: “Ist die Zukunft noch zu retten?”. Wie geht es weiter mit der Evolution auf unserem Erdball? Quo Vadis Evolutio? Ist die Selbstorganisation ein *Zukunftsrezept*, ist es die Instabilität oder der chaotische Charakter der Entwicklung?

Eingeschränkte Selbstorganisation und Diversität in Verbindung mit Kreativität und Toleranz kann ein Rezept für die Gestaltung der ökologisch-ökonomischen und soziokulturellen Zukunft sein. Die zu beachtenden Schranken ergeben sich aus physikalischer Sicht insbesondere aus der Begrenztheit der verfügbaren Ströme von wertvoller Energie bzw. von Entropie und aus den Grenzen der Stabilität des ökologisch-ökonomischen Gesamtsystems unserer Erde (Stahl 1993).

Der Strom wertvoller Sonnenenergie, welcher der Erde im Durchschnitt zufließt, beträgt etwa 2×10^{17} Watt. Der gleiche Energiestrom fließt in geringerer Qualität (bei niedrigerer Temperatur) wieder in den Weltraum zurück. Dieser Strom treibt alles komplexe Geschehen auf unserem Planeten an, vom Wetter bis zur Photosynthese. In diesem Zusammenhang wurde von uns der Begriff *Photonenmühle* geprägt (vgl. Ebeling, 1989). Dieser Energiestrom entspricht auch einem Entropiestrom, einem Exportstrom, von etwa 1 Watt/Kelvin bezogen auf den Quadratmeter Erdoberfläche. Wenn auf lange Sicht mehr als 1 Watt/Kelvin Entropie pro Quadratmeter Erdoberfläche produziert wird, so wird “Entropie-Müll” angehäuft. Hier liegen die letzten, physikalisch verbindlichen Grenzen des Wachstums.

Wenn alle “Brennstoffe” verbraucht sein werden, wird nicht mehr als 200 Watt wertvoller Sonnenenergie pro Quadratmeter als “Guthaben” zur Verfügung stehen und zwar für alle meteorologischen, biologischen, ökologischen und ökonomischen Prozesse zusammengekommen. Nur etwa ein Fünftausendstel dieses Stromes kommt der Photosynthese zugute, d.h. etwa 4×10^{13} Watt. Wenn jeder der etwa 4 Milliarden Erdenbürger einen Strom wertvoller Energie von 10 kW beanspruchen würde, ergäben sich auch schon 4×10^{13} Watt.

Mit anderen Worten, wer täglich zwei Stunden Auto fährt und viele elektrische Geräte betreibt, überzieht schon sein Konto; er nimmt anderen etwas weg, insbesondere auch sei-

nen Kindern und Enkelkindern. Der Aufbau von *Scheren* im Verbrauch wertvoller Energie zwischen Nord und Süd oder West und Ost ist langfristig auch eine potentielle Gefahr für die globale politisch-ökonomische Stabilität. Auf der anderen Seite sind die Grenzen der ökologisch-ökonomischen Stabilität offenbar schon längst erreicht. Das beweist uns das Waldsterben, das an Brisanz nur noch durch ein Meeressterben übertroffen werden könnte.

Die bestehenden Disproportionen sind das Resultat einer ungebremsten Selbstorganisation und einer unkontrollierten Instabilität, d.h. eines "ungeordneten Chaos". Geregeltes Chaos schließt auch das bewußte Experiment mit neuen Verhaltensweisen und Formen des Zusammenlebens ein. Das Ausprobieren und Bewerten neuer Wege ist die Hauptmethode der Evolution. In diesem Sinne gibt es zwar Sackgassen, die nach negativer Bewertung wieder verlassen werden, aber im Gesamtprozeß einen Sinn haben. Der Suchprozeß ist seinem Wesen nach stochastisch. Wer Diversität und stochastische Suche durch den einen "Königsweg" ersetzen möchte, verkennt die treibende Kraft des chaotischen Elementes in der Evolution.

Welche Schlußfolgerungen ergeben sich aus obigen, physikalisch motivierten Überlegungen?

1. Die Überschreitung eines ökologisch vertretbaren Durchschnitts im Verbrauch wertvoller Energie (bzw. in der Produktion von Entropie) ist eine "Todsünde" im Hinblick auf das Schicksal unserer Kinder und Enkel. Sie müßte mit progressiv steigenden, hohen Kosten für Überschreitungen bestraft werden.
2. Die Instabilität bzw. Divergenz der individuellen Bahnen, ihr chaotischer Charakter, sind eine notwendige Vorbedingung für die Erzeugung eines genügend großen Potentials an Kreativität. Kreatives und innovatives Verhalten sowie stochastische Suche mit Einschluß von individueller und gesellschaftlicher Bewertung ist Pflicht. Die notwendige Einschränkung lautet: Soweit dieses nicht die thermodynamischen Grenzen oder die Interessen anderer wesentlich verletzt.
3. Auf der Basis beschränkter thermodynamischer Ströme sollte Diversität in jeder Hinsicht, beginnend von der Vielfalt der biologischen Arten bis hin zur Vielfalt im ethnischen, sprachlichen, sozialen, geistigen und kulturellen Bereich, nicht nur zugelassen, sondern sogar gefördert und belohnt werden.
4. Intoleranz, welche die Bewegungsfreiheit der anderen einschränkt und alles nach einheitlichen Maßstäben ausrichtet, schränkt die Kreativität – und damit auch die Vielfalt der Wege in die Zukunft – in unvertretbarer Weise ein.

Mit anderen Worten: Zukunft durch eingeschränkte Selbstorganisation und kontrollierte Instabilität heißt lokal: Divergenz und Chaos, heißt global: Diversität der Arten und Bewegungsformen, Denk- und Lebensweisen vor dem Hintergrund einer Selbstbeschränkung der thermodynamischen Kosten, heißt: Kreativität in Verbindung mit Toleranz und Verantwortung gegenüber der zukünftigen Entwicklung. Wenn die Synergetik

dazu beitragen kann, neue Denkanstöße zur Lösung globaler Probleme zu liefern, so kann man sicher auch darin einen wichtigen Nutzen sehen.

Kapitel 6

Abschließende Bemerkungen

Die Synergetik bzw. Theorie der Selbstorganisation befindet sich heute noch in einer Phase des exponentiellen Wachstums und ihre praktische Nutzung im Anfangsstadium. In einer solchen Phase – und das hat auch die Arbeit an dieser Studie gezeigt – muß jeder Versuch einer Zusammenfassung ein Fragment bleiben, das weitgehend durch die Interessen der Mitarbeiter geprägt wird. Unsere Untersuchungen haben im wesentlichen gezeigt, daß die Ansätze einer Nutzung synergetischer Prinzipien außerordentlich vielfältig sind und daß die Literatur dazu weit gestreut ist. Wir haben versucht, auf einige Richtungen zu verweisen, deren Verfolgung wir für wichtig halten. Auf der anderen Seite haben wir uns aber auch bemüht, nicht den Eindruck zu erwecken, als liefere die Synergetik auf jede Frage eine Antwort und für jedes praktische Problem eine Anwendung.

Literaturverzeichnis

1. Abley, P.: Optimieren mit Evolutionsstrategien; Spektrum der Wissenschaft, Juli 1987, 104
2. Ackley, D.H.; Hinton, G.E.; Sejnovski, T.J.: Learning Algorithm for Boltzmann Machines; Cognitive Science 9 (1985) 147–169
3. Agladze, K.I.; Krinsky, V.I.: Nature 308 (1984), 835
4. Aleksander, I.: Fused electronic circuit which learn by example; Electronic Letters 1 (1965) 6
5. Aleksander, I.: The logic of Connectionist Systems; IEE Computer 1988
6. Allen, P.M.; McGlade, J.M.: Modelling Complexity: the Dynamics of Discovery and Exploitation in a Fisheries Example; in: I. Prigogine, M. Sanglier (Eds.): *Laws of Nature and Human Conduct*; Brüssel 1987, p. 49
7. Allen, P.M.; Sanglier, M.: A dynamic model of a central place system; Geographical Analysis 11 (1979), 256
8. Allen, P.M.; Sanglier, M.: Urban evolution, self-organisation and decision making; Environment and Planning A 13 (1981), 167
9. Allen, P.M.: Evolution, modelling and design in a complex world; Environment and Planning B 9 (1982), 95
10. Allen, P.M.; Sanglier, M.; Engelen, G.; Boon, F.: Evolutionary spatial models of urban and regional systems; Sistemi Urbani 1 (1984)
11. Amari, S.; Arbib, M.A.: Competition and Cooperation in Neural Nets; Springer-Verlag, Berlin 1982
12. Amit, D.; Gutfreund, H.; Sompolinsky, H.: Storing Infinite Numbers of Patterns in a Spin-Glass Model of Neural Networks; Phys. Rev. Lett. 55 (1985) 1530
13. Amit, D.; Gutfreund, H.; Sompolinsky, H.: Statistical mechanics of neural networks near saturation; Ann. Phys. (N.Y.) 173 (1987) 30

14. Andresen, B.; Berry, R.; Nitzan, A.; Salomon, P.: Thermodynamics in finite time; Phys. Rev. A15(1977)2086
15. Andronov, A.A.; Witt, A.A.; Chaikin, S.E.: Theorie der Schwingungen – Teile I und II; Akademie-Verlag, Berlin 1965, 1969
16. Aris, R.: On Stability Criteria of Chemical Reaction Engineering; Chem. Engng. Sci. 24 (1969) 149–169
17. Arndt, S.; Klinke, W.; Geisler, U.: Biotechnologie – Stand und Perspektiven; URANIA Berlin 1984
18. Arthur, W.B.: Self-reinforcing mechanisms in economics, in: *The economy as an evolving complex system*, eds. K.J. Arrow, P.W. Anderson und D.Pines; Addison-Wesley, Reading, MA 1988
19. Arthur, W.B.: Positive feedbacks in the economy; Sci. Am. 80–85 (1990)
20. Aspects of energy conversion; (Proceedings of a Summer School held at Lincoln College, Oxford July 1975); Oxford Pergamon Press 1976
21. Autorenkollektiv: Erhöhung der Verschleißfestigkeit auf der Grundlage der selektiven Übertragung; Verlag Technik, Berlin 1981
22. Balck, H.: Paradigm change in Project management – projects as a form of change, Proc. of the 10th INTERNET World Congress on Project Management; MANZ Verlag, Wien 1990
23. Balkarei, Yu.I.; Nikulin, M.G.: Über die Modellierung von Autowellenmedien in Halbleitern (in Russ.); Fizyka. Tekhn. Polupr. 10(1976)1455, Nr. 8
24. Balkarei, Yu.I.; Nikulin, M.G.: Über diffusionsartige periodische Zerschichtung in Nichtgleichgewichtshalbleitern (in Russ.); Fizyka. Tekhn. Polupr. 10(1976)2039, Nr. 11
25. Balkarei, Yu.I.; Nikulin, M.G.: Selbstfokussierung und Automodellierung von Wellen in einem Medium von durch Diffusion verbundenen Van der Pol-Oszillatoren (in Russ.); Shurn. Tekhn. Fiz. 49(1979)2248, Nr. 10
26. Balkarei, Yu.I.; Elinson, M.I.; Nikulin, M.S.: Autowellenmedium mit Gedächtnis (in Russ.); Mikroelektronika 6(1977)152, Nr. 2
27. Balkarei, Yu.I.; Nikulin, M.G.; Elinson, M.I.: Autowellenmedium auf der Grundlage eines Flüssigkristallhalbleitersystems (in Russ.); Brief in Shurn. Tekhn. Fiz. 3(1977)265, Nr. 6
28. Balkarei, Yu.I.; Nikulin, M.G.: Halbleiterautowellenmedium (in Russ.); Fizyka. Tekhn. Polupr. 12(1978)347, Nr. 2

29. Balkarei, Yu.I.; Epstein, E.M.: Schwingungs- und Wellenprozesse bei optischem Wärmedurchschlag von Halbleitern (in Russ.); *Fizyka. Tekhn. Polupr.* 13(1979)65, Nr. 1
30. Balkarei, Yu.I.; Nikulin, M.G.: Über nichtlineare Wellen in einem Medium von durch Diffusion verbundenen Van der Pol-Oszillatoren (in Russ.); *Shurn. Tekhn. Fiz.* 49(1979)231, Nr. 2
31. Balkarei, Yu.I.; Elinson, M.I.: Metastabile Autowellensysteme (in Russ.); *Mikroelektronika* 8(1979)428, Nr. 5
32. Balkarei, Yu.I.; Evtichov, M.G.; Elinson, M.I.: Lokalisierte, stationäre Zustände in verteilten Autowellensystemen (in Russ.); *Mikroelektronika* 8(1979)493, Nr. 6
33. Balkarei, Yu.I.; Evtichov, M.G.; Elinson, M.I.: Lokalisierte, stationäre Zustände im zweidimensionalen Diffusionsautowellensystem (in Russ.); *Mikroelektronika* 9(1980)144, Nr. 2
34. Balkarei, Yu.I.; Sandomirskii, W.B.: Thermokonzentriertes Nichtgleichgewichtssystem nahe der Instabilität in Bezug auf die Schichtenbildung (in Russ.); *Fizyka. Tekhn. Polupr.* 14(1980)796, Nr. 4
35. Balkarei, Yu.I.; Sacharova, A.A.: Thermokonzentrationsautowellensysteme bei optischer Erregung des Halbleiters nahe der Kante der eigentlichen Absorption (in Russ.); *Fizyka. Tekhn. Polupr.* 14(1980)1791, Nr. 9
36. Balkarei, Yu.I.; Evtichov, M.G.; Elinson, M.I.: Untersuchung der Erscheinung des Selbstaufbaus zum aktiven Diffusionsmedium (in Russ.); *Mikroelektronika* 10(1981)78, Nr. 1
37. Balkarei, Yu.I.; Sacharova, A.A.; Elinson, M.I.: Über die Möglichkeit des Aufbaus metastabiler aktiver verteilter Systeme (in Russ.); *Mikroelektronika* 10(1981)260, Nr. 3
38. Balkarei, Yu.I.; Elinson, M.I.: Perspektiven der Autowellensystem-Elektronik (in Russ.); *Elektronnaya Promyshl.* 8(1983)11
39. Bauer, M.; Martienssen, W.: Lyapunov exponents and dimensions of chaotic and neural networks; *J. Phys. A* 24(1991)4557
40. Bauer, M.; Habib, S.; He, D. R.; Martienssen, W.: New type of intermittency in discontinuous maps; *Phys. Rev. Lett.* 68(1992)1625
41. Baumol, W.; Benhabib, J.: Chaos: Significance, Mechanism, and Economic Applications; in: *Journal of Economic Perspectives* 3(1989)1, 77
42. Baras, F. et al.: Stochastic theory of adiabatic explosion; Preprint ULB Brüssel 1983

43. Barelko, V.V.; Kurochka, I.I.; Merzhanov, A.G.: Dokl. Akad. Nauk SSSR 229(4) (1976), 298
44. Barelko, V.V.; Kurochka, I.I.; Merzhanov, A.G.; Schkadinskii, K.G.: Investigation of travelling waves on catalytic wires; Chem.Eng.Sci. 33(1978)805
45. Barelko, V.V.; Volodin, Yu.E.: Über die Ausbreitung der Aktivitätswelle auf der Oberfläche des Katalysators (in Russ.); Dokl. Akad. Nauk. SSSR 223(1983)112, Nr. 1
46. Bartel, H.–G.: Johann Wilhelm Ritters Gedanken zur Selbstorganisation, in: W. Krohn, G. Küppers (Hrsg.): *Konzepte von Chaos und Selbstorganisation in der Geschichte der Wissenschaften*; Duncker & Humblot, Berlin, 1992, S. 113–128
47. Bateson, G.: *Ökologie des Geistes – Anthropologische, psychologische und epistemologische Perspektiven*; STW 571, Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1981
48. Berge, P.; Pomeau, Y.; Vidal, C.: *Order within Chaos: towards a Deterministic Approach to turbulence*; Wiley and Sons, New York 1984
49. Bernal, I.D.: *Die Wissenschaft in der Geschichte*; Verlag der Wissenschaft, Berlin 1967
50. Bershadski, L.I.: *Selbstorganisation und Zuverlässigkeit von Reibungssystemen (in Russ.)*; “Wissen”, Kiew 1981
51. Bierfelder, W.: *Entwicklungsdynamik von Unternehmen: Gestaltung von Übergängen und Selbstorganisation*; Gabler, Wiesbaden, 1991, 253 S.
52. Billa, B.; et al.: Morphological stability of a planar interface; J. Cryst. Growth 44(1978)235; 49(1981)431; 50(1981)81
53. Boos, F.; Doujak, A.: How to improve failing in planning, *Proc. of the 10th INTERNET World Congress on Project Management*; MANZ Verlag, Wien 1990
54. Boseniuk, T.; Ebeling, W.; Engel, A.: Boltzmann and Darwin Strategies in Complex Optimization; Physics Letters 125 (1987) 307
55. Brandstätter A.; Swift J.; Swinney H.L.; Wolf A.: Low-dimensional chaos in a hydrodynamic system; Phys. Rev. Lett. 51 (1983), 1442
56. W. A. Brock: *Chaos and Complexity in Economic and Financial Science*; in: *Social Systems Research Institute Reprint-Series*, No. 382; University of Wisconsin–Madison 1990
57. Bruckner, E.; Ebeling, W.; Jimenez Montano, M.A.; Scharnhorst, A.: *Technological Innovations – a Selforganisation Approach*; WZB Preprint (1992)

58. Bruckner, E.; Ebeling, W.; Scharnhorst, A.: The Application of Evolution Models in Scientometrics; in: *Scientometrics* Vol. 18, Nos 1–2, 1990, p. 21
59. Bukatova, I.L.; Elinson, M.I.; Scharov, A.M.: Optoelektronisches Gerüst zur Wahrnehmung zweidimensionaler Darstellungen (in Russ.); *Mikroelektronika* 7(1978)397 Nr. 5
60. Cartianu, D.: Synchronization Phenomena in Reaction Diffusion System BSB; B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1986
61. Chen, P.: Empirical and Theoretical Evidence of Economic Chaos; *System Dynamics Review* 4(1988)81
62. Chowdhury, D.: Spin Glasses and Other Frustrated Systems; World Scientific, Singapore 1986
63. Christiansen, B.; He, D. R.; Habip, S.; Bauer, M.; Krueger, U.; Martienssen, W.: Phase diagram of a modulated relaxation oscillator with a finite resetting time; *Phys. Rev. A* 45(1992)8450
64. Clarke, M.; Wilson, A.G.: The dynamics of urban spatial structure: progress and problems; *Journal of Regional Science* 23 (1983), 1
65. Conrad, M.: On Design Principles for a Molecular Computer; *Communications of the ACM* 28 (1985), 464
66. Conrad, M.: The lure of molecular computing, *IEEE Spectrum* 11 (1986), 55
67. Conrad, M.: Physics, Evolution and Information Processing, in: *Irreversible Processes and Selforganization*, Teubner Texte zur Physik; BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1989
68. Cramer, F.: Chaos und Ordnung – Die komplexe Struktur des Lebendigen; DVA, Stuttgart 1988
69. Cramer, F.; Kaempfer, W.: Die Natur der Schönheit – Zur Dynamik der schönen Formen; Frankfurt a.M., Leipzig 1992
70. Crepeau, J. C.; Isaacson, L. K.: On the Spectral Entropy Behavior of Self-Organizing Processes; *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 15, 1990, pp. 115–126
71. Crepeau, J. C.; Isaacson, L. K.: Spectral Entropy as a Measure of Self-Organization in Transition Flows, *Proc. NATO Advanced Research Workshop on Self-Organization, Emerging Properties and Learning*, ed. A. Babloyantz; Plenum Press, Vol. 260, 1991, pp. 287–294

72. Crepeau, J. C.; Isaacson, L. K.: Spectral Entropy Measurements of Coherent Structures in an Evolving Shear Layer; *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 16, 1991, pp. 137–151
73. Crepeau, J. C.: Deterministic Analysis of a Free Shear Layer; *AIAA Student Journal*, Vol. 28, Number 4, Winter 1991, pp. 2–5
74. Crick, F.C.; Mitchison, G.: The function of dream sleep; *Nature* 304 (1983), 111
75. Crutchfield J.P.; McNamara B.S.: Equations of motion from a data series; *Compl. Sys.* 1 (1987), 417
76. Curzon, F.L.; Ahlborn, B.: Efficiency of a Carnot Engine at Maximum Power Output; *AJP* 43(1975)22
77. Davenport, J.M.; Petti, R.J.: Acoustic resonance phenomena in low wattage metal halide lamps, *Journal of IES*, April 1985, p. 633
78. De Groot, S.P.; Mazur, P.: *Anwendung der Thermodynamik irreversibler Prozesse*; Mannheim 1974
79. Deppisch, J.; Bauer, H.-U.; Geisel, T.: Hierarchical training of neural networks and prediction of chaotic time series; *Phys. Lett. A* 158(1991)57
80. Deubigh, K.G.: *Chemical Reactor Theory*; Cambridge 1965
81. Dörning, J.; Hülsig, C.: Filterentwurf nach dem Optimierungsprinzip der biologischen Evolution; *26. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TH Ilmenau*, TH Ilmenau 1981
82. Dress, A.; Jaeger, N.I.; Plath, P.J.: Zur Dynamik idealer Speicher – Ein einfaches mathematisches Modell; *Theor. Chim. Acta* 61 (1982),437
83. Dress, A.; Hendrichs, H.; Küppers, G. (Hrsg.): *Selbstorganisation – Die Entstehung von Ordnung in Natur und Gesellschaft*; Piper, München 1986, 234 S.
84. Dunham, B.; North, J.H.: The multipurpose Bias Device – Part II; *IBM Journal of Research and Development* 3(1959),46–53
85. Dunham, B.; North, J.H.: The Use of Multipurpose Logical Devices, *Proceedings of an Intern. Symp. on the Theory of Switching*, Part II, pp. 192–200; Harvard University Press 1959
86. Dunham, B.; Fridshal, D.; Fridshal, R.; North, J.H.: Design by natural selection; *Synthese* 15 (1963),254
87. Ebeling, W.: *Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen*; Teubner-Verlag, Leipzig 1976

88. Ebeling, W.: Pattern Dynamics and Optimization by Reaction Diffusion Systems; J. Stat. Phys. 45 (1986), 891
89. Ebeling, W.: *Chaos, Ordnung und Information – Selbstorganisation in Natur und Technik*, Reihe: *Wir und die Natur*; Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1989, 118 S.
90. Ebeling, W.; Bruckner, E.; Jimenez Montano, M.A.; Scharnhorst, A.: A Stochastic Model of Technological Change; in: Haag, G. (Ed.): *Economic Evolution and Demographic Change* Springer Verlag, Berlin 1992 (im Druck)
91. Ebeling, W.; Engel, A.: Models of Evolutionary Systems and Their Application to Optimization Problems; Syst. Anal. Model. Simul. 3 (1986), 377
92. Ebeling, W.; Engel, A.; Feistel, R.: *Physik der Evolutionsprozesse*; Akademie Verlag, Berlin 1990
93. Ebeling W.; Engel–Herbert H.; Herzel H.: *Selbstorganisation in der Zeit*; Akademie-Verlag, Berlin 1990
94. Ebeling, W.; Feistel, R.: *Physik der Selbstorganisation und Evolution*; Akademie-Verlag, Berlin 1982
95. Ebeling, W.; Feistel, R.: *Thermodynamik irreversibler Prozesse und spontane Strukturbildung mit Beispielen aus Physik und Geophysik*; Sitz. Ber. Geophys. AdW, 1983
96. Ebeling, W.; Feistel, R.; Herzel, H.: Dynamics and Complexity of Biomolecules; *Physica Scripta* 35 (1987), 761
97. Ebeling, W.; Förster, A.; Mügge, I.: Verfahren und Schaltungsanordnung zum Betrieb von Entladungslampen, Patentschrift DD 293 242 A5 (Int. Class. H 05 B 41/24), Offenlegungsschrift DE 41 09 344 A1 (Int. Class. H 05 B 41/24), 1991
98. Ebeling, W.; Feudel, U.: Influence of Coulomb Interactions on Dissipative Structures in Reaction Diffusion Systems; *Ann. Phys.* 40(1981)68, Heft 1
99. Ebeling, W.; Herzel, H.; Richert, W.; Schimansky-Geier, L.: Influence of Noise on Duffing – van der Pol Oscillators; *ZAMM* 66(1986)141
100. Ebeling, W.; Peschel, M.; Weidlich, W.: Models of Selforganization, in *Complex Systems Mathematical Research* Vol. 64; Akademie-Verlag, Berlin 1991, 336 S.
101. Eckmann J.-P.; Ruelle D.: Ergodic theory of chaos and strange attractors; *Rev. Mod. Phys.* 57 (1985), 617; Addendum 57, 1115
102. Eigen, M.: The Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules; *Naturwissenschaften* 58 (1971), 465

103. Eigen, M.; Schuster, P.: *The Hypercycle*; Heidelberg/Berlin/New York, 1979
104. Eigen, M.; Winkler, R.: *Das Spiel – Naturgesetze steuern den Zufall*; Piper, München 1975
105. Eigen, M.: *Viren als Modelle der molekularen Evolution*; *Naturwissenschaftl. Rundschau*, 11, 1992
106. Eigen, M.: *Virus-Quasispezies oder die Büchse der Pandora*; *Spektrum der Wissenschaft*, 12, 1992
107. Eiswirth, R.M.; Krischer, K.; Ertl, G.: *Nonlinear Dynamics in the CO–Oxidation on Pt Single Crystal Surfaces*; *Appl. Phys.* 51A, 79 (1990)
108. Eiswirth, R.M.; Krischer, K.; Ertl, G.: *Transition to Chaos in an oscillating surface reaction*; *Surface Sci.* 202, (1988), 565-591
109. Eiswirth, R.M.; Möller, P.; Wetzl, K.; Imbihl, R.; Ertl, G.: *Mechanisms of spatial self-organization in isothermal kinetic oscillations during the catalytic CO oxidation on Pt single crystal surfaces*; *J.Chem.Phys.* 90 (1989), 510-521
110. Evtichov, M.G.; Balkarei, Yu.I.; Nikulin, M.G.; Elinson, M.I.: *Mathematische Modellierung des dynamischen Phasengedächtnisses eines Autowellensystems (in Russ.)*; *Mikroelektronika* 7(1978)421, Nr. 5
111. Farmer J.D.; Sidorovich J.J.: *Predicting chaotic time series*; *Phys. Rev. Lett.* 59 (1987), 845
112. Farmer J.D.; Sidorovich J.J.: *Exploiting Chaos to predict the Future and reduce Noise*; Los Alamos Preprint, LA–UR–88–901, 1988
113. Feder, J.: *Fractals*; Plenum Press, New York 1988
114. Feistel, R.; Ebeling, W.: *Models of Darwin Processes and Evolutionary Principles*; *Biosystems* 15(1982)291
115. Feistel, R.; Ebeling, W.: *Energieumwandlung auf der Grundlage isothermer dissipativer Strukturen*; *Exp. Techn. Phys.* 32(1984)1, Heft 1
116. Feistel, R.; Ebeling, W.: *Evolution of Complex Systems*; VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1989; Kluwer Academic. Publ., Dordrecht 1989
117. Feistel, R.: *On the value concept in economy*, in: *Models of Selforganization in Complex Systems*; Akademie Verlag, Berlin 1991
118. Feny, I.: *Moderne Mathematische Methoden in der Technik*, Birkhäuser, Basel 1980 *Internationale Schriftenreihe zur numerischen Mathematik, Bd. 3*

119. Field, R.J.; Burger, M. (eds.): Oscillations and Travelling Waves in Chemical Systems; Wiley, New York 1985
120. Fisher, I.; Hartmann, K.: Intensivierung der Produktion durch effektiven Einsatz von Industrierobotern; Wirtsch. Wiss. 30(1982)1601
121. Fisher, K. H.; Hertz, J. A.: Spin Glasses; Cambridge University Press, Cambridge 1991
122. Fleischmann, R.; Geisel, T.; Ketzmerick, R.: Magneto resistance due to chaos and nonlinear resonances in lateral surface superlattices; Phys. Rev. Lett. 68(1992)1367
123. Foerster, H. von: On Self-Organizing Systems and their Environment, in: M.C. Yovits, S. Cameron (Eds.): *Self-Organizing Systems*; Pergamon Press, London 1960, p. 31
124. Frankhauser, P.: Fractal Aspects of Urban Structures; Mitteilungen des SFB 230, Heft 2, Stuttgart 1988, S.67–76
125. Frankowicz, M.; Nicolis, G.: Stochastic Analysis of Explosive Behaviour in a Chemical System; J. Stat. Phys. 33(1983)595
126. Fratscher, W.: Thermodynamik und rationelle Energieanwendung; Institut für Energetik, Zentralstelle für rationelle Energieanwendung, Leipzig 1978
127. Frehland, E. (ed.): Synergetics – from microscopic to macroscopic Order; Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1984
128. Friedberg, R.M.; Dunham, B.; North, J.H.: A Learning Maschine, Part II.; IBM Journal 3(1959)282
129. Gafitschuk, V.V.; Kerner, B.S.; Osipov, V.V.: Bedingungen der Strom- oder Feldschichtbildung im Elektronen-Loch-Plasma; Fizyka. Tekhn. Polupr. 15(1981)2171, Nr. 11
130. Galam, S.: Renormalisation group, political paradoxes, and hierarchies; in: Models of Selforganization in Complex Systems; Akademie Verlag, Berlin 1991
131. Galam, S.; Moscovich, S.: Towards a theory of collective phenomena: Consensus and attitude change in groups; in: *European Journal of Social Psychology*; 21(1991)49
132. Garkunov, A.I. (Hrsg.): Selektive Übertragung in hochbelasteten Reibungsgliedern (russ.); Moskau 1982
133. Geisel, T.; Ketzmerick, R.; Schedletzky, O.: Classical Hall plateau in ballistic microjunctions; Phys. Rev. Lett. 69(1992)1680
134. Gelfand, I.M.; Zetlin, M.L.: Über kontinuierliche Modelle von Regulationssystemen (in Russ.); Dokl. Ak. Nauk SSSR, 181(1960)1242

135. Georgescu–Roegen, N.: Entropy and the Economic Process; Harvard Uni. Press, Cambridge Mass. 1971
136. Gibbs, H.; et al. (Eds.): Optical Bisability / III; Springer–Verlag, Berlin/Heidelberg–New York 1986
137. Goldbeter, A.: Mathematical Models in Molecular and Cellular Biologyin, L.A. Segel (ed.); Cambridge University Press, Cambridge 1980
138. Golik, L.L.; Nemenustschii, V.N.; Elinson, M.I.; Balkarei, Yu.I.: Nichtlineare Frontwelle im zweidimensionalen Festkörper–Autowellenmedium (in Russ.); Brief in Shurhn. Tekhn. Fiz. 7(1981), Nr. 20
139. Graf H.: Abkühlung der Nordhemisphäre – ein möglicher Trigger für El Niño/Southern Oscillation – Episoden; Naturwiss. 73 (1986), 258
140. Grassberger P.; Procaccia I.: Measuring the strangeness of strange attractors; Physica D9 (1983), 189
141. Grechova, M.T. (Ed.): Autowellen–Prozesse in Systemen mit Diffusion (in Russ.); Akademie, Gorky 1981
142. Grunow, R.: Was ist, was kann Biotechnologie; Wiss. u. Fortschritt 33(1983)112
143. Gudowska–Nowak, E.: Cancer growth as a nucleation – Three dimensional case; Acta Phys. Pol. A64(1983)341, No 3
144. Haag, G.; Lombardo, S.: Information Technologies and spatial organization of urban systems: a dynamic simulation model, in: *Models of Selforganization in Complex Systems*; Akademie Verlag, Berlin 1991
145. Haddon, R.; Lamola, A.: The organic computer – Can microchips be built by bacteria?; Sciences N.Y. 23(1983)40, Nr. 3
146. Haken, H.: Synergetics. An Introduction; Springer, Berlin/Heidelberg/New York 1978
147. Haken, H.: Pattern Formation and Pattern Recognition – An Attempt at a Synthetics, in: *Pattern Formation by Dynamical Systems and Pattern Recognition* (ed.: H. Haken); Springer Verlag, Berlin 1979
148. Haken, H.: Advanced Synergetics – Instability Hierarchies of Self–Organizing Systems and Devices; Springer, Berlin/Heidelberg/New York 1983
149. Haken, H.: Information and Self–Organization; Springer, Berlin/Heidelberg/New York 1988

150. Haken, H.; Graham, R.: Synergetik – Die Lehre vom Zusammenwirken; Umschau in Wissenschaft und Technik 6 (1971), 191
151. Haken, H.; Stadler, M. (Eds.): Synergetics of Cognition; Springer, Berlin/Heidelberg/New York 1990
152. Haken, H.: Erfolgsgeheimnisse der Natur – Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken; DV, Frankfurt a.M., 1988
153. Haken, H.; Wunderlin, A.: Die Selbststrukturierung der Materie – Synergetik in der unbelebten Welt; Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1991, 466 S.
154. Havlin, S.; Ben-Avraham, D.: Diffusion in disordered media; Adv.Phys. 36 (1987), 695
155. Hebb, D. O.: The Organization of Behaviour; Wiley, New York 1949
156. Heidelberger, M.: Selbstorganisation im 19. Jahrhundert, in: W. Krohn, G. Küppers (Hrsg.): *Selbstorganisation – Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*; Vieweg, Braunschweig 1990, S. 67–104
157. Hemmen, J.L. van; Morgenstern, I. (Eds.): Proceedings of the Heidelberg Colloquium on Glassy Dynamics 1986, Lecture Notes in Physics 275 (1987); Springer Verlag, Berlin 1987
158. Heng, H.; Martienssen, W.: Analysing the chaotic motion of a driven pendulum; Chaos, Solitons, Fractals 2(1992)323
159. Herrmann, H. J.: Simulation Of Granular Media; KFA–preprint HLRZ 45/92
160. Herzel, H.: Zustandmodelle von Bioreaktoren; Math.–Naturwiss. Manuskripte der Humboldt–Univ. 1, Heft 1(1989)5
161. Herzel, H.; Ebeling, W.: Effects of Noise and Inhomogeneous Attractors in Biochemical Systems; Biomedica Biochemica Acta 49(1990)941
162. Herzel, H.; Plath, P.; Svensson, P.: Experimental Evidence of Homoclinic Chaos and Type II Intermittency during Oxidation of Methanol; Physica 48D(1991)340
163. Herzel, H.; Wendler, J.: Evidence of Chaos in Phonatory Signals; in: “EURO-SPEECH”, Genova 1991
164. Heuser–Kessler, M.–L.: Die Produktivität der Natur – Schellings Naturphilosophie und das neue Paradigma der Selbstorganisation in den Naturwissenschaften, Erfahrung und Denken, Bd. 69; Duncker & Humblot, Berlin 1986, 129 S.
165. Heynert, H.: Einführung in die allgemeine Bionik; Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1972

166. Hinton, G.E.; Anderson, J.A.: *Parallel Models in Assoziative Memories*; Erlbaum, Hillsdale/N.J. 1981
167. Hoffmann, G.W.; et al.: A teachable Network based on an unorthodox neuron; *Physica* 220 (1986), 233
168. Hoffmann, U.; Hoffmann, H.: *Einführung in die Optimierung*; Verlag Chemie, Weinheim 1971
169. Hogg, T., Hubermann, A.: *Parallel Computing Structures*; *J. Stat. Phys.* 41 (1985), 115
170. Holden, A.V.: *Nonlinear Science: Theory and Applications*; Manchester University Press, Manchester 1986
171. Hopfield, J.J.: Neural networks and physical systems with emergent collective computational properties; *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 79 (1982) 2554
172. Hopfield, J.J.: *Proc.Natl.Acad.Sci.* 81 (1984), 3088
173. Hopfield, J.J.; Feinstein, D.I.; Palmer, R.G.: Unlearning has a stabilizing effect in collective memories; *Nature* 304 (1983) 158
174. Hopfield, J.J.; Tank, D.W.: *Computing RC-Networks*; *Biol. Cybernetics* 52 (1985), 141
175. Hopfield, J.J.; Tank, D.W.: *Computing with neural Circuits: A Model*; *Science* 233 (1986), 625
176. Hoppensteadt, F.C.: *An Introduction to the mathematics of neurons*; Cambr. Univ. Press, Cambridge 1986
177. Hübinger, B.; Doerner, R.; Martienssen, W.: Local control of chaotic motion; *Z. f. Phys. B* 90(1993)103
178. Hübner, A.: Adaptive control of chaotic systems; *Helv. Phys. Acta* 62(1989)343
179. Hübner, A.; Lüscher, E.: Resonant stimulation and control of nonlinear oscillators, *Naturwissenschaften*, 76(1989)67
180. Hunt, E. R.: Stabilizing High-Period Orbits in a Chaotic System: The Diode Resonator; *Phys. Rev. Lett.* 67(1991)1953
181. *IEEE Proceedings of the First International Conference on Neural Nets*, I-IV (Ed.; M.Caudill, Ch.Butler); SOS Printing, San Diego, 1987
182. *IEEE Proceedings of the International Conference on Neural Nets*, I-II; SOS Printing, San Diego 1988

183. Imbihl, R.; Cox, M.P.; Ertl, G.: Kinetic oscillations in the catalytic CO oxidation on Pt(100); *J. Chem. Phys.* 84 (1986), 3519-3534
184. ISNN: Abstracts of the first Annual INNS Meeting, Boston 1988; Pergamon Press, New York 1988
185. Isshiki, N.: Experiments on a simple concentration difference energy engine are under way; *J. Nonequil. Thermodyn.* 2(1977)125; *Information Bull. Tokyo* 25(1978)4
186. Ivachnenko, A.; Müller, A.: *Selbstorganisation von Vorhersagemodellen*; VEB Verlag Technik, Berlin 1984
187. Ivanizky, G.R.; et al.: *Autowave processes*; *Soviet Sci. Reviews D* 2(1981)279; *Mathematische Biophysik der Zelle (in Russ.)* Nauka, Moskau 1978
188. Jäger, W.; Trinkaus, A.: *Selbstorganisation von Oberflächen bei Teilchenbeschuß*; KFA Preprint 1993
189. Jantsch, E.: *Die Selbstorganisation des Universums – Vom Urknall zum menschlichen Geist*; dtv, München 1982, 462 S.
190. Jenssen, M.: *Zur physikalischen Modellierung dynamischer Prozesse der Enzymkatalyse*; *Biomathematik und Bioinformatik II/ Modellierung molekularer Prozesse, Mathematik und Naturwissenschaften, Manuskripte der Humboldt-Universität*; Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin 1989
191. Jetschke, G.: *Mathematik der Selbstorganisation*; VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1989
192. Johnson, D.S.; Aragon, C.R.; McGeoch, L.A.; Schevon, C.: *Optimization by Simulated Annealing: An Experimental Evaluation, Part I. Operations Res.*; 1989
193. Jühring, F.; Richter, P.H.: *Fluctuations in spatially homogeneous chemical steady states*; *J. Chem. Phys.* 64(1976)4645
194. Jimenez-Montano, M.A.; Feistel, R.: *Protein evolution viewed as a design process*; Preprint, Universität Veracruz 1980
195. Kalitzin, G.: *Thermodynamik irreversibler Prozesse*; Teubner, Leipzig 1968
196. Kalnin, A.A.; Luchinin, V.V.: *Strukturelle Programmierung in der Mikroelektronik (in Russ.)*; RIO LETI, Leningrad 1981
197. Kalnin, A.A.; Luchinin, V.V.: *Physikalische Grundlagen der Funktional-Elektronik auf selbstorganisierenden Medien (in Russ.)*; *Elektronnaya Promyshl.* 8(1983)6
198. Kalnin, A.A.: *Dynamische Strukturen und nichtlineare spektrale Transformationen auf Reaktionen der strukturellen Wechselwirkung (in Russ.)*; *Isv. Akad. Nauk. SSSR Ser. Biofizyka* 27(1982)509 *Strukturelle Reflexion a.a.O.* 29(1984)78

199. Kanter, I.; Sompolinsky, H.: Associative recall of memory without errors; Phys. Rev. A35 (1987), 380
200. Kerner, B.S.; Osipov, V.V.: Stromeinschnürung im Arbeitsgebiet der Spannungs–Strom–Charakteristik mit negativem und positivem differenziellem Widerstand bei Wärmedurchschlag in Halbleitergeräten (in Russ.); Mikroelektronika 3(1974)9, Nr. 1
201. Kerner, B.S.; Osipov, V.V.; Sinkevitsch, V.F.: Wärmedurchschlag des Transistors im Regime von Gleich– und Wechsignalsignal (in Russ.); Radiotekhn. i. Elektr. 20 (1975) 2172, Nr. 10
202. Kerner, B.S.; Osipov, V.V.: Nichtlineare Theorie nichtisothermer Stromeinschnürung in Transistorstrukturen (in Russ.); Mikroelektronika 6(1977)337, Nr. 4
203. Kerner, B.S.; Osipov, V.V.: Schichten im erhitzten Elektronen–Loch–Plasma (in Russ.); Fizyka. Tekhn. Polupr. 13(1979)721, Nr. 4
204. Kerner, B.S.; Osipov, V.V.: Stationäre und laufende dissipative Strukturen in aktiven kinetischen Medien (in Russ.); Mikroelektronika 10(1981)407, Nr. 5
205. Kerner, B.S.; et al.: Kinetik der Wärmeeinschnürung bei Fluktuationsinstabilität in Transistorstrukturen (in Russ.); Radiotekhn. i. Elektronika 25(1980)168, Nr. 1
206. Kerner, B.S.; Osipov, W.W.: Stochastische inhomogene Strukturen in Nichtgleichgewichtssystemen (in Russ.); Zh. Eksp. Teor. Fiz. 79(1980)2219
207. Kerner, B.S.; Osipov, V.V.: Laufende Heterophasen–Bereiche in Nichtgleichgewichtssystemen (in Russ.); Mikroelektronika 12(1983)512, Nr. 6
208. Kessler, E.: Selbstorganisation in der Naturphilosophie der Renaissance, in: W. Krohn, H.–J. Krug, G. Küppers (Hrsg.): *Konzepte von Chaos und Selbstorganisation in der Geschichte der Wissenschaften*; Duncker & Humblot, Berlin 1992, S.15–29
209. KFA-Jülich: Intern - Nachrichten und Berichte: “Weltrekord: 50 Mio. Ameisen simuliert (Rißwachstum verstehen)”, Dezember(1992) Nr.4
210. Kinzel, W.: Learning and Pattern Recognition in Spin Glasses Models; Z. Phys. B60 (1985), 205
211. Kirby, K.G.; Conrad, M.: The enzymatic neuron as a reaction–diffusion network of cyclic nucleitides; Bull. Math. Biol. 46 (1984), 765
212. Kirby, K.G.; Conrad, M.: Intraneuronal Dynamics for Evolutionary Learning; Physica 16D (1986)
213. Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D.; Vecchi, M.P.: Optimization by Simulated Annealing; Science 220 (1983), 671

214. Kohonen, T.: Selforganization and Associative Memory; Springer-Verlag, Berlin 1988
215. Kramer, U.: Project management and chaos, some notes on dynamics of resource control, in: *Models of Selforganization in Complex Systems*; Akademie Verlag, Berlin 1991
216. Krinsky, V.I.: Autowellenprozesse und Herz-Arhythmien (in Russ.); Vestnik Akad. Nauk (1981)6
217. Krinsky, V.I., Mikhailov, A.S.: Autowellen (in Russ.); Znaniye, Moskau 1984
218. Krohn, W.; Krug, H.-J.; Küppers, G.(Hrsg.): Konzepte von Chaos und Selbstorganisation in der Geschichte der Wissenschaften, in: *Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften*, Bd. 3, Duncker & Humblot, Berlin 1992, 320 S.
219. Krohn, W.; Küppers, G.: Die Selbstorganisation der Wissenschaft; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1989, 160 S.
220. Krohn, W.; Küppers, G. (Hrsg.): Selbstorganisation – Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution; Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1990, 332 S.
221. Krohn, W.; Küppers, G.: Selbstreferenz und Planung, in: *Selbstorganisation – Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften*; Duncker und Humblot, Berlin 1990
222. Krohn, W.; Küppers, G.: Die natürlichen Ursachen der Zwecke. Kants Ansätze zu einer Theorie der Selbstorganisation; in: *W. Krohn, H.-J. Krug, G. Küppers; (Hrsg.): Konzepte von Chaos und Selbstorganisation in der Geschichte der Wissenschaften*; Duncker & Humblot, Berlin 1992, 320 S.
223. Krohn, W.; Küppers, G. (Hrsg.): Emergenz – Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung; Suhrkamp, Frankfurt a.M., 1992
224. Küppers, B.-O. (Hrsg.): Ordnung aus dem Chaos – Prinzipien der Selbstorganisation und Ordnung des Lebens; Piper, München/Zürich 1987, 284 S.
225. Küppers, B.-O.: Natur als Organismus – Schellings frühe Naturphilosophie und ihre Bedeutung für die moderne Biologie, Philosophische Abhandlungen, Bd. 58; Klostermann, Frankfurt a.M., 1992, 138 S.
226. Kuhnert, L.: Photochemische Manipulation von chemischen Wellen; Naturwiss. 73 (1986), 96
227. Kuhnert, L.: A new optical photochemical memory device in a light sensitive chemical active medium; Nature 391 (1986) 393

228. Kuhrts J., Herzel H.: An attractor in a solar time series; *Physica* 25D (1987), 165
229. Ladeur, K.-H.: Postmoderne Rechtstheorie: Selbstreferenz – Selbstorganisation – Prozeduralisierung; Duncker& Humblot, Berlin 1992, 230 S.
230. Langer, J.S.: Instabilities and pattern formation in crystal growth; *Rev. Mod. Phys.* 52(1980), 1
231. Langer, J.S.; Müller-Krumbhaar, H.: Theory of dendritic growth; *Acta Metallurgica* 26(1978),1681/1689/1697
232. Linde, H.: Konzeption einer Komplexaufgabe auf dem Wissensgebiet Dissipative Strukturen; ZIPC, Berlin 1984
233. Litwinow, W.N.; Michin, N.M.; Nishckin, N.K.: Die physikalisch-chemische Mechanik der selektiven Übertragung bei der Reibung (russ.); Nauka, Moskau 1979
234. Lorenz, W.: *Nonlinear Dynamical Economics and Chaotic Motion*; Springer-Verlag, Berlin etc. 1989
235. Luhmann, N.: *Soziale Systeme – Grundriß einer allgemeinen Theorie*; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1987, 680 S.
236. Luhmann, N.: *Die Wirtschaft der Gesellschaft*; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1988
237. Luhmann, N.: *Die Wissenschaft der Gesellschaft*; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1990, 500 S.
238. MacDonald, G. J.; Sertorio, L. (eds.): *Global Climate and Ecosystem Change; Proceedings of a NATO Advanced Research Workshop on Model Ecosystems and Their Changes, held September 4–8, 1989 in Maratea, Italy*; Plenum Press, New York/London 1990
239. Malik, F.: *Strategie des Managements komplexer Systeme – Ein Beitrag zur Management – Kybernetik evolutionärer Systeme*; Bern/Stuttgart 1989, 563 S.
240. Malchow, H.; Felber, F.: Bistability, Electric Potentials and Sensor Behaviour in an Enzymatic Reaction System; *J. Non-Equilib. Thermodyn.* 14(1989)219
241. Malchow, H.; Schimansky-Geier, L.: *Noise and Diffusion in Bistable Nonequilibrium Systems*; Teubner-Texte zur Physik, Bd. 5, Leipzig 1985
242. Mandelbrot, B.B.: *The Fractal Geometry of Nature*; Freeman, San Francisco 1982; in Deutsch: *Die fraktale Geometrie der Natur*; Birkhäuser, Basel 1987
243. Mareschal, M. (ed.): *Microscopic Simulation of Complex Flows; Proceedings of a NATO Advanced Research Workshop on Microscopic Simulations of Complex Flows, held August 23–25, 1989 in Brusseles, Belgium*; Plenum Press, New York/London 1990

244. Maturana, H. R.; Varela, F. J.: Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens; Scherz, Bern/München 1987
245. Mayer-Kress G. (Ed.): Dimensions and Entropies of Chaotic Systems; Springer-Verlag, Berlin 1986
246. McCulloch, W.S., Pitts, W.: Bull.Math.Biophys. 5 (1943), 115
247. Meinhardt, H.: Models of Biological Pattern Formation; Academic Press, London etc. 1982
248. Mende W.; Herzel H.; Wermke K.: Bifurcations and Chaos in Newborn Infant Cries; Phys. Lett. A145 (1990), 418
249. Merkli, P.; Thomann, H.: Thermoacoustic effects in a resonance tube; Journal of fluid mechanics 70(1975)
250. Merschanov, A.G.; Barelko, V.V.; Kurotschka, I.I.; Schkadinskii, K.G.: Über die Ausbreitung der Front einer hetero-katalytischen Reaktion (in Russ.); Dokl. Akad. Nauk SSSR 221(1975)1114
251. Meyer, K.: Schmierstoffe und Additivegrenzflächen chemisch betrachtet; Wiss. u. Fortschritt 33(1983)335
252. Mezard, M.; Nadal, J.P.; Toulouse, G.: Solvable models of working memories; J. Physique 47 (1986) 1457
253. Mezard, M.; Parisi, G.; Virasoro, M.A.: Spin Glass Theory and Beyond; World Scientific, Singapore 1987
254. Minsky, M.; Papert, S.: Perceptrons: An introduction to computational Geometry; MIT Press, Boston 1969
255. Mintz, S.L.; Perlmutter, A. (eds.): Information processing in Biological Systems; Plenum Press, New York 1983
256. Mosekilde, E.; Mosekilde, L. (eds.): Complexity, Chaos, and Biological Evolution; *Proceedings of a NATO Advanced Workshop on Complex Dynamics and Biological Evolution, held August 6-10, 1990, in Hindsø, Denmark*; Plenum Press, New York/London 1991
257. Mügge, I.: Dynamisches Verhalten von Hochdruckentladungslampen, Diplomarbeit an der Sektion Physik der Humboldt-Universität zu Berlin, Humboldt-Universität, Berlin, 1988, 50 S.
258. Münch, D. (Hrsg.): Kognitionswissenschaft – Grundlagen, Probleme, Perspektiven; stw 989, Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1992

259. Murray, J.D.: *Mathematical Biology*; Springer-Verlag, Berlin 1989
260. Nadal, J.P.; Toulouse, H., Changeux, J.P., Dehaene, S.: Networks of formal Neurons and Memory Palimpsests; *Europhys. Lett.* 1 (1986), 535
261. Nicolis, J.S.: *Dynamics of Hierarchical Systems*; Springer-Verlag, Berlin 1986
262. Nicolis, S.; Prigogine, I.: *Selforganization in Non-equilibrium Systems*; Wiley Interscience, New York 1977
263. Nicolis, G.; Prigogine, I.: *Die Erforschung des Komplexen – Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften*; Piper, München 1987, 384 S.
264. Niedernosterheide, F.-J.; Arps, M.; Dohmen, R.; Willebrand, H.: Spatial and Spatio-Temporal Patterns in pnpn Semiconductor Devices; *Phys. Stat. Sol. (b)* 172, 249 (1992)
265. Niedersen, U.; Pohlmann, L. (Hrsg.): *Selbstorganisation und Determination*; in *Selbstorganisation – Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften*, Bd. 1; Duncker & Humblot, Berlin, 1990, 234 S.
266. Niedersen, U.; Pohlmann, L. (Hrsg.): *Der Mensch in Ordnung und Chaos*; in *Selbstorganisation – Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften*, Bd. 2, Duncker & Humblot, Berlin, 1991, 283 S.
267. Niegel, W.; Holzberger, P. (Hrsg.): *Aspekte der Selbstorganisation*; (Informatik-Fachberichte, Bd. 304); Springer, Berlin u.a. 1992, 200 S.
268. Noldechen, A.: Biochips: Die Zukunft im Visier; *Elektronik* 13 (1986) 65
269. Okubo, A.: *Diffusion and Ecological Problems: Mathematical Models*; Springer-Verlag, Berlin etc. 1980
270. Oster, S.F.; Perelson, A.S.; Katschalky, A.: Network Thermodynamics; *Quart. Rev. Biophys.* 6(1973)1
271. Ott, E.; Grebogi, C.; Yorke, J. A.: Controlling chaos; *Phys. Rev. Lett.* 64(1990)1196
272. Parisi, G.: A memory which forgets; *J. Phys. A* 19 (1986) L 617
273. Paslack, R.: *Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines Wissenschaftsparadigmas*; Reihe: *Wissenschaftstheorie, Wissenschaft und Philosophie*; Bd. 32; Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1991, 211 S.
274. Paslack, R.; Knost, P.: *Zur Geschichte der Selbstorganisationsforschung: ideengeschichtliche Einführung und Bibliographie (1940–1990)*; Kleine, Bielefeld 1990, 227 S.

275. Pecora, L.: Driving Systems with Chaotic Signals; Beitrag auf den *Dynamics Days* Texas, Austin 1992
276. Pechatnikov, E.L., Barelko, V.V.: *Khimicheskaya fizika* 4(9) (1985), 1272
277. Peliti, L.: Biologically Inspired Physics; *Proceedings of a NATO Advanced Research Workshop on Biologically Inspired Physics, held September 3–13, 1990 in Cargese, France*; Plenum Press, New York/London 1991
278. Plath, P.J.: Cellular Automata Models of Pattern Formation in Heterogeneous Catalytic Systems; in: *Irreversible Processes and Selforganization*, Teubner Texte zur Physik; BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1989
279. Pöschel, T.: Recurrent Clogging and Density Waves in Granular Material Flowing through a Narrow Pipe; KFA–preprint HLRZ 67/92; 1992
280. Polzer, G.; Meianer, F.: Grundlagen zu Reibung und Verschleiß; Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1979
281. Portele, G.: Der Mensch ist kein Wägelchen: Gestaltpsychologie – Gestalttherapie – Selbstorganisation – Konstruktivismus, *Edition Humanistische Psychologie*; Moll und Eckhard, Köln 1992, 250 S.
282. Prigogine, I.: Etude thermodynamique des phenomenes irreversibles; Desoer, Liege/Paris 1947
283. Prigogine, I.: Vom Sein zum Werden – Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften; Piper, München 1979, 304 S.
284. Prigogine, I.; Glansdorff, P.: Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuation; Wiley, New York 1971
285. Prigogine, I.; Stengers, I.: Order out of chaos. Man's new dialogue with nature; Heinemann, London 1984
286. Prigogine, I.; Stengers, I.: Dialog mit der Natur – Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens; Serie Piper 118, Piper, 5. erw. Aufl., München 1986, 347 S.
287. Probst, G.J.B.: Ordnungsprozesse in sozialen Systemen aus ganzheitlicher Sicht; Parey, Berlin/Hamburg, 1987, 180 S.
288. Pumain, D.; Saint-Julien, T.; Sanders, L.: Applications of a dynamic urban model; *Geographical Analysis* 1 (1987)
289. Pumain, D.; Sanders, L.; Saint-Julien, T.: Villes et Auto-Organisation; Economica, Paris 1989

290. Purwins, H.G.: Experimentelle Untersuchungen und technische Anwendungen nichtlinearer Reaktions-Diffusionssysteme; Konferenzbeitrag: Nichtlineare Dynamik – Chaos und Selbstorganisation in komplexen Systemen; VDI-Technologiezentrum Düsseldorf; 1993
291. Puu, T.: Nonlinear economic dynamics, in: *Lecture notes in Economics and Mathematical Systems*, Vol.336; Springer, Berlin 1989
292. Ratzek, W.: Selbstorganisation in komplexen Welten: Chaos als schöpferischer Impuls; Lang, Frankfurt a.M. u.a. 1992, 310 S.
293. Rayleigh: Theory of Sound, Sec. 322 i; Dover, New York 1945
294. Rechenberg, I.: Evolutionsstrategien – Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Information; Friedrich Frommann Verlag (Günter Holzboog K.G.), Stuttgart/Bad Cannstatt 1973
295. Reiner, R.: Migratory systems: theory and empirical Evaluation, in: *Models of Self-organization in Complex Systems*; Akademie Verlag, Berlin 1991
296. Richter, P.H.; Ross, J.: The efficiency of engines operating around a steady state at finite frequencies; *J. Chem. Phys.* 69(1978)5521
297. Richter, H.; Rehmus, P.; Ross, J.: Control and Dissipation in Oscillatory Chemical Engines; *Progr. Theo. Phys.* Vol. 66, No. 2 (1981), 385–405
298. Rigos, A.A.; Deutch, J.M.: A simple model for the influence of fluctuations on explosive reactions; *J. Chem. Phys.* 76(1982)5180
299. Ristow, G. H.; Herrmann, H. J.: Density Patterns in Granular Media; KFA-preprint HLRZ 2/93
300. Romanovsky, Yu.M.; Stepanova, N.V.; Chernavsky, D.S.: Mathematische Biophysik (in Russ.); Nauka, Moskau 1984
301. Ropohl, G.: Systemtechnik, Grundlagen und Anwendung; München 1975; Eine Systemtheorie d. Technik – Zur Grundlage der allgemeinen Technologie; München 1979
302. Rosenblatt, F.: Principles of Neurodynamics – Perceptrons and the Theory of Brain Mechanics; Spartan Books, Washington 1962 (Russ. Übers.); Mir, Moskau 1965)
303. Ross, M.H.; et al.: Report of the Summer Study on the Technical Aspect of Efficient Energy Milization; American Phys. Society, New York 1975
304. Roth, G.: Zur Entstehung von Bedeutung, in: W. Krohn, G. Küppers (Hrsg.): *Emergenz. Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1992

305. Rott, N.: Thermoacoustics; *Adv. Appl. Mechanics* 20 (1980), 135
306. Rumelhart, D.E.; McClelland, J.L. (Eds.): *Parallel Distributed Processing*; MIT Press, Cambridge/Mass 1986
307. Ruwisch, D.; Bode, M.; Purwins, H.-G.: *Parallel Hardware Implementation of Kohonen's Algorithm with an Active Medium*; *Neural Networks*; to be published, 1993
308. Scharf, J.H. (Hrsg.): *Nichtgleichgewichtsvorgänge – dynamische Strukturen*; *Nova Acta Leop. N.F* 59(1983)
309. Schaur, E.: *Untersuchungen zu Formen und Entstehungsprozessen menschlicher Siedlungen*; *Natürliche Konstruktionen, Mitteilungen des SFB 230, Heft 1*, Stuttgart, 1988, S. 105–116,
310. Schiepek, G.; Schoppek, W.: *Synergetik in der Psychiatrie: Simulation schizophrener Verläufe auf der Grundlage nicht-linearer Differenzgleichungen* in: U. Niedersen, L. Pohlmann (Hrsg.): *Der Mensch in Ordnung und Chaos*; Duncker & Humblot, Berlin 1991, S. 69–102
311. Schimansky-Geier L.; Zülicke, C.; Schöll, E.: *Domain Formation due to Ostwald Ripening in Systems far from Equilibrium*; *Z. f. Phys. B* 84 (1991); 433
312. Schmidt, S. J. (Hrsg.): *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1986, 320 S.
313. Schmidt, S. J. (Hrsg.): *Kognition und Gesellschaft – Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus, Bd. 2*; stw 950, Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1992
314. Schmidt, S. J.: *Die Selbstorganisation des Sozialsystems Literatur im 18. Jahrhundert*; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1992, 489 S.
315. Schmitt, R.: *Rechner heute und morgen. (von sequentiell zu parallel arbeitenden Rechnern)*; *Wiss. und Fortschritt* 6, 1983 , S. 226 f.
316. Schnakenberg, J.: *Network theory of microscopic behavior of master equation systems*; *Rev. Mod. Phys.* 47 (1976) 571
317. Schnell, R.: *Computersimulation und Theorienbildung in den Sozialwissenschaften*; in: *Kölner Zeitschrift fr Soziologie und Sozialpsychologie* 42(1990)1, 109
318. Schöll, E.: *Nonequilibrium Phase Transitions in Semiconductors – Self-Organization induced by Generation and Recombination Processes*; Springer; Berlin, (1988)
319. Schrödinger, E.: *What is Life?*; Cambridge Uni. Press, Cambridge 1944
320. Schuster, H.G.: *Deterministic Chaos*; 2nd. rev. ed., VCH, Weinheim 1989

321. Schwefel, H.P.: Numerische Optimierung von Computermodellen mittels Evolutionsstrategie; Birkhäuser Verlag, Basel 1977
322. Schweitzer, F.: Goethes Morphologie-Konzept und die heutige Selbstorganisations-Theorie in: W. Krohn, H.-J. Krug, G. Küppers (Hrsg.): *Konzepte von Chaos und Selbstorganisation in der Geschichte der Wissenschaften*; Duncker & Humblot, Berlin 1992, S.167–193
323. Sejnovski, T.; Rosenberg, C.: NETtalk, a program which converts text into spoken English; Technical Report JHU/EECS-86/01, Baltimore/Maryland 1986
324. Simon, F.: Meine Psychose, mein Fahrrad und ich: zur Selbstorganisation der Verrücktheit; Auer, Heidelberg 1992, 296 S.
325. Slotnik, D.L.: The Fastest Computer; Sc. American 224(1971)76–88
326. Spalding, D.B.; Cole, E.H.: Engineering Thermodynamics – Grundlagen der technischen Thermodynamik; Vieweg, Braunschweig 1965
327. Stadler, M.; Kruse, P.: Gestalttheorie und Theorie der Selbstorganisation; Gestalt Theory 8/2 (1986) 75–98
328. Stadler, M.; Kruse, P.: Zur Emergenz psychischer Qualitäten; in: W. Krohn, G. Küppers (Hrsg.): *Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1992, S. 138 ff.
329. Stahl, A.: Entropy And Environment; in: Statistical Physics and Thermodynamics of Nonlinear Nonequilibrium Systems, *Proceedings of the Statistical Physics 18 – Satellite Meeting*, eds.: Ebeling, W.; Muschik, W.; World Scientific, Singapore 1993
330. Stebins, S.L.: Evolutionsprozesse; Jena 1968
331. Steinbuch, K.: Automat und Mensch; Springer Verlag, Berlin 1963
332. Stichweh, R.: Zur Entstehung des modernen Systems naturwissenschaftlicher Disziplinen – Physik in Deutschland 1740–1890; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1984, 500 S.
333. Stollenwerk, N.: Radial Basis Functions – Reconstruction from a Time Series of the Measles Cases in New York City; Diplomarbeit, RWTH Aachen 1992
334. Stormberg, H.-P.; Schäfer, R.: Excitation of acoustic instabilities in discharge lamps with pulsed supply voltage, *Lighting Research and Technology* 15 (1983) 127
335. Symogyi, B., Welch, G.R., Damjanovich, S.: *Biochem. Biophys. Acta* 768 (1984), 81
336. Teubner, G.: Recht als autopoietisches System; Suhrkamp, Frankfurt a.M. 1989, 240 S.

337. Titze, I.R.; Baken, R.; Herzel, H.: Evidence of Chaos in Vocal Fold Vibration; Chapter 4 in: *Vocal Fold Physiology: New Frontiers in Basic Science*; Singular Publishing Group, San Diego 1992
338. Troitzsch, K.G.; Mhring, M.: Simulationsverfahren in den Sozialwissenschaften; in: *Fortschritte der Statistik-Software I*. Hrsg. v. F. Faulbaum und H.-M. Uehlinger, Stuttgart 1988, S.433
339. Tschacher, W.: Interaktion in selbstorganisierten Systemen – Grundlegung eines dynamisch-synergetischen Forschungsprogramms in der Psychologie; Ansager, Heidelberg 1990, 227 S.
340. Turing, A.M.: The chemical basis of morphogenesis; Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. B237(1952), 37
341. Ulbricht, H.; Schmelzer, J.: The kinetics of first-order phase transitions in adiabatically closed Systems; in: *Irreversible Processes and Selforganization*, Teubner Texte zur Physik; BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1989
342. Ulrich, H.; Probst, G.J.B. (Eds.): Self-Organization and Management of Social Systems – Insights, Promises, Doubts and Questions; Springer, Berlin u.a. 1984, 155 p.
343. Vasiliev, V.A.; Romanovskii, Yu.M.; Chernavskii, D.S.; Yakhno, V.G.: Autowave Processes in Kinetic Systems; VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1987; Reidel, Dordrecht 1987
344. Vedenov, A.A.; Levchenko, B.: Über eine Klasse nichtlinearer Systeme mit Gedächtnis (in Russ.); Pisma v Zh. teor. Fiz. 11 (1985), 328
345. Vershadsky, L.I.: Selbstorganisation und Zuverlässigkeit von Tribosystemen (in Russ.), Verlag Wissen, UdSSR, Kiew 1981
346. Volkenstein, M.V.: Biophysik; Nauka, Moskau 1983 (in Russisch)
347. Wagenführ, H.: Report Technik 1999, Herg. Wagenführ, H. Wichert Institut Tübingen, Demokrit-Verlag, Tübingen 1974.
348. Watanabe, S.: Pattern Recognition – Human and Mechanical; Wiley and Sons, New York 1985
349. Wei-Bin Zhang: Synergetic Economics – Time and Change in Nonlinear Economics; Springer, Berlin etc. 1991
350. Weidlich, W.: Physics and social science – the approach of synergetics; Phys. Rep. 204(1991)1

351. Weidlich, W.; Haag, G.: Concepts and Models of a Quantitative Sociology – The Dynamics of Interacting Populations; Springer Series in Synergetics Vol. 14, Berlin u.a. 1983
352. Weidlich, W.; Haag, G. (Eds.): Interregional Migration – Dynamic Theory and Comparative Analysis; Springer, Berlin u.a. 1988
353. Weidlich, W.; Munz, M.: Settlement formation; The Annals of Regional Science 24 (1990), 83
354. Weßling, B.: Elektrische Leitfähigkeit in mehrphasigen Polymersystemen; Polymer Engineering and Science Vol. 31 No. 6 (1991), 1200
355. Wessling, B.: Dispersion hypothesis and non-equilibrium thermodynamics: key elements for a materials science of conductive polymers. A key to understanding polymer blends or other multiphase polymer systems; Synthetic Metals 45 (1991), S. 119–149
356. Wheatley, J.; Hoffer, T.; Swift, S.W.; Migliori, A.: Experiments with an Intrinsically Irreversible Acoustic Heat Engine; Phys. Rev. Lett., Vol. 50 N7(1983)499f
357. Wiener, Norbert: Kybernetik; Rowohlt, Reinbek 1968
358. Willke, H.: Systemtheorie entwickelter Gesellschaften – Dynamik und Riskanz moderner gesellschaftlicher Selbstorganisation; Juventa, Weinheim/München 1989, 150 S.
359. Winfree, A.T.: The Geometry of Biological Time; Springer, Berlin etc. 1980
360. Wolf A.; Swift J.B.; Swinney H.L.; Vastado J.A.: Determining Lyapunov exponents from time series; Physica D16 (1985), 285
361. Yazaki, T.; Tominga, A.; Y. Narahara: Stability limit for thermally driven acoustic; Cryogenics V19 N7(1979), 393
362. Zach, F.: Technisches Optimieren; Springer, Wien 1974
363. Zhabotinsky, A.M.: Selbsterregte Konzentrationsschwingungen; Nauka, Moskau 1974.