

Rainer Paslack

Urgeschichte der Selbstorganisation

Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas

Braunschweig / Wiesbaden: Vieweg 1991

Reihe: Wissenschaftstheorie, Wissenschaft und Philosophie,

Bd. 32

Hg. von Siegfried J. Schmidt, Siegen

ISBN 3-528-06423-4

Inhalt

I	Einleitung	4
1	Selbstorganisation als wissenschaftliche Revolution	4
2	Frühe Konzepte der Selbstorganisation	8
3	Moderne Konzepte der Selbstorganisation	11
4	Danksagung	18
II	Frühe Konzepte der Selbstorganisation	19
1	Philosophiegeschichtlicher Vorlauf	19
1.1	Antike Selbstordnungskonzepte	20
1.2	Neuzeitliche Selbstordnungskonzepte	23
2	Naturwissenschaftlicher Vorlauf	30
2.1	Die Vorherrschaft des mechanistischen Denkens	30
2.2	Theologisches Zwischenspiel	34
2.3	Irreversibilität und Unvorhersagbarkeit	36
2.4	Die Idee der Rekursion	48
2.5	Konvektion, Musterbildung und Oszillation	53
2.6	Ganzheitlichkeit in biologischen Systemen	58
2.7	Psychophysik, Gestaltpsychologie und Kognitionswissenschaft	68
2.8	Kybernetik, Informationsbegriff und Systemtheorie	79
3	Sozialwissenschaftlicher Vorlauf	87
4	Schlußfolgerungen	92

III Moderne Konzepte der Selbstorganisation	99
1 Vorbemerkung	99
2 Die Entstehung der neuen Konzepte	100
2.1 Die Theorie dissipativer Strukturen	100
2.2 Synergetik	108
2.3 Die Theorie autokatalytischer Hyperzyklen	119
2.4 Chaostheorien	126
2.5 Systemtheoretisch-kybernetische Ansätze	144
2.6 Autopoiese und Selbstreferentialität	163
2.7 »Elastische« Ökosysteme	177
3 Zur »Epistemologie« der Selbstorganisation	185
 Literatur	 198

I Einleitung

1 Selbstorganisation als wissenschaftliche Revolution

Seit Beginn der 1960er Jahre bahnt sich eine wissenschaftliche Revolution an, die inzwischen unter dem Sammelbegriff »Selbstorganisation« zu einem großangelegten, nahezu alle Wissenschaftsdisziplinen umfassenden Forschungsprogramm ausgereift ist. Im Mittelpunkt dieses neuen Konzepts steht die Untersuchung der spontanen Entstehung, Höherentwicklung und Ausdifferenzierung von Ordnung in dynamischen Systemen fern ab vom Gleichgewicht. Den Ausgangspunkt bildeten konkrete Forschungsprobleme: Wie entsteht Laserlicht? Wie organisiert sich lebende Materie? Wie entwickelt sich das Wetter? Wie »ko-evolvieren« verschiedene Lebensformen eines Biotops? Die Antworten, die auf diese und ähnliche Fragen gefunden wurden, gingen freilich über das spezielle Frageinteresse hinaus und begründeten eine völlig neue Sicht der Natur. Aus solchen zunächst unscheinbaren Anfängen innerhalb der Naturwissenschaften heraus ist es erstaunlich rasch zu einem »Paradigmawechsel« gekommen, der möglicherweise eine neue »kopernikanische Wende« für die Wissenschaft insgesamt einleitet, was unser Verständnis dynamischer Prozesse in komplexen Systemen anbetrifft.

Nach Forschern wie I. Prigogine und H. Haken, die maßgeblich an der Begründung der modernen Selbstorganisationsforschung beteiligt waren, gehen wir einer neuen Synthese, einer neuen Naturauffassung entgegen, in deren Zentrum die Vorstellung einer spontan sich selbst organisierenden Welt steht: die klassische Wissenschaft, die den Gegensatz zwischen Mensch und Natur betont habe, verwandele sich dadurch in eine neue »Wissenschaft vom Komplexen«, die den Menschen zu einem »Dialog mit der Natur« (I. Prigogine) befähige; Kommunikation trete an die Stelle von objektivierender Naturbeherrschung. Jenseits der traditionellen Alternative von physikalistischem Reduktionismus und biologistischem Holismus scheint damit die wissenschaftliche Utopie einer mit der Gesellschaft »versöhnten Natur« auf, die zu ihrer Realisierung gleichwohl nicht auf das Experiment und

die quantitative Analyse zu verzichten braucht. Die Wissenschaft erneuert dadurch ihren Anspruch auf legitime Definitionsmacht gegenüber der Grundstruktur der Welt im ganzen, der ihr im Zuge einer nur zu berechtigten Kritik der ökologischen und sozialen Negativfolgen des wissenschaftlich-technischen Fortschritts vielerseits bestritten worden ist, indem sie sich paradigmatisch neu orientiert und Züge einer »alternativen Wissenschaft« annimmt.

Eine Wissenschaft, die sich um die Aufklärung der Mechanismen der Selbstorganisation bemüht, bleibt zwar durchaus »harte« Wissenschaft, doch sie wird selbstreflexiv und dadurch auf ein neues Niveau ihrer Entwicklung getrieben. Indem sie die Komplexität natürlicher (und sozialer) Systeme in nicht-reduktionistischer Weise ernstnimmt, holt sie die alte Idee der Naturgeschichte in die moderne Naturforschung zurück. Indem sie die »Autonomie« systemischer Prozesse - ihre »Eigengesetzlichkeit« und »Eigenzeitlichkeit«, ihre »operationale Geschlossenheit«, »fraktale« Unregelmäßigkeit und prinzipielle Unvorhersagbarkeit - anerkennt, tritt das Besondere, das Historische und Einzigartige der »Randbedingungen«, denen sich solche selbstorganisativen Prozesse wesentlich verdanken, in den Vordergrund des wissenschaftlichen Interesses, während die Suche nach universellen Gesetzmäßigkeiten, die traditionell die Forschung dominierte, zweitrangig wird.

Formulierungen wie diese werden nicht nur dem wissenschaftlichen Laien, sondern auch manchem Wissenschaftler, der sich bereits einschlägig mit Konzepten und Ergebnissen der Selbstorganisationsforschung vertraut gemacht hat, einigermaßen pathetisch oder mysteriös anmuten. In der Tat sind die Erwartungen vieler Selbstorganisationsforscher recht hochgespannt, während es gleichzeitig noch zahlreiche skeptische Stimmen aus den betroffenen Disziplinen gibt. Aber mögen sich derartige Hoffnungen auf einen umfassenden Umbruch der Wissenschaft via Selbstorganisation auch letzten Endes als übertrieben herausstellen, so wird man schon jetzt der Theorie der Selbstorganisation (bzw. ihren verschiedenen Varianten) zugestehen müssen, eines der großen Rätsel der Wissenschaft - die spontane Genese und Evolution komplexer Strukturen - ein bedeutendes Stück näher an seine rationale Aufklärung gebracht zu haben. Da es der Wissenschaft stets und überall um ein Verständnis von Ordnung bzw. des Verhältnisses von Ordnung und Unordnung

geht, rührt es zweifellos an den Grundfesten etablierter Wissenschaftsüberzeugungen, wenn - wie im Falle der Theorie der Selbstorganisation - ein neuer Weg zur Lösung eben dieses Problems gewiesen und mit bereits zahlreichen Entdeckungen und Erklärungsleistungen zu speziellen Fragestellungen als gangbar ausgewiesen wird. Deshalb ist es vielleicht doch nicht verfehlt oder zumindest verständlich, wenn das Konzept der Selbstorganisation von seinen Verfechtern zur Grundlage eines wissenschaftlichen Weltbildwandels erklärt wird.

Was die Situation so unklar macht - »wissenschaftliche Revolution« ja oder nein -, ist paradoxerweise gerade die ungemeine Attraktivität des Selbstorganisationskonzepts, insofern sie Skepsis gegenüber seiner Seriosität weckt: gerade seine rasche Diffusion in zahlreiche neue Wissenschaftsdisziplinen, seine populärwissenschaftliche Aufbereitung in den Massenmedien, sein »Anschluß« an alternativkulturelle Weltbildentwürfe sowie seine »Anwendung« auf gesellschaftspolitische, ökonomische und zahlreiche andere Praxisfelder erscheint vielen Beobachtern verdächtig. So wird das neue »Weltbild der Selbstorganisation« mittlerweile in so verschiedenen Bereichen diskutiert wie der Managementlehre, der Literaturtheorie, der ganzheitlichen Medizin, der Verwaltungswissenschaft, der Verkehrsforschung, der Planungstheorie, der Pädagogik, der postmodernen Ästhetik, der Organisationssoziologie oder der Familientherapie. Damit nicht genug, berufen sich heute auch Protagonisten der »Neuen sozialen Bewegungen« und des »New Age« (Capra, Ferguson) für ihre Visionen von einer partizipatorischen Gesellschaft im Einklang mit der Natur auf die Erkenntnisse der Selbstorganisationsforschung. Daß es sich hierbei in der Tat nicht immer um seriöse »Übertragungen« und an der Spezifik des jeweiligen Gegenstandsbereiches abgearbeitete »Anwendungen« handelt, sondern oftmals nur um metaphorische Analogiebildungen oder gar um Etikettenschwindel, versteht sich. Dies aber versorgt die Kritiker des revolutionären Anspruchs des Selbstorganisationskonzepts mit Argumentationshilfen.

Dennoch ist weder die Güte der von der Selbstorganisationsforschung erbrachten Resultate noch die Tatsache, daß eine die Grenzen der Disziplinen überschreitende Vernetzung verschiedener Selbstorganisationsansätze zu einem oder mehreren Forschungsprogrammen erfolgreich vollzogen wurde, in Zweifel zu ziehen; ebensowenig wie die wissen-

schaftsexterne Bedeutung von Selbstorganisationstheorien in bestimmten gesellschaftlichen Praxisfeldern: beispielsweise für den Bereich der ökonomischen und ökologischen Planung, wo die Analyse chaotischer Systeme erstmals eine rationale Erklärung für die offensichtliche Unplanbarkeit komplexer Prozesse liefert und dadurch die Suche nach neuen Planungsinstrumenten inspiriert.¹

*

In der vorliegenden Arbeit sollen aber gerade *nicht* die allmähliche Vernetzung der diversen »Urkonzepte« der modernen Selbstorganisationsforschung zu einem transdisziplinären Forschungsunternehmen und dessen vielfältige »Außenbezüge« zu Politik, Wirtschaft, Gesellschaft und Kultur dargestellt werden; vielmehr soll ausschließlich die *Ursprungsgeschichte* dieser Forschung rekonstruiert werden. Diese läßt sich analytisch in zwei - ungleich lange - Phasen einteilen:

(1.) in die Phase der ideellen »Vor-« oder »Urgeschichte« der modernen Selbstorganisationstheorie, die weniger deren eigentliche Entstehung (Formierung) als vielmehr die ideengeschichtlichen *Voraussetzungen* dieser Entstehung betrifft (hier geht es also - angefangen bei einigen Vorsokratikern - um die frühen Vorläuferkonzepte in Philosophie und Wissenschaft, um spekulative Vorentwürfe, wichtige wissenschaftliche Entdeckungen, Theoriefortschritte und Methodenentwicklungen, die *in der Rückschau* als Wegbereiter erscheinen);

(2.) in die Phase der »Genesis« oder der eigentlichen Entstehungsgeschichte der modernen »Ur-« oder »Gründerkonzepte«, die Phase ihrer Formulierung bei Forschern wie I. Prigogine, H. Haken, M. Eigen, H. Maturana usw.; dieser Zeitabschnitt beginnt Ende der 1950er/Anfang der 1960er Jahre - eine klare zeitliche Zäsur ist nicht in jedem Falle

¹ Ein knapper ideengeschichtlicher Abriss und eine umfangreiche Übersicht über die bis heute zur Selbstorganisationsforschung erschienene Literatur - chronologisch, thematisch und nach Autoren geordnet - findet sich in: R. Paslack und P. Knost, *Zur Geschichte der Selbstorganisationsforschung - Ideengeschichtliche Einführung und Bibliographie (1940-1990)*, erschienen in der Reihe *Report Wissenschaftsforschung*, hg. vom »Universitätsschwerpunkt Wissenschaftsforschung« der Universität Bielefeld, Bd. 37, Bielefeld 1990.

auszumachen: hier bilden sich jene Konzepte heraus, die Anfang/Mitte der 1970er Jahre allgemein in der »scientific community« als die »Wurzeln« der modernen Selbstorganisationsforschung anerkannt und in den Rang »paradigmatischer Theorien« erhoben werden.

Aus dieser groben Phaseneinteilung leitet sich die Grundgliederung des vorliegenden Buches in zwei Großkapitel her.

2 Frühe Konzepte der Selbstorganisation

Die erste Frage, die wir - in *Kapitel II* - zu klären haben, ist: Warum haben sich die »Urkonzepte« der Selbstorganisation allesamt in den 1960er Jahren unseres Jahrhunderts ausgebildet? Warum nicht bereits früher? Wird doch von etlichen Selbstorganisationsforschern selbst auf - z. T. sogar recht frühe - historische Vorläufer hingewiesen.² Warum haben sich diese Vorgänger dann nicht zu ihrer Zeit in der Wissenschaft durchsetzen können? Wenn dies seinen Grund nicht in zufälligen Randbedingungen früherer Forschungssituationen hat, wie hier angenommen wird, dann haben wir nach den spezifischen Bedingungen zu fragen, unter denen die Idee der Selbstorganisation gerade während der 1960er Jahre unseres Jahrhunderts in mehreren wissenschaftlichen Disziplinen hat erfolgreich Fuß fassen und anschließend zu einem durchsetzungsstarken Programm ausreifen können. Wir wollen in Vorbereitung einer Antwort auf diese Frage indes den umgekehrten Weg beschreiten und zunächst einmal zeigen, warum Selbstorganisationsansätze in früheren Entwicklungsphasen der Wissenschaft keine oder wenig Aussicht auf Erfolg, d. h. auf Akzeptanz und Ausarbeitung in ihren jeweiligen Disziplinen hatten. In Kapitel II wird es daher um die Darstellung und Bewertung des *ideengeschichtlichen*

² So bemerken etwa I. Prigogine und I. Stengers in ihrem Buch *Dialog mit der Natur* (München 1981, S.44): »Worauf es uns ankommt, ist, daß die Vorsokratiker innerhalb weniger Generationen die grundlegenden Begriffe zusammentrugen, erklärten und kritisierten, die von unserer Wissenschaft wiederentdeckt wurden und die wir noch immer zusammenzufügen versuchen, um (...) das Entstehen von Ordnung aus einem undifferenzierten Milieu zu verstehen.«

Vorlaufs der Selbstorganisationsforschung in den Geistes-, Natur- und Sozialwissenschaften gehen.

Wir werden aber nicht nur danach fragen, welche Umstände einen früheren Durchbruch zum Selbstorganisationsdenken verhindert haben, sondern auch nach den *positiven* Resultaten des wissenschaftlichen Vorlaufs, die die Entstehung der modernen Selbstorganisationsforschung gleichsam vorbereitet haben. Die relative Ausführlichkeit der folgenden wissenschaftshistorischen Darstellung bezieht ihre Rechtfertigung aus dem Bemühen, die Voraussetzungshaftigkeit der neuen wissenschaftlichen Denkweise in möglichst vielen Aspekten aufzuzeigen, ohne dadurch jedoch deren »revolutionären« Charakter leugnen oder die Begründungsleistung schmälern zu wollen: es geht nicht um den Nachweis der »Ableitbarkeit« moderner Selbstorganisationskonzepte aus älteren wissenschaftlichen Traditionen, sondern um den Aufweis zahlreicher experimenteller, wissenschaftsmäßiger und theoretischer Vorbedingungen, die das wissenschaftliche Denken sozusagen an jene »kritische Schwelle« getrieben haben³, jenseits der der »qualitative Sprung« hin zu einem »Weltbild der Selbstorganisation« *möglich* wurde. Wir versuchen dadurch dem bemerkenswerten Umstand Rechnung zu tragen, daß der Beginn der modernen Selbstorganisationsforschung in den 1960er Jahren unseres Jahrhunderts zwar eine wissenschaftshistorische Diskontinuität, womöglich ersten Ranges, markiert, *zunächst* aber gar nicht als eine solche wahrgenommen wurde (auch von ihren Begründern nicht), sondern aus der Arbeit innerhalb traditioneller Problemkontexte herauswuchs. Dies entspricht der Auffassung des Autors, daß sich auch im Falle wissenschaftlicher Revolutionen diskontinuierliche und kontinuierliche Prozesse stets überlagern, daß mithin wissenschaftliche Umbrü-

³ Was nicht unbedingt auch ein »krisenhaftes Bewußtsein« impliziert, das Th. S. Kuhn als ein essentielles Merkmal wissenschaftlicher Revolutionen beschrieben hat; siehe seine mittlerweile klassische Arbeit *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt a. M. 1973 (im amerik. Original bereits 1962 erschienen). Wie gerade der Fall der Selbstorganisationsforschung zeigt, wurde ein gewisser Zusammenhang zur angeblichen »Wissenschaftskrise« bzw. zur »Wissenschaftskritik« erst hergestellt, *nachdem* das Forschungsprogramm der Selbstorganisation sich etabliert hatte und nicht schon während der »Gründungsphase«; erst als die »Ur-Theorien« der modernen Selbstorganisationsforschung bereits konzipiert und die Analogien zwischen ihnen wahrgenommen worden waren, wurden sie als mögliche Kandidaten eines wissenschaftlichen Umdenkens und mithin als Auswege aus bestimmten Problemlagen der Forschungstradition proklamiert.

che Momente des Anschließens an bestehende Kontexte bzw. der Wiederaufnahme älterer (eventuell »verdrängter«) Forschungslinien beinhalten.

Der Bogen der historischen Erörterung wird sich von eher spekulativen Selbstorganisationsideen in der Philosophie (Aristoteles, Lukrez, Leibniz, Kant, Schelling usw.) über frühe naturwissenschaftliche Ansätze bis hin zur Entwicklung der Kybernetik und der System- und Informationstheorie spannen. Breiten Raum wird die Diskussion des mechanistischen Weltbilds, seiner langen Vorherrschaft und der Schritte zu seiner allmählichen Destruierung einnehmen: die Einführung der Irreversibilität dynamischer Prozesse durch die klassische Thermodynamik, die Wahrnehmung von Komplexitätssteigerung und Emergenz im Bereich evolutionärer Prozesse als offenbar irreduzible Phänomene (Darwinismus, Evolutionismus), die Relativierung des »starken« Kausalitätsprinzips durch Maxwell und Poincaré (die Bedeutung von Nicht-Linearität und Rekursivität), die Untersuchung ganzheitlich-systemischer Zusammenhänge in der Biologie und Psychologie (Holismus, Gestaltwahrnehmung), die theoretische Behandlung offensichtlich ungleichgewichtiger und dennoch persistenter Strukturen (Organismen, Ökosysteme, soziale Gruppen) u. v. m.

Deutlich werden sollen zum einen die zahlreichen Widerstände, denen die frühen Selbstorganisationsideen und -konzepte ausgesetzt, bzw. die wesentlichen Mängel, mit denen sie behaftet waren, zum andern die ideengeschichtlichen Vorleistungen, denen die moderne Selbstorganisationsforschung ein Gutteil ihrer Existenz verdankt. Dabei soll, um dies nochmals zu betonen, die Bedeutung des »paradigmatic shift« während der 1960er Jahre keineswegs bestritten werden, zumal der Verfasser sich bewußt ist, daß die Rekonstruktion einer Vorlaufgeschichte eben auch ein *konstruktiver* Akt ist in dem Sinne, daß erst rückblickend - aus der Perspektive einer fortgeschrittenen Entwicklung - bestimmte historische Errungenschaften als mehr oder minder konsequente Schritte auf dem Wege dorthin *erscheinen*. So gibt es nirgendwo einen gleitenden Übergang, sondern stattdessen eine voraussetzungsreiche Vorgeschichte, deren »archäologische« Aufarbeitung (i. S. einer »Archäologie des Wissens«) ein allemal lohnendes Unterfangen ist.

3 Moderne Konzepte der Selbstorganisation

Entscheidend für die Entstehung der modernen Selbstorganisationsforschung war, wie gesagt, die Erkenntnis, daß Strukturbildung als Entstehung von Ordnung nur weit weg vom thermodynamischen Gleichgewicht möglich ist. Dies verlangt die Offenheit der Systeme für Materie- und Energiefluß. Wird ein gleichgewichtsfernes System instabil, so geht es im allgemeinen von einem Ordnungszustand in einen anderen über. Instabilitäten bilden demnach den Ursprung der Systementwicklung.

In *Kapitel III* werden wir die unabhängige Entstehung von insgesamt sieben Konzepten der Selbstorganisation aus dem Zeitraum 1960 bis 1974 behandeln. Im Folgenden wollen wir diese Ansätze kurz skizzieren, damit dem weniger informierten Leser die in Kapitel II hergestellten Bezüge zwischen den frühen und modernen Selbstorganisationskonzepten einsichtiger werden.⁴

(1) Die Theorie *dissipativer Strukturen*: Ihr Schöpfer ist der Chemiker und Thermodynamiker Ilya Prigogine, der sich in den frühen 1960er Jahren dem Problem der Ordnungsentstehung in dissipativen (energiestreuenden) Systemen zuwandte; zu seiner Lösung gelangte er, indem er den Formalismus der irreversiblen Thermodynamik auf Nichtgleichgewichtsprozesse ausdehnte. Damit wurde erstmals beschrieben und erklärt, wie »Ordnung aus Fluktuation« entstehen kann: Im Falle nicht-linearer Ungleichgewichte können (mikroskopisch) kleine energetische Fluktuationen - seien dies Störungen aus der Umwelt oder systemische Eigenfluktuationen - das System in einen ganz neuen (makroskopischen) Zustand treiben und dadurch zum Motor der Systementwicklung werden. Diese ist abhängig von den Anfangsbedingungen der Systemdynamik, d. h. von

⁴ Vgl. auch die Kurzcharakteristik der Ansätze in: G. Küppers und R. Paslack, »Die Entdeckung des Komplexen - Zur Entstehung und Entwicklung der Theorie der Selbstorganisation«, in: F. Schafstedde (Hg.), *Der ganze Mensch und die Medizin*, Hamburg 1989, S. 71 ff.

der bisherigen »Geschichte« des Systems. Obgleich ein solches System kausal determiniert ist, kann der künftige Entwicklungspfad von einem Beobachter nicht vorausgesagt werden.

(2) Die Theorie der *Synergetik*: ihr Begründer, der Physiker Hermann Haken, demonstrierte in den 1960er Jahre am Beispiel des Lasers, wie aus einem zunächst völlig ungeordneten (chaotischen) »Gemisch« von Lichtwellen unterschiedlichster Frequenz und Phase (normales Licht) ein einziger monochromatischer Wellenzug von hoher Kohärenz (eben Laserlicht) hervorgehen kann, indem die Emissionen der Laseratome spontan koordiniert werden. Entscheidend dabei ist, daß diese Koordination vom Laserlicht selbst geleistet wird: durch die besondere Konstruktion der Laserapparatur erhält ein bestimmter Wellenzug einen minimalen Vorteil gegenüber allen anderen, sich zu verstärken, so daß er schlagartig alle anderen Laserelektronen dazu zwingt, ihre Photonenwellen in gleicher Phase mit ihm zu emittieren (dies nennt Haken »Versklavung«). Unter den kritischen Moden findet eine Selektion statt dergestalt, daß die »siegreiche« Welle zum »Ordner« wird, wie Haken sagt, d. h. das Leuchtverhalten der Elektronen bestimmt. Umgekehrt bringen aber die Elektronen durch ihr gleichmäßiges Schwingen den Ordner erst hervor. Das Auftreten des Ordners und das kohärente Verhalten der Elektronen bedingen sich daher wechselseitig: beides »synergiert«. - In der Folge entwickelte Haken eine globale Theorie der »Synergetik« (»Lehre vom Zusammenwirken«), die eine große Klasse verschiedenartigster (natürlicher, sozialer und kultureller) Phänomene der Entstehung von Ordnung aus Unordnung durch selektive Selbstkoordination der dynamischen Systemkomponenten nach dem Vorbild des Lasers umfaßt: das Spektrum der Anwendungen reicht von der Populationsdynamik bis hin zur Mustererkennung in »synergetischen Computern«.

(3) Die Theorie *autokatalytischer Hyperzyklen*: Sie ging aus den Arbeiten des Biochemikers Manfred Eigen zur molekularen Selbstorganisation in den 1960er Jahren hervor. Indem Eigen zeigte, daß die Entstehung von Leben das Resultat von molekularen Ausleseprozessen ist, gelang ihm eine Erweiterung der darwinistischen Selektionstheorie auf den präbiotischen Bereich. Autokatalytische Prozesse von Polynukleotiden verketteten sich zu einem »Hyperzyklus«, der in hohem Maße zur Korrektur von Replikationsfehlern und damit zur Erhaltung und Weitergabe komplexer Information befähigt ist. Verschiedene Hyperzyklen konkurrieren als »Quasispezies« miteinander um die knappen Aminosäuren

zur Produktion von Proteinen und stimulieren so wechselseitig ihre Evolution; dieser Vorgang läßt sich in Form von Optimierungsmodellen mathematisch darstellen.

Entscheidend für das weitere Evolutionsgeschehen ist, daß die als »Eigenwert« eines komplexen Selektionsprozesses entstandene organische Struktur (DNA) zur maßgeblichen Randbedingung der biologischen Evolution wird. Bei Organismen, vom Prokaryonten an aufwärts, zeigt sich die »operationale Geschlossenheit« ihrer Prozeßorganisation also daran, daß sie über ihren genetischen Code die inneren Randbedingungen selbst festlegen. Auf dieser Stufe kommt damit ein neuer Schub in die Entwicklung: Organismen testen nicht nur wie präbiotische Systeme ihre Angepaßtheit an die Umwelt, sondern *organisieren* ihre Anpassung eigendynamisch.

(4) *Chaostheorien*: hier werden wir zwei Konzepte näher behandeln: zum einen die Arbeiten des Mathematikers und Meteorologen Edward N. Lorenz, der 1960 mit dem Computer ein globales Wettermodell entwickelt und dabei festgestellt hatte, daß seine Simulationen zwar gewisse Grundmuster produzierten, niemals aber exakte Wiederholungen zeigten. Es herrschte eine Art von »geordneter Unordnung« - Chaos und Stabilität in einem. Zwei Simulationen (zwei Wetterkurven), die von nahezu demselben Punkt (Rundungsfehler bei der Eingabe erlauben keine exakte Wiederholung) ausgingen, divergierten in der Folge immer weiter voneinander. Das Wettersystem war offenbar ein System, das keine Periodizität aufwies, mithin auch keine längerfristigen Vorhersagen erlaubte. Geringe Inputabweichungen können zu drastischen Outputdifferenzen führen. Das bedeutet, daß das Wettersystem offensichtlich von den Anfangsbedingungen »sensitiv abhängig« ist (»Schmetterlingseffekt«). Lorenz wandte sich daraufhin der Untersuchung anderer nicht-linearer Systeme, speziell konvektiver Strömungen, zu, deren Verhalten ebenfalls von sich selbstverstärkenden positiven Rückkoppelungen bestimmt wird. Er erkannte, daß bereits einfache deterministische Systeme (wie etwa Wasserräder oder Pendel) in Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen aperiodisches, chaotisches Verhalten zeigen können (Wechsel des Rotationssinns, Umpolungen usw.).

Zum andern werden wir auf die Begründung der »fraktalen Geometrie« durch den Mathematiker Benoit Mandelbrot eingehen: Mandelbrot erkannte Ende der 1960er/Anfang der 1970er Jahre, daß sich die unregelmäßigen Raum-/Zeit-Strukturen etwa von

Küstenverläufen, Bergketten oder Störungen im Telegrafennetz in jedem Maßstab der Analyse wiederholen: auch beim Wechsel auf eine geringere Skalierungsstufe werden diese Strukturen nicht einfacher oder regelmäßiger, sie behalten vielmehr ihre komplexe Ordnung bis hinab zu atomaren Maßstäben bei; sie sind offenbar in maßstabsunabhängiger Weise »selbstähnlich«. Derartig »selbstähnliche« Strukturen lassen sich mit Hilfe der euklidischen Geometrie nun nicht mehr adäquat beschreiben, insbesondere deshalb nicht, weil z. B. eine in jeder Skalierung bizarre Zickzacklinie keineswegs zwei-, sondern »gebrochen«-dimensional ist. Mandelbrot schlug daher eine »fraktale Geometrie« vor, die mit unganzzahligen Dimensionen Objekte beschreibt, wobei ein und demselben Objekt je nach verwendetem Maßstab eine andere Dimension zukommen kann. - Dieses fraktale Beschreibungsmodell wiederum bahnte Physikern den Weg zu einem neuen Verständnis der komplexen Strukturen dynamischer Systeme, wie z. B. der turbulenten Strömungen in Flüssigkeiten.

(5) *Systemtheoretisch-kybernetische Ansätze*: Im Mittelpunkt werden hier die Arbeiten des Physikers und Kybernetikers Heinz von Foersters stehen. 1960 war von Foerster mit Hilfe des Redundanzbegriffes von Shannon eine phänomenologische Beschreibung der Ordnungsentstehung und -zunahme gelungen. Die Ordnung eines Systems kann nicht allein durch den Import von Ordnung aus der Umwelt, sondern auch - selbstorganisativ - durch die »Verwendung« energiereicher Störungen wachsen (Prinzip des »order from noise«). »Ordnung durch Störung« bedeutet, daß die Prozeßdynamik gerade die Störungen (energetischen Impulse) aus der Umwelt auswählt und einbaut, die zu einem Zuwachs an innerer Ordnung führen. Was in das System Einlaß findet, ist lediglich strukturiertes »Baumaterial«, das einer bereits existierenden inneren Ordnung des Systems eingepaßt bzw. zu deren Organisation oder Reorganisation nach systemeigenen Regeln benutzt wird. Die »eigengesetzliche« (autonome) Verwandlung von Energie (aus Störungen) in Struktur ist somit die wesentliche Leistung selbstorganisierender Systeme. Dabei spielen rekursive (rückkoppelnde) Prozesse eine herausragende Rolle.

Wie sich positive Rückkopplungsprozesse der »Abweichungsverstärkung« als Mechanismen der Erzeugung und Differenzierung von Ordnung charakterisieren lassen, werden wir anschließend bei Magoroh Maruyama kennenlernen.

(6) *Autopoiese und Selbstreferentialität*: Auf der Suche nach den Organisationsprinzipien des Lebens (und des Nervensystems) kamen die Neurobiologen Humberto Maturana und Francisco Varela zu Beginn der 1970er Jahre zu einer verblüffenden Antwort: Lebewesen seien »autopoietische Systeme«, d. h. Systeme, die ihre Komponenten durch das Netzwerk der Operationen herstellen, das durch diese Komponenten definiert wird. Die »kreis-produktionale« Geschlossenheit definiert die autopoietische *Organisation* von Lebewesen überhaupt, während ihre je verschiedenen artspezifischen *Strukturen* (Anatomie, Physiologie usw.) diese Organisation nur jeweils spezifizieren. Solche Systeme sind also *operational geschlossen*, da sie zyklisch die Elemente, aus denen sie bestehen, aus eben diesen Elementen selbst erzeugen (vgl. Eigens »Hyperzyklus«). Dies können »allopoietische« Systeme, wie etwa Maschinen, die zu einem bestimmten technischen Zweck *konstruiert wurden*, nicht. - Wiederum sind es kritische Fluktuationen, die ein autopoietisches System instabilisieren und seine Struktur in ein neues Regime evolvieren lassen können. Die gleichen Bedingungen, die einem System seine Autopoiese ermöglichen, nämlich Offenheit, Ungleichgewicht und spezifische Autokatalyse, ermöglichen ihm auch - über eine interne Selbstverstärkung von Fluktuationen - den evolutionären Durchlauf durch eine unbestimmte Sequenz von Ordnungsregimes.

Was die Theorie der Autopoiese als eine Theorie der selbstreferentiellen Geschlossenheit von dynamischen Systemen zudem epistemologisch (kognitionsbiologisch) interessant macht, ist die Konsequenz, daß autopoietische Systeme auch *informational geschlossen* sind: die Wirklichkeit ist für solche Systeme kognitiv nur insofern vorhanden und so strukturiert, als sie und wie sie im Netzwerk ihrer Komponenten definiert wird. Umwelt und Selbst werden nicht unabhängig von der Organisation des Systems als ganzem wahrgenommen und verstanden; dies gilt für biologische Systeme mit und ohne Gehirn (der Lebensprozeß selbst ist bereits Erkenntnisprozeß, dessen Differenziertheit freilich durch die Tätigkeit eines speziellen Nervenapparates gesteigert werden kann). Die These, daß die vermeintliche »Repräsentation« der Außenwelt immer nur eine besondere Form der

Selbstrepräsentation eines bestimmten kognitiven Systems (Lebewesens) ist, sollte zum epistemologischen Fundament des sogenannten »Radikalen Konstruktivismus« werden.⁵

(7) Die Theorie des »elastischen« Ökosystems: Mitte der 1960er Jahre kommt es im Bereich der Ökologie (Ökosystemforschung) durch das Konzept der »Koevolution« (P. Ehrlich, J. Lovelock, L. Margulis) und Untersuchungen zur Stabilität von Ökosystemen jenseits des Gleichgewichts zu neuen Modellvorstellungen. Besonders die Forschungen von C. S. Holling zur Anwendbarkeit der Systemtheorie auf ökologische Fragestellungen verdienen hier Aufmerksamkeit. 1973 führte Holling die Unterscheidung zwischen »stability« und »resilience« ein, um zu einem besseren Verständnis dynamischer Prozesse in Ökosystemen zu gelangen. Er ging von der Beobachtung aus, daß bei kritischen Störungen die Stabilität eines Ökosystems nicht mehr gewährleistet ist. Bedeutet »stability« - ganz i. S. der Tradition -, daß ein Ökosystem in der Lage ist, sein Gleichgewicht oder eine bestimmte Dynamik aufrechtzuerhalten, so bezieht sich »resilience« auf die Fähigkeit eines Systems, angesichts starker Umweltturbulenzen mit internen Strukturänderungen antworten bzw. in einen anderen Gleichgewichtszustand überwechseln zu können. »Elastizität« ermöglicht dem Ökosystem also diskontinuierliche Übergänge (»jumps«) in neue Ordnungsregimes. Von seinem inneren Reichtum (an Arten und anderen Komponenten) hängt der Grad seiner Elastizität - seiner Wandelbarkeit und mithin seiner Überlebensfähigkeit - entscheidend ab.

In einer solchen ökosystemischen Sicht ist Evolution stets »Ko-evolution«: alle ein Ökosystem konstituierenden Komponenten entwickeln sich in mehr oder minder enger Koppelung. Dadurch befindet sich das Ökosystem in ständiger evolutionärer Unruhe. Das Ungleichgewichtsprinzip erscheint auf der ökologischen Ebene als Inter-Systembedingung für Symbiose und Koevolution. In diesen Rahmen fügt sich die 1974 von J. Lovelock und L. Margulis entwickelte »Gaia«-Hypothese, derzufolge die gesamte Biosphäre der Erde als ein - gleichsam autopoietisches - System koevolvierender Komponenten erscheint.

Betrachtet man die Ausbildung dieser sieben Urkonzepte der modernen Selbstorganisationsforschung in historischer Perspektive, d. h. im Blick auf die spezifi-

⁵ Siehe dazu einschlägig: S. J. Schmidt (Hg.), *Der Diskurs der Radikalen Konstruktivismus*, Frankfurt a. M. 1987.

schen Voraussetzungen, die ihre Formulierung ermöglicht und ihren späteren Erfolg befördert haben, so sollte man insbesondere zwei Momente schon jetzt im Auge behalten (ihrer genaueren Erörterung und Plausibilisierung dient das Kapitel II):

(1.) Die ersten Selbstorganisationskonzepte werden entwickelt für die Lösung von Problemen, die sich aus der traditionellen Forschung ergeben haben; sie versuchen daher zunächst - ganz »unrevolutionär« - an *konventionelle* (*»normalwissenschaftliche«*) *Forschungskontexte* anzuschließen; recht bald wird jedoch deutlich, daß dieser Anschluß nicht bruchlos gelingen kann, daß strukturell abweichende Problemwahrnehmungen und Problembearbeitungsweisen die neuen Konzepte charakterisieren und daß ihnen eine über den speziellen Problembereich hinausreichende Bedeutung zukommt, die zum einen neue Forschungsperspektiven eröffnet und zum andern herkömmliche Beschreibungs- und Erklärungsmuster radikal infragestellt.

(2.) Partiiell - so vor allem im Falle der Untersuchung chaotischen Systemverhaltens - knüpfen einige der neuen Selbstorganisationskonzepte mit großem Erfolg an die *Entwicklung leistungsfähiger Digitalrechner* an, deren hohe Rechenkapazitäten und Grafikfähigkeiten bestimmte Entdeckungen von Selbstorganisationsphänomenen und ihre Aufklärung erst möglich machen (so verdankt Mandelbrots »experimentelle Geometrie« dem Computer sowohl seinen wissenschaftlichen Durchbruch als auch seine allgemeine Popularität).

Möglicherweise markieren diese beiden Momente - die erfolgreiche Bearbeitung und unvermutete Bedeutungsaufwertung traditioneller »Forschungsrätsel« einerseits und die Steigerung experimenteller und/oder mathematischer Analysemethoden durch eine technische Innovation andererseits - zwei Erfolgsbedingungen wissenschaftlicher Revolutionen überhaupt.

4 Danksagung

Die vorliegende Monographie wäre nicht möglich gewesen ohne den institutionellen Rahmen, in dem die Arbeiten des Autors während der letzten Jahre eingebettet waren. Sie ist hervorgegangen aus einem Forschungsprojekt zur »Genese und Struktur der Selbstorganisationsforschung«, das in den Jahren 1987 bis 1989 am »Universitätsschwerpunkt Wissenschaftsforschung« der Universität Bielefeld durchgeführt worden ist. Der Autor dankt insbesondere den Leitern des Projekts, Herrn G. Küppers und Herrn W. Krohn, für ihre wissenschaftliche Unterstützung und der »Stiftung Volkswagenwerk« für die finanzielle Förderung des Projekts. Für den Inhalt des Buches trägt ausschließlich der Autor die Verantwortung.

II Frühe Konzepte der Selbstorganisation

1 Philosophiegeschichtlicher Vorlauf

Voraussetzung für jede Vermutung eines umfassenden Paradigmenwechsels in den Wissenschaften ist, daß die wissenschaftlichen Ideen »revolutionär« sind oder doch dafür gehalten werden. Aber genau an dieser Stelle wirft die Revolution der »Selbstorganisation« ein Problem auf: ihre Grundvorstellungen sind offenbar alt. Die Entstehung der natürlichen und gesellschaftlichen Ordnung ist bereits das Grundthema der Ursprungsmythen bei den Indern, Chinesen, Griechen, Hebräern und vielen anderen Völkern. Häufig steht die Idee des Chaos am Anfang und damit das Problem, wie aus Chaos Ordnung hervorgehen kann. Aus dem Chaos entstehen die Götter und durch diese dann alles andere.⁶ Dabei bleibt die ursprüngliche Theogonie in der Regel ein völlig unverständliches Geschehen, ein undurchdringliches Mysterium. Andere Völkerschaften, wie etwa die alten Hebräer, haben daher dem Chaos (dem »Tohuwabohu«) von vornherein ein zweites ordnendes Prinzip an die Seite gesetzt: einen Urgott, ohne dessen Walten es für alle Zeiten beim strukturlosen Chaos geblieben wäre. Doch wurde damit das Problem nur verschoben: unklar bleibt, warum und wie der Schöpfergott die ungestaltete Materie ordnet und regiert.⁷ Da der Weltenstoff sich nicht aus sich heraus ordnet, wird er dem (vernünftigen) Willen einer transzendenten Ordnungsmacht unterworfen - die Weltordnung mithin als Resultat einer »höheren« Ordnung, eines göttlichen Plans gedacht. Philosophisch befriedigender - und intellektuell ökonomischer - demgegenüber wäre es, nur von einem uranfänglichen Chaos auszugehen, das den geordneten Weltprozeß selbsttätig emaniert und strukturiert. Doch wie soll man sich einen solchen Vorgang vorstellen?

⁶ So zeigt der frühgriechische Dichter Hesiod (um 700 v. Chr.) in seiner »Theogonie«, die zugleich eine Kosmogonie ist, die Entstehung der Götter (deren Genealogie) und des Kosmos aus einem gemeinsamen ungestalteten Anfang heraus: aus dem Chaos entspringen Gaia, die Erde, und Eros als erste Gestalten und aus ihnen dann der ganze Gestaltenreichtum der kosmischen Ordnung.

⁷ Vergl. R. von Woldeck, »Formeln für das Tohuwabohu«, in: *Kursbuch*, H. 98, 1989, S. 1 f.

1.1 Antike Selbstordnungskonzepte

Es wundert jedenfalls nicht, daß angesichts der dunklen oder ausweichenden Antworten, die uns die diversen Mythologien und Religionen auf die Frage nach dem Ursprung der *Ordnung* (der Ursprung des *Seins* ist hier nicht das Thema) anbieten, das Verhältnis von Ordnung (Kosmos) und Unordnung (Chaos) ein *philosophisches* Thema seit jeher ist. So wurde bereits in der Frühzeit der griechischen Naturphilosophie über Chaos und Turbulenz als Quelle spontaner Ordnungsbildung spekuliert. Verweisen ließe sich etwa auf den Vorsokratiker Heraklit, dessen Lehre zufolge alle Ordnung einem ewigen Widerstreit gegensätzlicher Kräfte entspringt; da alles Gewordene einem stetigen Wandel unterworfen sei (»panta rhei«), ist ständige Ent-Ordnung ein notwendiger und normaler Vorgang, dem alles Neue sein transitorisches Dasein verdankt. Das »lebendige Feuer« dient Heraklit als Chiffre für diesen unablässigen Gestaltwechsel: immer wieder werden All und Feuer ineinander umgewandelt. An die Stelle des mythischen Schöpfergottes tritt ein Urstoff oder ein Urprinzip (»arché«).⁸ In der vorsokratischen Philosophie wird so erstmals nach *natürlichen* Ursachen für die Entstehung der kosmischen Ordnung gefragt. Auch neuzeitliche Prozeßphilosophen haben gern an Heraklit angeknüpft: so etwa A. N. Whitehead, der unter explizitem Verweis auf Heraklit den Prozeßcharakter der Natur zum zentralen Thema einer neuen Metaphysik erklärt.⁹

Einen der ersten Versuche, das Problem der Selbstorganisation mit Hilfe einer philosophischen Terminologie zu durchdringen, bietet Aristoteles.¹⁰ Aristoteles hatte in seiner »Physik« der Idee der Selbstorganisation durch die für ihn typische Begriffsbildung

⁸ Bei Thales etwa ist es das Wasser, bei seinem Schüler Anaximenes die Luft.

⁹ Siehe dazu vor allem das 10. Kapitel in A. N. Whitehead, *Prozeß und Realität*, Frankfurt a. M. 1979 (im englischen Original bereits 1929 erschienen), in dem Whitehead seine Prozeßontologie entwirft. In dieser konstruktiven Metaphysik gelten Objekte als relativ beständige, gleichsam atomistische Bausteine der Natur, die jedoch nur Merkmale oder Eigenschaften des allgemeinen Werdens sind: Dinge seien als Prozesse zu denken, die ihre Identität aus ihren Beziehungen zu anderen Dingen gewinnen; Relationismus und Prozessualismus werden hier gegen Substantialismus gesetzt. - Zur Aktualität Heraklits siehe etwa auch die emergenztheoretische Arbeit von P. Eisenhardt, D. Kurth und H. Stiehl, *Du steigst nie zweimal in denselben Fluß - Die Grenzen der wissenschaftlichen Erkenntnis*, Reinbek b. Hamburg 1988.

mittels anthropomorpher Metaphern Ausdruck gegeben (wobei er sich gegen Demokrit wendet):

»Widersinn aber ist es, wenn man an ein zweckbestimmtes Werden mit der Begründung nicht glauben will, es sei nichts davon zu sehen, daß die Prozeßursache zuvor überlegt habe. Auch der erfahrene Handwerker braucht nicht erst zu überlegen. Und hätte die Schiffbaukunst ihren Sitz im Bauholz, so wäre ihre Arbeitsweise wie die der Natur. Daraus folgt: Wenn im menschlichen Herstellen Finalität vorliegt, dann auch in (der Produktion) der Natur. Am aufschlußreichsten aber ist der Fall, daß ein Arzt sich selbst behandelt; denn genauso liegen die Dinge auch bei der Natur.«¹¹

Interessant ist, wie Aristoteles das Moment der Rückbezüglichkeit (in der Metapher des sich selbst behandelnden Arztes) in den Prozeß einer sich selbst zweckbestimmt organisierenden Natur einbezieht. Andererseits bedeutet das Festlegen der Selbsterstellung und -entwicklung der Natur auf Zwecke (»Finalität«) ein teleologisches Denken, das den modernen Selbstorganisationstheorien gerade nicht mehr zugrundeliegt.

Aus dem ersten vorchristlichen Jahrhundert ließe sich der römische Atomist Lukrez anführen, für I. Prigogine und I. Stengers einer der Stammväter der Idee vom »kreativen Chaos«¹²: Lukrez' »Atome« (er nennt sie »primordia«, »elementa« oder »semina«) bewegen

¹⁰ Nach Aristoteles ergeben sich, grob gesagt, alle Gegenstände der realen (sublunaren) Welt aus unbeständigen Verknüpfungen von Stoff und Form; da es nach ihm kein Vakuum gibt, stehen diese Gegenstände in unmittelbarer Wechselwirkung. Weiter kompliziert wird das Bild allerdings durch die Einführung gegensätzlicher Prinzipien (z. B. Warmes-Kaltes) und von vier Elementen (Feuer, Luft, Wasser und Erde), die mit bestimmten Grundqualitäten ausgestattet sind und ineinander »transmutieren« können. Je nach dem Mischungsverhältnis erhalten wir verschiedene Objekte innerhalb eines hierarchisch aufgebauten Kosmos. Um nun den Weltprozeß überhaupt in Bewegung setzen zu können, postuliert Aristoteles einen »ersten Beweger« (Gott), auf den hin alle Wesen sich anzunähern (und dadurch zu vervollkommen) bestrebt sind (»causa finalis«).

¹¹ Aristoteles, *Physik*, Buch II, 8, 199b, 28 ff.

¹² I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, München 1981, S. 149 f. bzw. S. 290 ff.

sich nicht exakt auf Geraden oder gleichförmigen Bahnen; ihrer Bewegung eignet eine unberechenbare »declinatio«, eine Abweichung, die als elementare Spontaneität die ganze Dingwelt durchläuft und in der Willensfreiheit des Menschen gipfelt. Uranfänglich haben nach Lukrez kleinste Störungen innerhalb des universellen (laminaren) »Sturzes« der Atome sich ausbreitende Wirbel erzeugt, in denen sich die Atome begegnen und verbinden konnten, wobei sie schließlich die mannigfaltigen Strukturen des Kosmos - die Welt der Dinge und Organismen - hervorbrachten. Indem Lukrez an die ältere Atomistik des Demokrit anknüpft, entwickelt er ein mechanistisches Weltbild, in dem sogar die Evolution der Lebewesen als ein Resultat der natürlichen Zuchtwahl Platz hat: alles Seiende geht aus der konfliktreichen Wechselwirkung der Atome und Atomkomplexe hervor.¹³ Wenn man so will, so könnte man bei Lukrez sowohl das für moderne Selbstorganisationstheorien wichtige Prinzip der »Synergetik« (Lukrez' atomare Wirbel) als auch das der Selektion (Auswahl des Geeignetsten) vorgeformt sehen.

Nicht, daß damit die heutigen Chaostheorien bereits vorweggenommen worden wären, soll damit gesagt werden, sondern lediglich, daß die Idee eines welterschöpfenden Chaos auch in früheren Zeiten philosophisch akzeptabel sein konnte. Besonders solche philosophischen Ansätze, die für eine »monistische« Anschauung der Welt plädierten, suchten nach Erklärungsmodellen für spontane Unordnungs-Ordnungs-Übergänge. In der antiken Philosophie sind sie häufig anzutreffen. Im Gefolge dualistischer Begriffsbildungen aber, die in erster Linie auf Platon¹⁴ zurückgehen und die fortan die philosophische - vor allem christlich geprägte - Tradition dominierten, wurde Chaos zunehmend zum

¹³ »Denn es haben gewiß mit Vernunft nicht der Dinge Atome
jedes in Reih und Glied sich mit scharfem Spürsinn geordnet...
sondern dieweil auf vielfache Art viele Samen der Dinge
seit unendlicher Zeit schon, von ihren Schlägen gestoßen
und vom eignen Gewicht bewegt, zu treiben gewohnt sind,
sich zu vereinen auf jegliche Art und alles zu prüfen,
was zu schaffen imstand unter sich sie wären vereinigt,
darum geschieht's, daß, die mächtige Zeit hindurch sich verbreitend,
jeder Art Verbindungen sie und Bewegung erproben
und am Ende so die sich vereinen, die plötzlich geschleudert,
häufig zum Anfang werden sodann gewaltiger Dinge,
dieser Erde, des Meeres und Himmels, des Stamms der Belebten.«

(Entnommen aus: Lucretius, *Welt aus Atomen*, Lateinisch und Deutsch, übers. von K. Büchner [Bibliothek der Alten Welt], Zürich 1956, V, S. 419 ff.)

Inbegriff der ungestalten rohen Masse, die des davon wesensverschiedenen Geistes als »Ordner« bedarf. Die Möglichkeit einer Entstehung von Strukturen aus turbulenter Materie wird dennoch die ganze Philosophiegeschichte hindurch immer wieder erwogen: von Aristoteles über Kant und Schelling bis hin zu Whitehead.

1.2 Neuzeitliche Selbstordnungskonzepte

Im Gegensatz zu den theologisch inspirierten Naturvorstellungen des Mittelalters¹⁴ ist die Naturphilosophie der Renaissance (ca. 14.-16. Jh.) im wesentlichen durch ein pantheistisches Weltbild der Identifizierung von Gott und Natur geprägt. Die als organisch aufgefaßte Natur gilt selbst als göttlich, unerschaffen, unendlich ausgedehnt und als sich selbst unablässig umgestaltend. Im Weltmittelpunkt steht der Mensch als die höchste Form der Selbstentfaltung Gottes (Anthropozentrismus, Humanismus). Ein philosophischer Monismus - etwa bei N. Cusanus und bei G. Bruno - tritt an die Stelle des christlichen Dualismus.

Mit R. Descartes (1596-1650) kehrt dann die dualistische Weltsicht in gewandelter Form zurück. Gott ist wieder der extramundane Schöpfer der Materie; diese aber, einmal erschaffen, entwickelt sich nach mechanischen Gesetzen aus sich selbst heraus. In seinen »Principia philosophiae« von 1644 beschreibt Descartes den Anfang der Welt als eine chaotische Bewegung gleichartiger Materieteilchen, die sich durch wechselseitige Stöße aus ihrer geradlinigen Trägheitsbewegung drängen. Da für Descartes die Kreisbewegung - im Unterschied zu Newton - die ursprüngliche Bewegungsform darstellt, kommt es zur spontanen Ausbildung von Wirbeln und Rotationen. Dabei schleifen sich die Teilchen aneinander ab: aus dem Abschleiß entspringen zum einen sehr feine (kugelförmige)

¹⁴ Im »Timaios« kontrastiert Platon eine unveränderliche Welt der Ideen mit einer Welt des Besonderen und Anarchischen (Chaotischen), aus deren Verschränkung unsere veränderliche Erfahrungswelt hervorgeht.

¹⁵ Zum mittelalterlichen Modell der »natura lapsa«, einer in Sünde gefallenen Natur, deren chaotischem Treiben nur das unablässige Eingreifen Gottes Herr zu werden vermag, siehe den Abschnitt 2.2 dieses Kapitels (»Theologisches Zwischenspiel«).

Teilchen, die den alle Zwischenräume erfüllenden Äther bilden, und zum andern größere unregelmäßige Bruchstücke, die sich miteinander zu kleineren Massen verhaken können. Descartes zeigt nun, wie sich aus dem Zusammenspiel der verschiedenen Teilchen die kosmischen Massen - Sonnen und Planeten - herausbilden. Ohne daß wir Descartes' Spekulationen hier im einzelnen beschreiben wollen, ist damit wohl deutlich geworden, wie sich Descartes die Selbstorganisation der Materie im Prinzip vorstellt.¹⁶ Für die Wissenschaften folgenreicher als Descartes' recht eigenartige Kosmogonie war seine Verbindung von Algebra und Geometrie zur analytischen Geometrie bzw. Descartes' darauf gründendes Programm einer Mathematisierung der Wissenschaften: wissenschaftliche Erkenntnis ist nunmehr im wesentlichen mathematische Erkenntnis, die ihrerseits in »eingeborenen Ideen« gründet; ihre Richtigkeit oder Angemessenheit bezüglich der materiellen Welt wird dabei durch Gott garantiert.

Im 17. Jahrhundert, in dem sich die Etablierung des mechanistischen Weltbildes vollzog, nimmt es nicht Wunder, daß das Problem der materiellen Selbstorganisation auch bei G. W. Leibniz (1646-1716) in seiner »Monadologie« von 1714¹⁷ in technomorpher

¹⁶ Newton wird später Descartes Wirbelhypothese in seinen »Principia« von 1687 kritisieren: so widerspreche ihr die offensichtliche Regelmäßigkeit der Bewegungsbahnen kosmischer Körper (von Kometen, Planeten usw.). Newton selbst stellt Descartes seine Lehre von der wechselseitigen Schwerkraftanziehung zwischen den Körpern entgegen. Die ursprüngliche Ausgangsverteilung der Materie im Raum gehe dabei auf einen Ordnungsakt Gottes zurück; auch die Erhaltung der Stabilität (etwa der Planetenbahnen) über die Beseitigung sich allmählich aufschaukelnder Unregelmäßigkeiten im gravitativen Wechselspiel der kosmischen Massen gründe in einer gelegentlichen göttlichen Nachregulierung des Weltenlaufs.

¹⁷ Nicht zuletzt neue geologische Erkenntnisse (Fossilienfunde) hatten Leibniz seinerzeit von der Veränderlichkeit der Welt überzeugt: die Natur erschien ihm als selbstschöpferisch und entwicklungsfähig. Die Einheit der Welt stellt sich ihm dabei dar als ein von Gott aufrechterhaltener Verbund von »Monaden«, geistiger Krafteinheiten, die bei ihm an die Stelle der Atome treten; die Welt als ganze sei aus solchen Monaden in Schichten unterschiedlicher Organisiertheit aufgebaut. Jede der zahlreichen »fensterlosen« Monaden spiegele in sich die ganze Welt in je spezifischer Perspektive, bedarf also keines »Außen«, und konstituiere sich durch eben diesen Prozeß einer »repraesentatio mundi«. Die Verträglichkeit (Abgestimmtheit) der vielen monadischen Perspektiven werde von Gott, der höchsten oder »monas monadum«, gewährleistet, indem er sie in dieser »besten aller möglichen Welten« entsprechend »harmonisiert« habe (vgl. die Darstellung bei H. H. Holz, *Leibniz*, Stuttgart 1958, besonders S. 19 ff.).

Gestalt verhandelt wird, wobei Leibniz auf faszinierende Weise einige Aspekte der Idee des »Hyperzyklus« (M. Eigen) vorwegzunehmen scheint:

»So ist jeder organische Körper eines Lebewesens eine Art von göttlicher Maschine oder natürlichem Automaten, der alle künstlichen Automaten unendlich übertrifft. Denn eine durch Menschenkunst gebaute Maschine ist nicht auch Maschine in jedem ihrer Teile. So hat z. B. der Zahn eines Messingrades Teile oder Stücke, die für uns nichts Kunstvolles mehr sind und die nichts mehr von der Maschine merken lassen, zu deren Betrieb das Rad bestimmt war. Aber die Maschinen der Natur, d. h. die lebendigen Körper, sind doch in ihren kleinsten Teilen, bis ins Unendliche hinein, Maschinen. Eben darin besteht der Unterschied zwischen Natur und Kunst, d. h. zwischen der göttlichen Kunstfertigkeit und der unsrigen«.¹⁸

Charakteristisch für die »Maschinen« der Natur, die Organismen, ist es demnach, daß sie auf allen ihren - im Prinzip unzählig vielen - Organisationsebenen *irreduzibel komplex* sind: dieser Gedanke von Leibniz erinnert cum grano salis an B. Mandelbrots Prinzip der »Selbstähnlichkeit«, demzufolge ein komplexes System in jedem Größenmaßstab - auf jeder Skalierungsstufe der Analyse - wieder eine ähnlich komplexe Struktur aufweist. Mehr als eine grobe Analogie soll damit zwischen Monadenlehre und Fraktalgeometrie freilich nicht behauptet werden.

Der Gebrauch des Ausdrucks »Selbstorganisation« im modernen Sinne ist (mindestens) bis I. Kant (1724-1804) zurückzuverfolgen, der sich in der »Kritik der Urteilskraft« von 1790 mit der internen Zweckmäßigkeit in der Natur, also ihren systemischen Eigenschaften auseinandersetzte. Das besondere Denkproblem bestand für Kant darin, für die Erklärung der Zweckmäßigkeit die Zwecke selbst nicht heranzuziehen, da diese nicht weniger »blind« wirken und bewirkt werden wie alle anderen kausalen Wechselwirkungen. Die begriffliche Lösung, die Kant anbot, steht in einer gewissen Nähe zu den heutigen Theorien der Autopoiesis (Maturana/ Varela) und Selbstorganisation:

¹⁸ G. W. Leibniz, *Monadologie*, 64, Hamburg 1956, S. 57.

»In einem solchen Produkte der Natur wird ein jeder Teil, so, wie er nur durch alle übrige da ist, auch als um der andern und des Ganzen willen existierend, d. i. als Werkzeug (Organ) gedacht: welches aber nicht genug ist (denn er könnte auch Werkzeug der Kunst sein, und so nur als Zweck überhaupt möglich vorgestellt werden); sondern als ein die andern Teile (folglich jeder den andern wechselseitig) hervorbringendes Organ, dergleichen kein Werkzeug der Kunst, sondern nur der allen Stoff zu Werkzeugen (selbst denen der Kunst) liefernden Natur sein kann: und nur dann und darum wird ein solches Produkt, als organisiertes und sich *selbst organisierendes Wesen* [Hervorhebung: R.P.], ein Naturzweck genannt werden können«. ¹⁹

Der Ausdruck »Selbstorganisation« wird hier auf das Vermögen der Natur angewandt, scheinbar zweckgerichtet Ordnung (wie etwa Planetensysteme²⁰ oder Organismen) hervorzubringen. Kant vereinigt hier bestimmte Ideen Descartes' und Newtons in seiner Vorstellung, daß die Materie in sich ein Bestreben trägt »sich zu bilden«. So modern das

¹⁹ I. Kant, *Kritik der Urteilkraft*, 65, B 291 f.

²⁰ So versuchte Kant in seiner 1755 erschienenen Schrift »Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels, oder Versuch von der Verfassung und dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt« die Entstehung des Planetensystems durch einen Vorgang der Akkretion aus einem rotierenden chaotischen Urnebel abzuleiten (»Nebularhypothese«): Stöße zwischen den sich ungeordnet bewegenden Gas- und Staubeilchen im Verein mit der zwischen ihnen wirkenden Gravitationskraft führen zu lokalen Zusammenballungen unterschiedlicher Massengröße, woraus ein dynamisch ausbalanciertes Vielkörpersystem (eben das Planeten- oder Sonnensystem) mit der Sonne als Zentralkörper hervorgeht. Dieser Vorgang der Selbstordnung zahlloser Materiepartikel zu einem wohlgeordneten Gefüge weniger wechselwirkender Massen dient Kant als Paradigma für die unaufhörliche materielle Selbstorganisation des Universums nach mechanischen Prinzipien am Rande eines unendlichen Chaos. Der göttliche Schöpfungsakt konnte sich demnach auf die Erschaffung eines energiereichen Urnebels kleinster Teilchen und die Etablierung von Naturgesetzen der Bewegung und Wechselwirkung beschränken. Dabei wird »Chaos« - anders als in den modernen Selbstorganisationstheorien - von Kant als ein Grenzbegriff eingeführt, der den Weltzustand *vor* Beginn der Materieprozesse bezeichnet: »Kant denkt das Chaos als einen Grenzzustand, der freilich spekulativ vorauszusetzen ist, um den primären Bildungsprozeß der Materie von einem ihm Vorhergehenden abheben zu können. Die dynamischen Momente der Materie, nämlich Attraktion und Repulsion, beginnen unmittelbar *mit* der Materie den Prozeß der Körperproduktion« (H. Böhme und G. Böhme, *Das Andere der Vernunft - Zur Entwicklung von Rationalitätsstrukturen am Beispiel Kants*, Frankfurt a. M. 1985, S. 94).

obige Zitat klingen mag, so deutlich formuliert Kant selbst kurz darauf die entscheidende Differenz zu heutigen Selbstorganisationsauffassungen, wenn er »von der Natur und ihrem Vermögen in organisierten Produkten« als von einer »unerforschlichen Eigenschaft« spricht.²¹ Angesichts der seinerzeit geringen Möglichkeiten einer experimentellen und mathematischen Durchdringung komplexer dynamischer Prozesse mußte Kant sich damit bescheiden, die Selbstorganisation der Materie als unerforschliches Phänomen einzustufen. Demgegenüber stellt die Tatsache, daß *heute* Selbstorganisationsforschung mit den Mitteln des Experiments und der Mathematik möglich geworden ist, den vermutlich entscheidenden revolutionären Impuls dar. *Damals* freilich, zu Kants Zeiten, blieb es in Ermangelung eines empirischen Zugriffs zwangsläufig bei einer rein philosophisch-spekulativen Betrachtungsweise der Selbstorganisationsproblematik.

Nach Kant war es vor allem Schelling, der der Selbstorganisationsidee umfangreiche naturphilosophische Betrachtungen gewidmet hat. In seinen Schriften um 1800 entwickelt er eine »spekulative Physik«, deren Hauptthema die »ursprüngliche Produktivität« der Natur ist, die als fortschreitender »Potenzierungsprozeß« begriffen wird.²² Er greift Kants Evolutionsidee auf und stellt sie in den Dienst einer Dynamisierung der Natur: der natürliche Entwicklungsprozeß durchläuft Schelling zufolge eine Reihe von Objektivationsstufen, denen etwas Nichtobjektives zugrundeliege, eben eine »ursprüngliche Produktivität«. Diese sei der Natur durchaus immanent und keinesfalls Ausdruck des Schöpferwillens eines extramundanen Weltarchitekten. Gleichwohl müsse die ursprüngliche Organisation der Natur, die allen ihren Vergegenständlichungen innewohne, als

²¹ I. Kant, *Kritik der Urteilskraft*, 65, B 293.

²² Die Ausführungen stützen sich, wo nicht auf Schellings Schriften selbst zurückgegriffen wurde, auf M.-L. Heuser-Keßler, *Die Produktivität der Natur. Schellings Naturphilosophie und das neue Paradigma der Selbstorganisation in den Naturwissenschaften*, Berlin 1986. Die Autorin geht m. E. allerdings zu unkritisch mit Schellings Gedanken zur Selbstorganisation um, insofern sie den idealistischen Kontext, aus dem heraus Schelling philosophiert, zu wenig berücksichtigt und daher zu Fehlurteilen kommt, wenn sie Schelling attestiert, daß er wesentliche Vorstellungen des »Autopoiese«-Konzepts von Maturana und Varela schlicht vorweggenommen habe. (Vergl. auch ihren Artikel »Wissenschaft und Metaphysik. Überlegungen zu einer allgemeinen Selbstorganisationstheorie«, in: W. Krohn und G. Küppers [Hg.], *Selbstorganisation - Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*, Braunschweig/Wiesbaden 1990, S. 39 ff.)

nichtmaterieller Prozeß oder als quasi geistiges Strukturierungsprinzip vorgestellt werden, da sie eine unteilbare Aktivität darstelle. Speziell die organischen Produkte dieser kreativen Aktivität, die Lebewesen, zeichneten sich durch eine wechselseitige Bestimmtheit ihrer Teile, also durch eine zyklische Kausalstruktur aus, die ihre Autonomie als Ganzheiten garantiere und die Annahme besonderer Lebenskräfte (wie bei den Vitalisten) unnötig mache. Insofern lebende Systeme aber offen seien, könnten auch äußere (heteronome) Einflüsse auf sie einwirken (i. S. einer »indirekten Wirkung«): »Kurz: *der Organismus* (als Ganzes genommen) *muß sich selbst das Medium seyn, wodurch äußere Einflüsse auf ihn wirken*«²³. Derartige Formulierungen erinnern entfernt an das moderne autopoietische Prinzip zyklischer Prozeßorganisation, das konstruktive externe Einwirkungen nurmehr über eigensystemische Selbstselektionen zuläßt.

Schellings Begriff der Selbstorganisation geht über den Kants hinaus, insofern er die Bildung von »Zyklen« (z. B. Wirbeln) - sowohl in lebenden als auch in physikalischen Systemen - aus einem Zusammenspiel von Produktion (»natura naturans«) und Hemmung (»natura naturata«) zu verstehen versucht: so erklärt er etwa die hydrodynamische Entstehung von Wasserwirbeln aus dem Ineinandergreifen von Fließaktivität und Fließwiderständen. Bei der Organisation von Lebewesen müsse allerdings noch ein »wollender Bezug auf sich selbst«, eine Art Selbsterhaltungstreben, hinzukommen, der rein physikalischen Strukturbildungen abgehe; insofern rangiere das Leben auf einer höheren Evolutionsstufe als die unbelebte Materie. Wenn Schelling betont, daß das Biologische nicht auf das Physikalische reduziert werden könne (so wenig wie umgekehrt), dann vertritt er damit eine emergenztheoretische Position. Dem Leben komme ein irreduzibles Vermögen der Individuierung zu, worin seine produktive Freiheit von rein mechanischer Kontinuität bestehe: die organische Natur sei mithin zu spontaner Strukturbildung befähigt. Gleichwohl bindet Schelling die evolutionäre Potenz der lebendigen Natur zu diskontinuierlicher Gestaltproduktion an ein Vervollkommnungsprinzip oder Prinzip der Höherentwicklung, das auf zunehmende »Subjektobjektivierung« ziele und Freiheit (Indeterminiertheit) mit Notwendigkeit (Gesetzmäßigkeit) vermittele. Damit verbleibt Schelling im Rahmen

²³ F. W. J. Schelling, *Sämtliche Werke*, hg. von K. F. A. Schelling, Stuttgart 1856-1861, Bd. III, S. 83 f.

damaliger subjektphilosophischer Diskussionen. Ähnlich wie Hegel²⁴ und verschiedene romantische Naturphilosophen lehnt Schelling den Gedanken der »Realdeszendenz« ab: die Entwicklung aller Naturformen verdankt sich einer »Idealgenese« aus Ideen, auch wenn diese als dem Naturprozeß immanent gelten. Dennoch liefert Schelling zweifellos einen interessanten und eigensinnigen Versuch, die Subjekt- und Freiheitsproblematik mit naturphilosophischen Überlegungen so zu verknüpfen, daß Freiheit als *reale* Freiheit in der Produktivität der Natur fundiert wird, und insofern über rein transzendentalphilosophische Ansätze (Kant, Fichte²⁵) hinauszugehen. Andererseits ist modernen Selbstorganisations-theorien Schellings Insistieren auf einen Prozeß der »Urzeugung« bzw. auf die Existenz eines immateriellen »absolut Produzierenden« sowie eines Strebens nach Vollkommenheit fremd.

Der Durchgang durch die Philosophiegeschichte soll hier abgebrochen werden. Als Resümee kann festgehalten werden, daß Selbstorganisation zwar ein altes philosophisches Thema ist, in ihrer philosophischen Behandlung jedoch im Spekultativen verbleibt und keinen Anschluß an die empirischen Naturwissenschaften zu finden vermag, die eher einem positivistischen Muster folgen. Die Frage ist nunmehr, warum es auch den

²⁴ Hegel führt die Entwicklung der belebten Natur auf das dialektische Zusammenwirken einer Progression von Begriffen mit den »Umständen und Bedingungen der elementaren Natur« zurück (»System der Philosophie. 2. Teil. Die Naturphilosophie«, in: G. W. F. Hegel, *Sämtliche Werke*, Bd. 9, Stuttgart, 3. Aufl., 1958, § 370, Zusatz, S. 675). Hegel bestreitet die mechanistische Vorstellung von einer homogenen Natur, in der alle Unterschiede nur scheinbare sind, und konstruiert einen hierarchischen Aufbau, innerhalb dessen jede Entwicklungsstufe des zu sich selbst kommenden »Weltgeistes« auf der jeweils vorhergehenden gründet.

²⁵ Fichte denkt Selbstorganisation in seinem transzendentalphilosophischen Rahmen als ursprüngliche Selbstkonstitution des Ichs: vermittelt »intellektueller Anschauung«, die hinter die Subjekt-Objekt-Trennung zurückgeht, könne die ursprüngliche Handlung, die in der Gegenübersetzung von Ich und Nicht-Ich besteht, erfahren werden. Wie für Fichte das Sichselbstsetzen des Ichs, so ist für Schelling die Selbstorganisation der Natur nur auf gleichsam mystischem Wege anschaulich. Dabei wird die *reale* Selbstorganisation der Natur bei Schelling nach dem Fichteschen Muster einer transzendentalen Selbstsetzung des »absoluten Ichs« vorgestellt. Schelling strebt insofern eine quasi physikalische Interpretation des subjektiven Idealismus von Fichte zwar an, verbleibt aber letztlich wie dieser innerhalb der Möglichkeiten quasi mystischer Intuition. Dadurch aber kann seine Philosophie empirisch-physikalische Untersuchungen konkreter Selbstorganisationsphänomene gerade nicht anleiten.

Naturwissenschaften bis in unser Jahrhundert hinein nicht gelang, Selbstorganisation zu einem seriösen und profitablen Untersuchungsgegenstand zu machen.

2 Naturwissenschaftlicher Vorlauf

2.1 Die Vorherrschaft des mechanistischen Denkens

Vereinzelte Ansätze zu einem »Denken der Selbstorganisation« lassen sich in den Naturwissenschaften des 18., 19. und frühen 20. Jahrhunderts durchaus finden. Gegenüber dem seit dem späten 17. Jahrhundert dominanten mechanistischen Denken führten sie freilich stets nur ein Rand- und Schattendasein. Die Gründe hierfür sind verschiedener Art: Nicht nur mangelte es an geeigneten mathematischen und experimentellen Methoden einer adäquaten Behandlung von Selbstorganisationsphänomenen, auch die natur- und wissenschaftsphilosophischen Anschauungen verhinderten damals ein ernsthaftes Studium derartiger Erscheinungen. Unter dem Banne des Newtonischen Paradigmas und der offensichtlich enormen Erklärungskraft mechanistischer Modelle hatten gelegentliche Versuche, komplexe Naturvorgänge auf *nicht*-lineare Weise anzugehen, so gut wie keine Chance. Die Ideen eines strengen Determinismus (gleiche Ursachen haben stets gleiche Wirkungen zur Folge), der Reproduzierbarkeit experimenteller Ergebnisse unter kontrollierbaren Randbedingungen (auftretende empirische Abweichungen von den prognostizierten Resultaten betrachtete man als Störungen, die sich mithilfe geeigneter Rechenmethoden »weglinearisieren« lassen würden), der Idealisierbarkeit von Experimenten²⁶ (die dem gleichen Zweck der theoretischen Bereinigung experimenteller »Schmutzeffekte« dient) und der Reduzierbarkeit komplexer Zusammenhänge auf einfache Elemente und Bewegungsabläufe bestimmten das Weltverständnis der damaligen Naturforschung.

²⁶ »Das untersuchte Phänomen muß präpariert und isoliert werden, bis es einer *idealen Situation* nahekommt, die zwar physikalisch unerreichbar sein mag, aber dem angenommenen begrifflichen Schema entspricht«, heißt es bei I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 47.

Das Irreguläre, Gesetzlose und undurchschaubar Komplexe werden als störende Größen ausgeblendet, denn Ausgangspunkt der klassischen Mechanik ist Newtons Idee einer »idealen Maschine, wo die Bewegung ohne Stoß und Reibung zwischen den Teilen, die einander dennoch berühren, übertragen wird.«²⁷ Ohne externe Störungen arbeitet eine solche Maschine völlig im Gleichgewicht, streng determiniert und reversibel (insofern die Umkehr der Bewegungsrichtung äquivalent der Umkehr der Zeitrichtung ist²⁸). Ausgehend von Begriffen wie Position und Geschwindigkeit wird die Welt auf Trajektorien²⁹ oder Raum-Zeit-Linien von Teilchen reduziert; Bewegungsimpulse (die zu Beschleunigung oder Verlangsamung führen) kommen stets von außen. Eine Theorie der Selbstorganisation kann unter diesen Voraussetzungen nicht formuliert werden. Dem mechanistischen Denken entspricht eine objektivistische Einstellung des experimentierenden Forschers: »Die Natur wird durch das Experimentieren wie in einem Gerichtsverfahren im Namen postulierter Prinzipien einem Kreuzverhör unterzogen. Die Antworten der Natur werden mit größter Genauigkeit aufgezeichnet, doch wird deren Relevanz anhand der hypothetischen Idealisierung beurteilt, von der das Experiment sich leiten läßt. Was darüber hinausgeht, ist leeres Geschwätz, sind vernachlässigbare nebensächliche Effekte.«³⁰

Das Interesse der klassischen Mechanik gilt nicht der Komplexität, ihrer inneren Struktur und Dynamik, sondern der Rückführung des Komplexen auf einfache universelle Naturgesetze in Form einfacher Bewegungsgleichungen. Der darin zum Ausdruck kommende Reduktionismus als Forschungsprinzip findet bereits 1637 bei Descartes seine gültige Formulierung:

²⁷ Ebenda, S. 70.

²⁸ Beispielsweise könnten alle Bewegungen der Gestirne im Sonnensystem auch in entgegengesetzter Richtung ablaufen; eine ausgezeichnete Zeitrichtung wird erstmals im 19. Jahrhundert mit dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik eingeführt werden.

²⁹ Trajektorien oder Bewegungsbahnen werden mit Hilfe der Integration von Differentialgleichungen berechnet: kennen wir den augenblicklichen Bewegungszustand eines Teilchens, so können wir aus ihm unter Verwendung der allgemeinen Bewegungsgesetze seine vergangene bzw. zukünftige Bahn und damit alle seine möglichen Zustände - Störungsfreiheit vorausgesetzt - in der Zeit ableiten.

³⁰ I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 48.

»Wenn ein Problem so komplex ist, als du es nicht auf einmal lösen kannst, so zerlege es in so viele Unterprobleme, die dann entsprechend klein sind, daß du jedes dieser Unterprobleme für sich lösen kannst.«³¹

Das Prinzip des Reduktionismus hat sich zweifellos in Wissenschaften wie der Physik, der Chemie und der Biologie außerordentlich bewährt. Der Untersuchungsgegenstand (etwa eine chemische Reaktion) wird zunächst aus dem natürlichen Netzwerk seiner Interaktionen isoliert, um sodann sein Verhalten unter kontrollierten Bedingungen beobachten zu können. Dazu werden sämtliche Bedingungen konstant gehalten, mit Ausnahme der systematischen Änderung eines bzw. einiger weniger Parameter, deren Einfluß auf das Untersuchungsobjekt geprüft werden soll. Da so die genaue Kenntnis der Ausgangsbedingungen vorausgesetzt wird, gilt auch das Ergebnis der Beobachtungen - unter Kenntnis der Naturgesetze - als exakt voraussagbar. Daß die Natur komplex sein mag, jedoch von einfachen Gesetzen regiert wird und daher zerlegbar ist, diese Vorstellung dominiert auch heute noch weithin unser Naturverständnis.³²

Statt nach der individuellen Lösung für das dynamische Verhalten eines bestimmten Prozesses wird nach einem allgemeinen Gesetz gesucht, das eine große Klasse von Prozessen beschreibt. Bei einer derartigen Aufgabenstellung der Wissenschaft erstaunt es nicht, daß z. B. ein Phänomen wie das der Turbulenz zunächst nicht als spezielles Forschungsproblem erkannt werden konnte: nicht die verwickelte Struktur turbulenter Prozesse, ihre Genesis und Entwicklung, galt es aufzuklären, sondern die grundlegenden

³¹ R. Descartes, *Abhandlungen über die Methode des richtigen Vernunftgebrauchs und der wissenschaftlichen Wahrheitsforschung*, (Reclams Universalbibliothek) Stuttgart 1962, S. 26.

³² Wir sollten »uns vergegenwärtigen, daß die Physik sich nicht mit den komplexen Strukturen und Prozessen der realen Welt befaßt, sondern ausschließlich mit den Regelmäßigkeiten in den Prozessen. Bildungsgesetze, Algorithmen, Symmetrien allein können für sich in Anspruch nehmen, (möglicherweise) einfach zu sein, nicht dagegen die komplexen Erscheinungsformen in der realen Welt« betont M. Eigen in: »Biologische Selbstorganisation: Eine Abfolge von Phasensprüngen«, in: K. Hierholzer und H.-G. Wittmann (Hg.), *Phasensprünge und Stetigkeit in der natürlichen und kulturellen Welt*, Stuttgart 1988, S. 115.

Gesetze der Hydrodynamik zu definieren. Krohn und Küppers kommentieren kritisch: »Selbst wenn es gelungen ist, die Bewegung von Flüssigkeiten in der Form allgemeiner Gesetze zu erfassen, dann liefern diese Gesetze zunächst keine Anhaltspunkte für das dynamische Verhalten der durch das Gesetz bestimmten Prozesse. Man sieht z. B. den Grundgleichungen der Hydrodynamik die Turbulenz nicht an. Allgemeine Gesetze in der Physik wie die Newtonschen beschreiben den Mechanismus der Veränderung - eine Kraft verursacht eine Beschleunigung -, aber nicht den Ablauf eines konkreten Prozesses - die individuelle Bahn eines Massenpunktes.«³³ Das Irreguläre, Chaotische an der Bewegung von Flüssigkeitsteilchen innerhalb turbulenter Strömungen kann gar nicht erst als forschungswürdiges Problem in den Blick kommen, wenn man sich ausschließlich für Differentialgleichungen interessiert, die bei vollständiger Kenntnis der Anfangsbedingungen (ein rein empirisches Problem) im Prinzip vollständig lösbar sind.

Die Welt als ganze erscheint somit aus mechanistischer Sicht als wohlgeordnet, da als durchgängig von universellen Naturgesetzen beherrscht. Alle Naturprozesse unterliegen einer inneren Gleichförmigkeit und Regelmäßigkeit. Die Natur wird als stabil, unveränderlich oder zyklisch betrachtet - gleich einem präzise arbeitenden Uhrwerk, in dem das Quantum der Bewegung (der Energie) sich stets gleich bleibt. Dafür, daß in der Welt nichts wirklich Neues und Überraschendes sich ereignen kann, steht symbolisch der »Laplacesche Dämon«: Der französische Mathematiker und Astronom P. S. de Laplace (1749-1827), wie Kant ein Vertreter der Nebularhypothese, hatte Ende des 18. Jahrhunderts die Fiktion eines Dämons entworfen, dem er die Fähigkeit zuschrieb, in einem bestimmten Augenblick die Lage und Geschwindigkeit aller Massen, aus denen das Universum besteht, beobachten und daraus die gesamte zukünftige und vergangene Entwicklung des Universums im Prinzip exakt ableiten zu können. Allein die Kenntnis der universellen Bewegungsgesetze und der momentanen Bewegungszustände aller Massenpunkte reiche ihm für eine vollständige Berechnung des Weltenlaufs. Zufallsereignisse und offene Entwicklungslinien kann es für einen solchen Dämon nicht geben; er rückt dadurch gewissermaßen an die im

³³ W. Krohn und G. Küppers, »Rekursives Durcheinander. Wissenschaftsphilosophische Überlegungen«, in: *Kursbuch*, H. 98, 1989, S. 72.

Weltenprozeß freigewordene Stelle eines alles (voraus)sehenden Gottes, ohne freilich noch eine aktive Rolle darin zu spielen.

2.2 Theologisches Zwischenspiel

Diese Grundvorstellungen der neuzeitlichen Wissenschaft haben auch auf das theologische Denken Einfluß geübt, das seinerseits wiederum das neue Wissenschaftsverständnis stützte. So haben die Physikotheologen des 18. Jahrhunderts den Gedanken einer »natürlichen« Theologie vertreten, demzufolge das Universum zwar einen biblisch verbürgten Anfang (im göttlichen Schöpfungsakt) und ein heilsgeschichtlich prophezeites Ende (die Apokalypse) besitzt, dazwischen aber keinerlei Geschichte im Sinne eines qualitativen Wandels aufweist. Die einmal ihm von Gott verliehenen Eigenschaften gelten als unveränderlich. Aus physikotheologischer Sicht verfügt das Weltganze über eine wohlgeordnete »oeconomia naturae«, erscheint die Natur als ein reines und unverdorbenes Produkt des göttlichen Schöpferwillens, das in sich selbst - sich selbst überlassen - jene Stabilität besitzt, die auch ein Attribut der Vollkommenheit Gottes ist.

Diese Konzeption ist dem älteren theologischen Modell einer »natura lapsa« in den wesentlichen Zügen diametral entgegengesetzt. »Nach diesem Modell einer gefallenen Natur konnte die Natur keinen stabilen, harmonischen Kosmos bilden, sondern sie war eine Ruine, von der Sintflut verwüstet, von rebellischen und böartigen Geschöpfen bewohnt, die dem Menschen Widerstand leisteten und ihn permanent an seine Schuld erinnern sollten.«³⁴ Die Welt erscheint nach dieser Anschauung als ein chaotisches Geschehen, dem nur mit Mühe und nur auf Zeit eine gewisse Ordnung abzurufen ist, indem man alle verfügbaren Kräfte des Guten gegen die stets gegenwärtigen Mächte des Bösen und Zersetzenden mobilisiert: so wie Gott die permanent vom Verfall bedrohte Natur ständig nachregulieren müsse, so unabdingbar sei die zentrale Kontrolle durch einen vernünftigen

³⁴ R. P. Sieferle, *Die Krise der menschlichen Natur. Zur Geschichte eines Konzepts*, Frankfurt a. M. 1989, S. 17; hier findet sich auch eine instruktive Kontrastierung der beiden Modelle (S. 15 ff.).

Herrscher für das Funktionieren des Gemeinwesens; Absolutismus und merkantilistische Wirtschaftspolitik finden hier ihre Legitimation.

Demgegenüber ist die Natur im Weltbild der Physikotheologen durch innere Harmonie, Gleichförmigkeit und Regularität gekennzeichnet: deshalb macht es hier auch Sinn, nach universellen Gesetzen zu suchen, die das Weltganze durchgängig bestimmen und Chaos allenfalls am Rande zulassen. »Nach diesem Konzept ist der Wandel nur eine Schwankung, während über längere Sicht nichts qualitativ Neuartiges geschieht. Veränderung, Fortschritt oder Niedergang sind nur Täuschungen, die dadurch entstehen können, daß man lediglich einen kleinen Ausschnitt aus dem umfassenden Geschehen sieht.«³⁵ Die Welt ist auf Dauer angelegt und kann nur durch einen gewaltsamen Akt Gottes vernichtet werden. In sich selbst gleicht sie einer perfekt funktionierenden Maschine, um deren Wohlergehen sich der Schöpfer nicht weiter zu kümmern braucht. Sie bedarf nicht der göttlichen Kontrolle, insofern sie sich im Falle lokal auftretender Störungen aufgrund ihrer globalen Harmonie stets spontan selbstreguliert. So wenig wie physikalische und biologische Fluktuationen ins Chaos führten, so wenig könne das unreglementierte Handeln von menschlichen Individuen heillose Unordnung stiften. Dies ist gemeint, wenn der Nationalökonom Adam Smith (1723-1790) im 18. Jahrhundert von der »invisible hand« spricht, die das nur augenscheinliche Chaos des Marktgeschehens ordnend durchwaltet: im Wettbewerb des Marktes verhalten sich die Wirtschaftssubjekte so, *als ob* sie das Gemeinwohl zum Ziele hätten, obgleich sie doch egoistischen Zielen folgen. Griffing formulierte damals Edmund Burke: »Die Gesetze des Handels sind die Gesetze der Natur und folglich die Gesetze Gottes.«³⁶

Mit der Physikotheologie gut verbinden ließ sich auch eine mechanistisch konzipierte Naturforschung, die die Suche nach universellen Gesetzen zu ihrem Programm machte, und entsprechend eine auf Naturbeherrschung ausgerichtete Technik. »Das Bild von der Welt als Uhrwerk verweist auf Gott den Uhrmacher, den rationalen Beherrscher einer roboterhaften Natur. In den Anfängen der modernen Wissenschaft ist an zahlreichen Metaphern und Einschätzungen der Wissenschaft und ihrer Ziele und Mittel zu erkennen,

³⁵ Ebenda, S. 25.

³⁶ E. Burke, »Thoughts and Details on Scarcity«, in: *Works*, Bd. 5, London 1795, S. 100; zitiert nach R.P. Sieferle (1989), *Die Krise der menschlichen Natur*, a. a. O., S. 32.

daß sich zwischen dem theologischen Diskurs und der experimentellen Aktivität in Theorie und Messung eine ›Resonanz‹, ein Gleichklang hergestellt hat - eine Resonanz, die ohne Zweifel dazu beigetragen hat, die Behauptung der Wissenschaftler zu verstärken und zu bekräftigen, sie seien im Begriff, das Geheimnis der ›Weltmaschine‹ zu entdecken.«³⁷ Vor dem Auftreten des Darwinismus im 19. Jahrhundert, der die Entwicklung völlig neuer Lebensformen lehrte, war die Idee einer unveränderlichen, im ganzen gleichgewichtigen und gesetzmäßig selbstregulierten Natur keiner ernsthaften Bedrohung ausgesetzt. An diesem Beispiel kann man sich vor Augen führen, wie sehr die Stabilität bestimmter wissenschaftlicher Überzeugungen (des Mechanismus) abhängig ist von der Verbreitung dazu analoger (›resonierender‹) Weltbild-Vorstellungen in anderen gesellschaftlichen Bereichen: Religion, Politik, Wirtschaft usw.

2.3 Irreversibilität und Unvorhersagbarkeit

Auch das 19. Jahrhundert, in dem immerhin die darwinistische Evolutionstheorie und die klassische Thermodynamik entwickelt wurden, war noch durchgängig von der Vorherrschaft des Ordnungsdenkens geprägt: Stabilität, Determinismus, Reduktionismus bildeten nach wie vor die Eckpfeiler der naturwissenschaftlichen Forschung.³⁸ »Unordentliche« Phänomene wie Ungleichgewicht und Irregularität (Chaos) galten nicht als würdige Untersuchungsgegenstände wissenschaftlicher Erkenntnis. Folglich schieden chaotische Prozesse als Quellen der Ordnungsbildung aus: geordnete Strukturen vermochte man sich ausschließlich als aus geordneten (erkennbaren Regeln folgenden) Prozessen hervorgegangen vorzustellen. Die Selbstordnung von Materie aus unregelmäßigen Vorgängen (chaotischen Molekülbewegungen) mußte aus mechanistischer Sicht miraculös anmuten.

³⁷ I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 53.

³⁸ Trotz gelegentlicher »holistischer« Vorstöße der romantischen Naturforschung, etwa bei L. Oken, H. Steffens, J. W. Ritter, C. G. Carus, I. P. V. Troxler. (Vergleiche dazu D. von Engelhardt, »Philosophie der Natur und romantische Naturforschung. Wissenschaftsentwicklung zwischen Naturevolution und Kulturgeschichte«, in W. Krohn und G. Küppers [Hg.], *Selbstorganisation - Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*, a. a. O., S. 19 ff.)

Was fehlte, war mindestens zweierlei: die Vorstellung, Prozesse spontaner Selbstorganisation als Resultat *rekursiver Wechselwirkungen* zwischen Materiepartikeln zu sehen, und die Möglichkeit, solche rekursiven Prozesse mathematisch zu behandeln. Dessen ungeachtet feierte die mechanistische Weltauffassung weitere Triumphe in Theorie und Praxis.

Im Jahre 1834 hatte der Mathematiker und Astronom W. R. Hamilton (1805-1865) die »Kräftefunktion« (»Hamiltonsches Prinzip«) in die Dynamik konservativer Systeme eingeführt, die dann durch C. F. Gauß (1777-1855) als »Potential« allgemeine Verbreitung fand: die »Hamilton-Funktion«, eine Lösung der »Hamilton-Jacobischen Differentialgleichung«, bestimmt die Summe der potentiellen und kinetischen Energie eines mechanisch-dynamischen Systems, die nicht mehr durch Ort und Geschwindigkeit, sondern durch die sogenannten »kanonischen Variablen«, die Koordinaten und Impulse, ausgedrückt werden. Dadurch gelang Hamilton eine elegante Verallgemeinerung der dynamischen Grundgleichungen Newtons, die später auch auf die Theorie der Elektrizität und des Magnetismus ausgedehnt werden konnte. Hamiltons kanonische Gleichungen sind wie Newtons Bewegungsgesetze *reversibel*, da sie »integrable Systeme« »freier« Teilchen beschreiben: in der Darstellung solcher Systeme aber sind die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen »eliminiert« oder »wegtransformiert«, insofern die Systeme als Mengen von Einheiten erscheinen, die sich jeweils isoliert ändern. »Man hat geglaubt, die integrablen Systeme, die man auf freie Teilchen reduzieren kann, seien der Prototyp des dynamischen Systems. Generationen von Physikern und Mathematikern haben sich sehr bemüht, die »richtigen« Variablen zu finden, welche die Wechselwirkungen eliminieren würden.«³⁹ Mit der Ausschaltung derartiger Wechselwirkungen wurde zugleich der Blick von irregulären bzw. indeterminierten Phänomenen abgelenkt.

Dabei gab es schon damals durchaus Hinweise auf »Grenzfälle«, in denen Trajektorien an bestimmten »singulären Punkten« ein seltsam unberechenbares Verhalten zeigen: Prigogine und Stengers führen das Beispiel eines starren Pendels an, bei dem eine infinitesimale Störung (ein winziger Anstoß) ausreicht, um es entweder in Schwingung oder Rotation zu versetzen: welche der beiden Verhaltensmöglichkeiten es wählt, ist aber

³⁹ I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 79.

völlig unvorhersehbar.⁴⁰ Es war der englische Physiker J. C. Maxwell (1831-1879), der damals auf die Bedeutung solcher singulärer Punkte hingewiesen und damit die für die moderne Selbstorganisationstheorie wichtige Idee fluktuationsabhängiger Bifurkationen gewissermaßen antizipiert hat:

»In allen derartigen Fällen gibt es einen gemeinsamen Umstand: Das System besitzt eine Quantität an potentieller Energie, die in Bewegung verwandelt werden kann, aber erst, wenn das System eine gewisse Konfiguration erreicht hat, die zu erreichen einen Arbeitsaufwand erfordert, der in einigen Fällen infinitesimal gering sein kann und im allgemeinen in keinem Verhältnis zu der Energie steht, die auf diese Weise freigesetzt wird. Beispiele sind der Felsblock, der durch den Frost gelockert wurde und auf einem singulären Punkt des Bergabhanges in der Schwebe hängt, der kleine Funken, der den großen Wald in Brand setzt, die kleine Äußerung, die die Welt in den Krieg stürzt, der kleine Skrupel, der einen Mann davon abhält, seinen Willen auszuführen, die kleine Spore, die all die Kartoffeln verderben läßt, die kleine Gemmula, die aus uns Philosophen oder Idioten macht. Von einem bestimmten Niveau ab hat jede Existenz ihre singulären Punkte; je höher das Niveau, umso zahlreicher sind sie. An diesen Punkten können Einflüsse, deren physische Stärke zu geringfügig ist, als daß ein endliches Wesen sie erfassen könnte, Resultate von der größten Bedeutung hervorrufen.«⁴¹

Offenbar sind die Anfangsbedingungen, von denen das dynamische Verhalten eines Systems ausgeht, in vielen Fällen nicht hinreichend bestimmbar. Maxwells Ansatz wurde indes nicht weiterverfolgt, »weil es an geeigneten mathematischen Verfahren fehlte, um Systeme mit derartigen singulären Punkten zu identifizieren, und weil noch nicht die chemischen und biologischen Kenntnisse zur Verfügung standen, die es uns ... heute gestatten, die wirkliche Rolle, die diese singulären Punkte spielen, klarer zu erfassen«.⁴²

⁴⁰ Ebenda, S. 79 f.

⁴¹ J. C. Maxwell, *Science and Free Will*, zitiert aus: I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 80.

⁴² I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 80.

Erst recht nicht erwies sich die Voraussage künftigen Verhaltens in solchen Fällen als möglich, wo die Trajektorien der Teilchen von den Wechselwirkungen zwischen ihnen abhängig sind: also in Vielkörpersystemen, deren Massen sich gegenseitig anziehen (wir werden weiter unten auf diesen Fall zurückkommen), oder in großen Teilchenpopulationen, die thermodynamischen Kräften unterworfen sind. Hier ist das irreguläre, ja chaotische Verhalten von Teilchen der Normalfall. Damit aber bricht die Grundlage der klassischen Mechanik, der »Dualismus von universellem Gesetz und Anfangsbedingung«, zusammen: »Wir können lediglich das durchschnittliche Verhalten von Bündeln von Trajektorien vorhersagen.«⁴³ Dennoch sollte die Leitvorstellung des Laplaceschen Dämons als Modell für das Universum erst nach vielen Schritten endgültig verabschiedet werden. Die Entwicklung der Thermodynamik im 19. Jahrhundert hat daran gewiß ihren Anteil, obgleich ihre wichtigsten Vertreter, wie wir gleich sehen werden, nie die Hoffnung aufgaben, die Thermodynamik einst mit den Grundannahmen der Newtonischen Physik versöhnen zu können.

Insbesondere die Vorgeschichte der heutigen Chaosforschung, des vielleicht wichtigsten Teilbereichs der Selbstorganisationsforschung, zeigt, wie man sich damals immer wieder bemühte, Chaosphänomene zu neutralisieren oder zu marginalisieren, wenn nicht gar zu ignorieren. So wurden etwa die für die Entstehung von Turbulenzen typischen nicht-linearen Prozesse mit Ignoranz bedacht oder als »zu komplex« »für später aufgespart«. Die damaligen Forscher experimentierten, klassifizierten und theoretisierten in einer Weise, für die galt: »Wo Chaos beginnt, hört die klassische Wissenschaft auf.«⁴⁴ Diese Devise vertrug sich gut mit der im 19. Jahrhundert für abgeschlossene Materie-Energie-Systeme formulierten »klassischen Thermodynamik«⁴⁵, derzufolge zwar Ordnung in Unordnung über-

⁴³ Ebenda, S. 82.

⁴⁴ J. Gleick, *Chaos - die Ordnung des Universums*, München 1988, S. 10; dieses spannend und instruktiv zu lesende Buch hat viele der nachfolgenden Überlegungen inspiriert.

⁴⁵ Ausgangspunkt war die Formulierung des Wärmeleitungsgesetzes (1811) durch J.-J. Fourier, das - angewandt auf einen isolierten, inhomogen erwärmten Körper - die allmähliche Entstehung eines thermischen Gleichgewichts beschreibt. Nach Prigogine/-Stengers begann damit die »Erforschung des Wesens der Irreversibilität« und etablierte sich erstmals eine »Wissenschaft des Komplexen«, da der Prozeß der Wärmeleitung auf

gehen kann, aber nicht umgekehrt (Entropiesatz⁴⁶): Wärmedifferenzen in einem adiabatisch geschlossenen System streben nach Ausgleich, nicht nach Vergrößerung. Die Entropie - in populärwissenschaftlicher Sprechweise: ein Maß für die dabei entstehende Unordnung - kann auf dem Weg ins Gleichgewicht nur zunehmen und erreicht schließlich ihr Maximum. Zwar wird hier der Entstehung von Unordnung aus Ordnung Rechnung getragen, doch so, daß die Unordnung zugleich als Ausdruck von Gleichgewicht, d. h. als Resultat des »durchschnittlichen Verhaltens« sehr vieler mikroskopisch kleiner Teilchen interpretiert wird.

Die Entwicklung der klassischen Thermodynamik markiert aber insofern einen bedeutsamen Fortschritt, als hier im Unterschied zur mechanischen Beschreibung, in der alle Prozesse reversibel sind, erstmals die »Irreversibilität« oder zeitliche Nicht-Umkehrbarkeit von Prozessen, die eine große Population von Teilchen betreffen (z. B. die zahlreichen Moleküle in einem Gasvolumen), in die Betrachtung eingeführt wurde. Die von der Thermodynamik entwickelten Begriffe wie Temperatur und Dichte stellen Mittelwerte aus Bewegungen einer großen Anzahl von Molekülen dar. Entropie ist eine Folge irreversibler Prozesse, die ein von der Umgebung isoliertes System in einen Gleichgewichtszustand überführen. Dabei ist nach L. Boltzmann (1844-1906), einem österreichischen Physiker, die Entropiezunahme als fortschreitende Desorganisation zu deuten. Boltzmann versuchte mit den Mitteln der Wahrscheinlichkeitstheorie den Streit zwischen »Atomisten« (die newtonisch an der Prädominanz von Teilchen und ihren reversiblen Trajektorien festhielten) und »Energetikern« (für die Prozesse der Wärmeleitung und Energieumwandlung im Vordergrund standen) zu schlichten⁴⁷, indem er ein »Ordnungsprinzip« formulierte,

der Wechselwirkung einer sehr großen Anzahl von Teilchen beruht (*Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 112 f.).

⁴⁶ Seine erste gültige Formulierung fand dieser sogenannte »Zweite Hauptsatz der Thermodynamik« durch R. Clausius (1865), aufbauend auf Arbeiten von S. Carnot zum idealen Wirkungsgrad der Umwandlung von Wärme in Arbeit.

⁴⁷ »Wir stehen hier vor zwei grundlegend verschiedenen Beschreibungen: der Dynamik, die für die Welt der Bewegung gilt, und der Thermodynamik, der Wissenschaft von komplexen Systemen, denen eine Entwicklung zur Entropiezunahme eigen ist« (I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 130). Noch 1958 hat der Physiker Sir Arthur Eddington in seinem Buch *The Nature of the Physical World* zwischen »primären Gesetzen«, die das Verhalten einzelner Teilchen kontrollieren, und

demzufolge der wahrscheinlichste Zustand, den ein System erreichen kann, derjenige ist, in dem die Wirkungen aller im System ablaufenden Teilchenprozesse sich *statistisch ausgleichen*.

Dennoch entfernt sich Boltzmann sehr weit von Newton, insofern er die irreversible thermodynamische Änderung mit einer Änderung in Richtung auf Zustände von wachsender Wahrscheinlichkeit (Gleichgewichtszustände) begründet: »damit ist zum ersten Mal ein physikalischer Begriff mit Wahrscheinlichkeit erklärt worden.«⁴⁸ Was Boltzmann darüber hinaus für die Vorgeschichte der Selbstorganisation interessant macht, ist seine Idee eines »Fluktuationskosmos«: seine statistische Deutung der Entropie läßt es zu, daß im Universum, trotz einer allgemeinen Tendenz zum Wärmegleichgewicht, kleine Bereiche (etwa von der Größe unseres Sonnensystems) existieren, die sich anfangs - gegenüber ihrer Umgebung - in einem unwahrscheinlichen (relativ geordneten) Zustand befinden und erst verzögert dem Clausiusschen »Wärmetod« zustreben; das Universum weise nun überall derartige »Fluktuationen« (also Unregelmäßigkeiten im Prozeß seiner allgemeinen Desorganisation) auf. Damit skizziert Boltzmann ein im Prinzip *ungleichgewichtiges* Weltall, dessen Bild in der heutigen Vorstellung eines »fluktuierenden Kosmos« wiederkehrt.

Zurück zum Phänomen des entropieerzeugten Chaos: Mit einem aus entropischen Prozessen hervorgehenden »*thermischen* Chaos« vermochten die klassischen Physiker offenbar noch gut auszukommen: thermische Gleichgewichtssysteme sind makroskopisch homogen (von indifferenter Temperatur) bzw. »konservativ« strukturiert (Beispiel: Eiskristalle⁴⁹); Chaos tritt nur im mikroskopischen Bereich als regellose Molekularbewegung in

»sekundären Gesetzen«, die Gesamtheiten von Teilchen, also ihr kollektives Verhalten betreffen, unterscheiden.

⁴⁸ Ebenda, S. 133.

⁴⁹ »Bei tiefer Temperatur und dem Vorhandensein von Bindekräften können Strukturen auch bei der Annäherung an den Gleichgewichtszustand entstehen. Kristalle, Schneeflocken und biologische Membranen sind solche Gleichgewichtsstrukturen mit höherer Entropie als der flüssige Zustand, aus dem sie hervorgegangen sind« (E. Jantsch, *Die Selbstorganisation des Universums*, München 1979, S. 58). Man kann hier von *konservativer* Selbstorganisation sprechen, insofern die spontane Ausbildung von Ordnung mit der Einnahme eines *Gleichgewichtszustandes* einhergeht. Die Eigenschaften von

Erscheinung.⁵⁰ Und strukturloses Chaos gilt keineswegs als charakteristisch für den normalen Weltzustand, sondern bezeichnet allenfalls das Ende des Universums, seinen Untergang im »Wärmetod«.⁵¹

Mit der Orientierung auf Gleichgewicht und Entropie geriet die damalige Physik freilich in einen Widerstreit zur Biologie, speziell zur Darwinschen Evolutionstheorie, die eine quasi »neg-entropische« (E. Schrödinger) Zunahme an differentieller Komplexität lehrte. Offenbar gibt es in der belebten Natur - über das Wechselspiel von Variation und Selektion - eine Entwicklung hin zu immer komplexeren Strukturen und gerade nicht eine »desorganisierende« Bewegung hin zu wachsender Unordnung und endgültigem Gleichgewicht. Während in der klassischen Thermodynamik der Zeitvektor abwärts zeigt, in Richtung Strukturlosigkeit und Zufall, weist er in der Biologie Darwins nach oben, in Richtung zunehmender Strukturiertheit und funktionaler Zweckmäßigkeit. An den erst durch die moderne Theorie »dissipativer Strukturen« eröffneten Ausweg aus dem Dilemma, nämlich

Kristallen können aus der *lokal* wirksamen Reichweite der Anziehungs- und Abstoßungskräfte der Moleküle abgeleitet werden, während *dynamisch* selbstorganisierte Ordnungsmuster Ausdruck *globaler* Nichtgleichgewichtssituationen sind, wie die Theorie dissipativer Strukturen lehrt.

⁵⁰ 1827 entdeckte der schottische Botaniker Robert Brown (1773-1858) die nach ihm benannte »Brownsche Bewegung«, die das chaotische Verhalten von Molekülen demonstriert: kleine, in einer Flüssigkeit suspendierte Teilchen - etwa Staubpartikel - bewegen sich regellos hin und her, da sie - gemäß der mechanischen Wärmetheorie - den heftigen und unregelmäßigen Stößen der Flüssigkeitsmoleküle (Wärmebewegung) ausgesetzt sind. Je kleiner die suspendierten Teilchen sind, desto heftiger werden sie bewegt, da sie bei abnehmender Masse die Stöße immer weniger benachbarter Moleküle erfahren; in makroskopischen Größenordnungen verschwindet dieser Einfluß der Wärmebewegung; das Zusammenwirken einer großen Zahl sich irregulär bewegender Moleküle erlaubt nunmehr die Anwendung von statistischen Begriffen wie »mittlere Geschwindigkeit« und »mittlere Energie«. Die Wohlgeordnetheit der Natur ließ sich so mit Hilfe der »statistischen Mechanik« fürderhin behaupten.

⁵¹ Von dem *thermischen* Chaos des Gleichgewichts ist das »*turbulente* Chaos des Nichtgleichgewichts ... völlig verschieden« (I. Prigogine und I. Stengers, a. a. O., S. 170 f.): hier treten zusätzlich strukturbildende *makroskopische* Raum- und Zeitgrößen auf, die »dynamisch stabil« sind; diese offenbar für Leben charakteristischen Nichtgleichgewichtssysteme - mit ihrer Tendenz zu evolutionärer Komplexitätssteigerung - mußten damals als vollkommen enigmatisch erscheinen. Erst die Analyse dieses Systemtyps sollte die nicht-lineare Nichtgleichgewichts-Thermodynamik auf den Weg bringen und damit das Selbstorganisationskonzept der »Theorie dissipativer Strukturen« begründen.

eine »nicht-lineare Nichtgleichgewichts-Thermodynamik« zu entwickeln, derzufolge bei *offenen* Systemen die innere Erzeugung von Entropie und der Entropieexport nach außen einander die Waage halten, wodurch das System seine Ordnung unter Bedingungen hohen Ungleichgewichts aufrechtzuerhalten vermag, traute sich indes noch niemand heran.⁵² Lieber ignorierte man den Widerspruch oder sprach von »undurchschaubarer Komplexität«, die man schon noch in konventioneller Manier würde »linearisieren« können: oder man setzte vitalistisch auf das Wirken geheimnisvoller Kräfte, die für das Leben einen Sonderbereich reservierten, in dem das Entropiegesetz durch spezielle Lebenskräfte - etwa Bergsons »*élan vital*«⁵³ - außer Geltung gesetzt sein sollte.

»Doch nicht allein die belebte Natur ist den Modellen der Gleichgewichts-Thermodynamik grundsätzlich fremd. Die Hydrodynamik, die Wissenschaft von den Strömungen und Turbulenzen in Flüssigkeiten, und die Meteorologie beschreiben auch die unbelebte Natur als einen Schauplatz ständigen Fließens, so daß auch sie als aktiv und organisiert erscheint.«⁵⁴ So hatte man längst beobachtet, daß einfache, sogenannte »laminare Strömungsformen« in Fluiden bei zunehmender Fließgeschwindigkeit von chaotischen Wirbelbildungen abgelöst werden, die sich mit den Grundgleichungen der Hydrodynamik nicht mehr berechnen lassen. Was man brauchte, war ein Mechanismus, der die Bildung derartiger Wirbel verständlich machte und zugleich mit den bekannten Grundgleichungen übereinstimmte. Ein solcher Mechanismus, der klassischen Forderungen genügte, wurde erst in unserem Jahrhundert (1935) von dem sowjetischen Physiker L. D. Landau (1908-1968) entwickelt⁵⁵: in der »Landau-Darstellung« bilden sich Wirbel aus

⁵² Eine zumindest *lineare* Nichtgleichgewichts-Thermodynamik wurde von dem norwegisch-amerikanischen Physikochemiker L. Onsager (1903 - 1976) für gleichgewichtsnähe Systeme entwickelt; sie bildet gewissermaßen das Vorspiel zu Prigogines nicht-linearer Nichtgleichgewichts-Thermodynamik für gleichgewichtsferne Systeme.

⁵³ H. Bergson unterschied zwischen der Tendenz der unbelebten Materie zur Wiederholung und Dissipation von Energie sowie der Tendenz des »Lebens«, immer neue Formen geordneter Strukturen aus sich heraus zu emergieren. Damit postulierte er zwei grundverschiedene Ebenen der Wirklichkeit.

⁵⁴ I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 136.

⁵⁵ Siehe vor allem die Darstellung in: L. D. Landau und E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics*, Oxford 1959.

einer Überlagerung konkurrierender Rhythmen. Landau stellte sich vor, daß in einer sich beschleunigenden Strömung immer mehr Instabilitäten auftreten, die sich überlagern; zwar würden die sich darin bewegenden Partikel nicht unendlich viele »Freiheitsgrade« annehmen - was zu ihrer Beschreibung unendlich viele Gleichungen erfordern würde -, da die Bewegung jedes Teilchens in hohem Maße von der Bewegung ihrer jeweiligen Nachbarn abhängt. Dennoch erzeugt die Dynamik auch in Landaus Modell eine ungeheure Anzahl gekoppelter Moden unterschiedlicher Frequenz.⁵⁶ Immerhin: »Vom Konzept her schien diese orthodoxe Vorstellung von Turbulenz mit den Fakten übereinzustimmen, und wenn die Theorie vom mathematischen Standpunkt aus nutzlos war - was sie auch war -, so mochte sie das eben sein. Landaus Paradigma bot eine Möglichkeit, die Würde auch mit hilflos erhobenen Händen zu bewahren.«⁵⁷ Insofern jedenfalls ließ sich das Chaos der Turbulenz als im klassischen Sinne gebannt betrachten, als es eben zu einem überkomplexen Phänomen deklariert werden konnte, dessen detaillierte mathematische Beschreibung lediglich an dem dazu erforderlichen übergroßen Rechenaufwand scheiterte, nicht aber aus prinzipiellen Gründen. Die Schwierigkeiten ergeben sich in dieser Sicht aus der unüberschaubaren Komplexität der Wechselwirkungen zwischen zahlreichen Partikeln, sind also im wesentlichen rechentechnischer Natur.

Daß indes auch bereits einfache Systeme, die aus nur *wenigen* Komponenten bestehen, chaotisches - d. h. unvorhersagbares - Verhalten zeigen können, darauf hatte bereits der französische Mathematiker Henri Poincaré (1854-1912) kurz vor der Jahrhundertwende hingewiesen.⁵⁸ In seinen Arbeiten zur Himmelsmechanik und über nicht-lineare

⁵⁶ »Lange wurde die Turbulenz mit Unordnung, mit Rauschen gleichgesetzt. Heute wissen wir jedoch, daß das nicht der Fall ist. Auf der makroskopischen Ebene erscheint die turbulente Bewegung zwar als irregulär und chaotisch, doch ist sie auf der mikroskopischen Ebene im Gegenteil hochgradig organisiert. Die bei der Turbulenz auftretenden vielfältigen Raum- und Zeitebenen entsprechen einem kohärenten Verhalten von Millionen und Abermillionen Molekülen. So gesehen, ist der Übergang von der laminaren Strömung zur Turbulenz ein Prozeß der Selbstorganisation« (I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 150).

⁵⁷ J. Gleick, *Chaos*, a. a. O., S. 184.

⁵⁸ Solche Systeme sind in ihrem Verhalten komplex, in ihrer Struktur können sie hingegen durchaus einfach sein: dynamische Komplexität darf daher nicht mit Kompliziertheit der Organisation (Anzahl der vernetzten Komponenten) verwechselt werden.

Schwingungen hatte Poincaré den Nachweis erbracht, daß *kein* quantitatives Modell dynamischer Systeme, und sei es noch so präzise, die Vorhersage der Zukunft erlaube: solche Systeme reagieren auf kleinste Abweichungen in den Anfangsbedingungen und entwickeln sich auf unerwartbare (zufallsabhängige) Weise.

»Eine sehr kleine Ursache, die für uns unbemerkt bleibt, bewirkt einen beträchtlichen Effekt, den wir unbedingt bemerken müssen, und dann sagen wir, daß dieser Effekt vom Zufalle abhängt. Würden wir die Gesetze der Natur und den Zustand des Universums für einen gewissen Zeitpunkt genau kennen, so könnten wir den Zustand dieses Universums für irgendeinen späteren Zeitpunkt genau voraussagen. Aber selbst wenn die Naturgesetze für uns kein Geheimnis mehr enthielten, können wir doch den Anfangszustand immer nur *näherungsweise* kennen. Wenn wir dadurch in den Stand gesetzt werden, den späteren Zustand mit demselben *Näherungsgrade* vorauszusagen, so ist das alles, was man verlangen kann; wir sagen dann: die Erscheinung wurde vorausgesagt, sie wird durch Gesetze bestimmt. Aber so ist es nicht immer; es kann der Fall eintreten, daß kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen; ein kleiner Irrtum in der ersteren kann einen außerordentlich großen Irrtum für die letzteren nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich und wir haben eine >zufällige Erscheinung<«. ⁵⁹

Nach Poincaré lassen sich zwar Teilstücke einzelner Teilchenbahnen näherungsweise berechnen, doch könne nicht vermieden werden, daß sich die durch das Näherungsverfahren bedingten Abweichungen beliebig aufschaukeln, so daß bereits nach wenigen Rechnungsschritten die Zahlenwerte nichts mehr über die wirklichen Bahnen aussagen. In gewisser Weise hat Poincaré mit seinem Prinzip >kleine Ursachen - große Auswirkungen< den berühmten »Schmetterlingseffekt« von E. N. Lorenz, mit dem die moderne Chaosforschung sozusagen einsetzt, bereits vorweggenommen. ⁶⁰ Er geht damit weiter als J. C.

⁵⁹ H. Poincaré, *Wissenschaft und Methode* (Leipzig und Berlin 1914), Darmstadt 1973, S. 56 f.

⁶⁰ Siehe etwa E. N. Lorenz, »Deterministic Nonperiodic Flow«, in: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 1963, S. 130 ff. - Überdies wird Poincaré damit zu einem der

Maxwell (1831-1879), der Begründer der Theorie des elektromagnetischen Feldes, der das strenge (klassische) Kausalitätsprinzip (gleiche Ursachen haben gleiche Wirkungen) bereits zu einer Ähnlichkeitsrelation herabgemildert hatte:

»Es ist eine metaphysische Doktrin, daß gleiche Ursachen gleiche Wirkungen nach sich zögen. Niemand kann sie bestreiten. Ihr Nutzen aber ist eher gering in einer Welt wie dieser, in der gleiche Ursachen niemals wieder eintreten und nichts zum zweiten mal geschieht. Das daran anlehrende physikalische Axiom lautet: Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen. Dabei sind wir aber von Gleichheit übergegangen zu Ähnlichkeit, von absoluter Genauigkeit zu mehr oder weniger grober Annäherung«.⁶¹

Maxwell begründet sein Axiom mit der untilgbaren Meßungenauigkeit hinsichtlich der Anfangsbedingungen von Systemprozessen, vertraut aber immerhin noch auf den Nutzen von Näherungsverfahren. Demgegenüber verweist Poincaré auf Fälle, in denen nicht einmal näherungsweise richtige Voraussagen gemacht werden können; insofern radikalisiert er Maxwells Kritik am strengen Kausalitätsprinzip noch einmal: gleiche/ähnliche Ursachen können durchaus auch unähnliche Wirkungen nach sich ziehen. Poincarés Argumentation zielt auf die Gültigkeit des deterministischen Credo selbst. So legte er etwa dar, daß es keine vollständige Lösung des sogenannten »Dreikörperproblems« gibt: es sei nicht möglich, für einen bestimmten zukünftigen (oder vergangenen) Zeitpunkt die Position von drei Massenpunkten, die einer wechselseitigen Schwerkraftanziehung unterliegen, exakt anzugeben, da deren augenblickliche Position und Anfangsgeschwindigkeit, von denen die Berechnung auszugehen hat, nicht präzise bestimmt werden können. I. Ekeland resümiert: »Wir geben zu, daß man, wenn es gelänge, dieselben Ausgangsbedingungen *exakt* zu reproduzieren, *exakt* dieselbe Bewegung beobachten würde, d. h. zu denselben Zeitpunkten dieselben Konfigurationen. Was zur Diskussion

Väter der modernen Bifurkationstheorie: hat er doch nachgewiesen, daß das weitere Verhalten eines dynamischen Systems bei Erreichen einer Instabilitätsschwelle nicht mehr voraussagbar ist, insofern es damit an einen Verzweigungspunkt gelangt.

⁶¹ J. C. Maxwell, zitiert nach U. Decker und H. Thomas, in: *Bild der Wissenschaft* 1/1983, S. 65.

steht, ist vielmehr die Frage, ob es uns armen Sterblichen wirklich möglich ist, diese Relation herauszuarbeiten und sie vollständig und genau in berechenbare und also brauchbare Ausdrücke zu übersetzen.«⁶²

Ausgerechnet in dem wohlgeordneten makroskopischen Universum Newtons entdeckt Poincaré das Unberechenbare: und zwar keineswegs bloß in seinen Randzonen, sondern überall dort, wo Wechselwirkungen zwischen Massen stattfinden; also auch in der Himmelsmechanik, dem Lieblingsfeld der Mechanisten.⁶³ Freilich blieben die Arbeiten von Poincaré lange Zeit unbeachtet und wirkungslos. Solange man an der klassischen Mechanik als Modell für die gesamte Natur festhielt, glaubte man in Fällen, wo ähnliche Ursachen unterschiedliche Wirkungen zeitigten, entweder an noch unbekannte Mechanismen im Prozeßablauf oder an das Walten des Zufalls. Eine breitere Würdigung sollten Poincarés Ideen erst im Rahmen der modernen Chaosforschung erfahren.

⁶² I. Ekeland, *Das Vorhersehbare und das Unvorhersehbare*, München 1985, S. 50.

⁶³ »Auch unser Planetensystem ist ein chaotisches deterministisches System. ... Aber die große Masse der Sonne und die großen Abstände der Planeten voneinander, welche die Planeten sich gegenseitig nur äußerst schwach beeinflussen lassen, sorgen für seine Stabilität« (R. von Woldeck, »Formeln für das Tohuwabohu«, a. a. O., S. 16). Dennoch muß man damit rechnen, daß wegen der Wechselwirkungen zwischen den Planeten, mögen diese auch noch so gering sein (nach dem Prinzip: »kleine Ursachen - große Wirkungen«), z. B. künftige Sonnenfinsternisse nicht beliebig weit vorausgesagt werden können. Dies bestätigen neuere numerische Studien: So hat es »sich gezeigt, daß die Pluto-Bahn nur für etwa 20 Millionen Jahre vorauszuberechnen ist, und für die inneren Planeten haben numerische Rechnungen kürzlich Divergenzzeiten von fünf Millionen Jahren ergeben. ... Einmal mehr erweisen sich so chaotische Prozesse als entscheidend zum Verständnis von Naturphänomenen. Ihr Wirken im Bereich der Himmelsmechanik, die seit Isaac Newtons Ableitung des Gravitationsgesetzes als Paradebeispiel für die Berechenbarkeit der Natur gegolten hat, hätte noch vor zehn Jahren sicherlich niemand vermutet.« (G. Wolschin, »Kometenbahnen und Chaos«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, H. 9, 1990, S. 25)

2.4 Die Idee der Rekursion

Daß einfache deterministische Systeme (z. B. ein System zweier durch eine Feder verbundener schwingender Pendel) zeitweilig chaotisches Verhalten zeigen können, da sie auf kleine Abweichungen in den Anfangsbedingungen »sensibel« reagieren (mikroskopisch kleine Fluktuationen führen durch rekursive Selbstverstärkung - positive Rückkopplungen - zu makroskopisch wahrnehmbaren Irregularitäten), wurde erst zu einem wissenschaftlich diskutablen Fall, als Computer zur Verfügung standen, die es erlaubten, die dabei stattfindenden zahlreichen Rekursionen rechnerisch zu bewältigen. Gleichungen, die rekursive Prozesse beschreiben, lassen sich nämlich nicht analytisch, sondern nur numerisch lösen, was einen enormen Rechenaufwand mit sich bringt. Da dieser sinnvoll nur mittels automatisierter Rechenverfahren zu leisten ist⁶⁴, bildet der Einsatz von Digitalrechnern sozusagen die *technische Erfolgsbedingung* für die intensive wissenschaftliche Erforschung von Prozessen, die mit sich selber rückgekoppelt sind.

Hier konnte die vor nahezu hundert Jahren von dem deutschen Mathematiker David Hilbert (1862-1943) entwickelte »Theorie der rekursiven Funktionen« effektiv angewandt werden: Hilbert hatte damals einen Kalkül entworfen, der so arbeitet, daß das Resultat einer mathematischen Operation aufs neue zum Ausgangspunkt eben dieser Operation genommen wird und immer so fort, bis das Ergebnis stets denselben Wert (einen »Eigenwert«) liefert.⁶⁵ Mit rekursiven Gleichungen arbeitete auch Poincaré: Vielteilchensysteme, in denen alle Teilchen aufeinander wechselwirken, verlangen zu ihrer mathematischen Behandlung ein System rekursiver Funktionen, deren Lösung nur mit Papier und Bleistift aber eben nicht mehr zu leisten ist. Hier vermochte erst der Computer *technische* Abhilfe zu schaffen.⁶⁶

⁶⁴ R. Breuer führt in seinem Chaos-Artikel in *GEO* (H. 7, 1985, S. 44) den dänischen Astronom Elis Strömgren an, der um die Jahrhundertwende den Versuch unternommen hatte, die Bewegung eines Planeten im Gravitationsfeld zweier Sonnen per Hand zu berechnen: er beschäftigte dazu 57 Mitarbeiter vierzig Jahre lang! Dabei handelte es sich bei dem gewählten Beispiel noch um ein relativ einfaches Problem.

⁶⁵ Siehe dazu M. Davis, *Computability and Unsolvability*, New York 1958.

⁶⁶ Zu beachten in diesem Zusammenhang ist, daß nicht zuletzt die Entstehung der Kybernetik und der Theorie informationsverarbeitender Maschinen (z. B. der

Mit den letzten Bemerkungen sollte die Einsicht vorbereitet werden, daß freilich die technische Innovation des Computers allein den für die Begründung der Selbstorganisationstheorie erforderlichen Umdenkprozeß kaum hätte initiieren können. Es mußte noch etwas anderes hinzukommen: die *Idee der Rekursion*, d. h. die Erkenntnis, daß rekursive Prozesse *zentrale* Bedeutung für das Naturgeschehen besitzen, daß man also mit Hilfe rekursiver Gleichungssysteme wesentliche Aussagen über die Dynamik natürlicher Systeme gewinnen kann. Nun besitzt diese Idee zweifellos eine lange Vorgeschichte: es ist nicht so, daß rekursive (bzw. auch nicht-lineare) Prozesse unbemerkt geblieben wären, vielmehr wurde ihre Bedeutung unterschätzt und man wandte sich lieber solchen rekursionsfreien bzw. *linearen*⁶⁷ Prozessen zu, die man theoretisch und rechentechnisch analytisch

Turing-Maschine) seit den 1940er Jahren dieses Jahrhunderts, von denen die Computerentwicklung ja ausgeht, auf das Interesse an der Ausarbeitung der Theorie rekursiver Funktionen zurückgewirkt hat. Das Denken in kybernetischen Rückkopplungsschleifen und die Entwicklung einer Mathematik der Rekursionen traten sozusagen in »ko-evolutive« Wechselwirkung zueinander. So hatte zwar der französische Mathematiker G. Julia (1893-1978) bereits zwischen 1906 und 1920 mit Rekursionsformeln experimentiert und dabei Zahlenmengen (die sogenannten »Julia-Mengen«) entdeckt, bei denen sich jedes nachfolgende Element aus dem jeweils vorhergehenden errechnen läßt und ein »selbstähnliches« Strukturgesetz in der Anordnung der Elemente zutage trat; doch vermochte er sich noch keine detaillierte visuelle Vorstellung von diesen Objekten zu machen. Die Bedeutung dieser Entdeckung wurde erst evident, als B. Mandelbrot, der Begründer der »Fraktalgeometrie«, in den 1970er Jahren derartige Strukturen auf dem Computer graphisch erzeugen konnte. Auch die sogenannte »Mandelbrot-Menge« (eine Teilmenge der komplexen Zahlenebene) war bereits von G. Julia und P. Fatou (1878-1929) entdeckt worden. Genau genommen hat Mandelbrot »diesem Gedankengebäude keinen Stein in Form eines mathematischen Satzes hinzugefügt (das haben erst seine Nachfolger getan), sondern mit dem Computer die Menge, die jetzt seinen Namen trägt, erstmals sichtbar und damit für einen größeren Kreis von Nicht-Spezialisten überhaupt begreiflich gemacht« (Ch. Pöppe, »Hat Mandelbrot die Mandelbrot-Menge entdeckt?«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, H. 8, 1990, S. 39). Die Visualisierungskraft des Computers und Mandelbrots Genie, verschiedene - mathematische und außermathematische - Gebiete zueinander in Beziehung zu setzen, haben zusammen die Geometrie des Fraktalen ermöglicht und zu einem Phänomen gemacht, deren Schönheit sich heute jedes Schulkind mit Hilfe eines Personal Computers vergegenwärtigen kann.

⁶⁷ Im Unterschied zu linearen Wirkungen, bei denen die Änderung einer Größe in der Zeit der Größe selbst proportional ist, werden bei nicht-linearen Wechselwirkungen zwei oder mehrere Komponenten des Systems so miteinander verkoppelt, daß ihre Veränderungen wechselseitig voneinander abhängen.

behandeln konnte; darüber hinaus behalf man sich mit Annäherungen. Rekursion als Rücklauf eines Prozesses in sich selbst kannte man vor der Ausbildung von Selbstorganisationstheorien in mindestens vierfacher Hinsicht:⁶⁸

- als *Zyklizität* (Wiederholbarkeitsprinzip) bei Prozessen, die in ihren Anfangszustand zurückkehren: z. B. beim Umlauf von Planeten und Kometen, beim Wechsel der Tages- und Jahreszeiten, in der Generationenabfolge, beim Geldumlauf, bei der Revision von amtlichen Entscheidungen, bei Stoffkreisläufen in der Natur;
- als *Selbstanschließbarkeit* (Kontinuitätsprinzip) im Falle kontinuierlich an sich selbst anknüpfender Prozesse: jeder neue Zustand innerhalb eines Entwicklungsprozesses und jedes neue Ereignis innerhalb einer Ereigniskette knüpft rekursiv an den jeweils alten Zustand bzw. an vorausgegangene Ereignisse an; Rekursivität bildet so die Grundlage von Aufbau, Abfolge und Entwicklung; auch die Schließung algebraischer Systeme⁶⁹ gehört hier her;
- als *(Selbst-)Replikation* (Vervielfältigungsprinzip) im Falle (selbst-)reproduktiver Prozesse: alle Kopiervorgänge greifen auf ein Vorbild oder Original zurück; vor allem Leben knüpft operational immer an sich selbst an: von der Zellteilung bis hin zur geschlechtlichen Fortpflanzung;
- als *(Selbst-)Innovation* (Innovativitätsprinzip) im Falle evolutionärer und revolutionärer Prozesse: natürliche Artenentwicklung vermittelt Variation (Mutation) und Selektion, sozialer Wandel, politische Umbrüche; stets wird ein gegebener Zustand oder ein bestehendes System in wesentlichen Teilen umgeformt oder umgestaltet, so daß eine neue Spezies, eine neue Verfassung, eine neue Technologie entsteht, neue Wertorientierungen, Institutionen, Weltbilder usw. daraus hervorgehen.

⁶⁸ Vergleiche die ähnliche Darstellung in W. Krohn, »Durcheinander und Erkenntnis. Reflexionen zu Chaos und Selbstorganisation«, Bielefeld 1989 (unveröffentl. Ms.).

⁶⁹ Ein algebraisches System gilt als geschlossen, wenn die Elemente und Operationen so gewählt sind, daß die Operationen an den Elementen immer wieder nur Elemente des Systems liefern: so erzeugt etwa die Multiplikation (Operation) von beliebigen »natürlichen« Zahlen (die Systemelemente: 0,1,2,3, 4,5,...) stets wieder eine »natürliche« Zahl (also ein Element des algebraischen Systems »natürliche Zahlen«).

Natürlich können mehrere der genannten Fälle von Rekursion in ein und demselben Prozeß auftreten (so z. B. bei der Entstehung neuer Arten von Lebewesen). Gerade der Evolutionismus (Darwinismus) hat die Beschäftigung mit rekursiven Anschlußphänomenen wesentlich befördert. Von den reversibel ablaufenden Prozessen der Mechanik verlagerte sich das Forschungsinteresse auf die irreversibel gerichteten Entwicklungen der Naturgeschichte.⁷⁰ Um die Jahrhundertwende schlossen sich in der Chemie erste Ansätze zu einer irreversiblen Thermodynamik an. Prigogine sieht hier den Beginn eines Umschwungs von einer »Wissenschaft des Seins zu einer Wissenschaft des Werdens«.⁷¹ Auch die sich im 19. Jahrhundert ausbildenden Sozialwissenschaften konnten an den neuen Entwicklungsgedanken der Naturwissenschaften anknüpfen (H. Spencer⁷², K. Marx, F. Engels u. a.). Zu beachten ist, daß nicht jede Form wahrgenommener Rekursivität das Bemühen um ein Verständnis von irreversiblen und ungleichgewichtigen Prozessen zu fördern vermag: es war gerade nicht die Zyklizität periodischer und mithin *konservativer* Prozeßverläufe (nach dem Vorbild der Planetenbahnen), sondern vor allem die Vorstellung *progressiver* Selbstinnovationsprozesse (durch die die Evolution in Natur und Gesellschaft vorangetrieben wird), die das Interesse an irreversiblen, durch Rekursion *fortschreitenden* Vorgängen verstärkte.⁷³

⁷⁰ In einer seiner *Populär-wissenschaftlichen Vorlesungen* von 1883 (erschienen Leipzig 1910) stellt Ernst Mach fest (S. 248): »Noch sind keine drei Dezennien verflossen, seit Darwin die Grundzüge seiner Entwicklungslehre ausgesprochen hat, und schon sehen wir diesen Gedanken auf allen, selbst fernliegenden Gebieten Wurzel fassen. Überall, in den historischen, in den Sprachwissenschaften, selbst in den physikalischen Wissenschaften hören wir die Schlagworte: Vererbung, Anpassung, Auslese. Man spricht vom Kampf ums Dasein unter den Himmelskörpern, vom Kampf ums Dasein unter den Molekülen...« Die Parallele zum Einzug (Siegeszug?) der Selbstorganisationsidee in zahlreiche Wissenschaften, den wir heute beobachten können, ist frappierend.

⁷¹ I. Prigogine, *Vom Sein zum Werden*, München 1985.

⁷² Der englische Philosoph und Soziologe H. Spencer (1820-1903) begründete die evolutionäre Zeitalterlehre in seinem »System of Synthetic Philosophy« (1862-1896) mit dem Konzept der Energiedissipation, wodurch er Thermodynamik und Entwicklungsgedanken spekulativ miteinander verband.

⁷³ »Die Vorstellung gerichteter Prozesse löste ältere Vorstellungen von Kreisläufen in Natur und Gesellschaft ab, die sich an den klassischen Gleichgewichtsgedanken anlehnten und die die Reversibilität linearer Prozesse durch die Periodizität zirkulärer

In dem Augenblick, in dem Rekursion als ein wichtiges Prinzip der Selbstordnung in Natur und Gesellschaft erkannt wird, verschiebt sich das Interesse weg von der Suche nach allgemeinen Lösungen hin zur Suche nach individuellen Lösungen: wie kommt es zur Entstehung neuer Arten, neuer Gesellschaftsformationen, neuer Weltbilder usw.? Gefragt wird nunmehr nach den Entstehungsbedingungen des je Besonderen, Individuellen, Einzigartigen. Damit rücken die *Randbedingungen*, unter denen die allgemeinen Naturgesetze wirksam werden, in den Mittelpunkt des Erkenntnisstrebens.

Unter der klassischen Voraussetzung rekursionsfreier Prozeßabläufe war die Behandlung von Randbedingungen (in der Physik) relativ unproblematisch: Um aus der Klasse der allgemeinen Lösung für bestimmte Bewegungsgleichungen eine individuelle Lösung zu errechnen, mußte man zu Beginn der Untersuchung konkrete Angaben über Ort, Geschwindigkeit, Dichte usw. in Form bestimmter Werte in die Gleichungen eingeben: »Randbedingungen wählen also aus den mathematisch möglichen Lösungen eine bestimmte aus. In der ›klassischen‹ Physik enthält die allgemeine Lösung der Bewegungsgleichungen freie Konstanten, über deren Festlegung sich beliebige Randbedingungen erfüllen lassen - die Randbedingungen sind kontingent.« Anders im Falle rekursiver Prozesse, den Poincaré im Auge hatte: »Bei rekursiven Prozessen wirkt die Rekursion als Selektionsmechanismus mit der Folge, daß Lösungen nicht mehr unabhängig von den Randbedingungen existieren; beide hängen in einer nichttrivialen Weise voneinander ab - die Randbedingungen sind spezifisch, allgemeine Lösungen werden durch individuelle ersetzt.«⁷⁴ Freilich war es von der ansatzweisen Entdeckung der Rekursion auf der Basis des Darwinismus und der frühen Ansätze zu einer irreversiblen Thermodynamik bis zu dieser modernen Reformulierung des Verhältnisses von allgemeinem Gesetz und der Rolle der Randbedingungen ein weiter Weg.

Heute kann die Idee der Rekursivität als der wichtigste Bezugspunkt oder als der kleinste gemeinsame Nenner der verschiedenen Selbstorganisationstheorien gelten, die seit den 1960er Jahren unseres Jahrhunderts entwickelt worden sind. Daß man sich ihr und den

Prozesse ergänzten. Statt der Periodizität wurde nun die (selbstinnovatorische; R.P.) Rekursivität zum Charakteristikum dieser gerichteten Prozesse.« (W. Krohn und G. Küppers, »Rekursives Durcheinander«, a. a. O., S. 75.)

⁷⁴ Ebenda, S. 73.

damit verbundenen Phänomenen der Entstehung von Ordnung und Steigerung von Komplexität intensiv zuwandte, dazu bedurfte es allerdings - wie gesagt - insbesondere des Computers, der eine numerische Berechnung rekursiver Funktionen in zumutbaren Zeiträumen erst möglich macht.

2.5 Konvektion, Musterbildung und Oszillation

Rekursivität darf nicht mit Nicht-Linearität verwechselt werden. Bedeutet Rekursivität im mathematischen Sinne, daß eine Funktion auf sich selbst operiert (systemisch: daß der output eines Systems in dieses zurückgefüttert wird), so ist mit Nicht-Linearität gemeint, daß die Veränderung einer Variablen nicht mehr proportional (linear) zu der einer anderen Variablen erfolgt. An dieser Stelle sei auf einen »klassischen« Fall von Selbstorganisation hingewiesen, an dem der ordnungsbildende Mechanismus eines solchen nicht-linearen Effektes noch vor der Entwicklung von Selbstorganisationstheorien besonders augenfällig wurde: auf das Phänomen der geordneten Konvektion. Bereits im 18. Jahrhundert beschäftigte sich Sir Benjamin Thompson (1753-1814), Graf von Rumford, mit dem Wärmetransport in einer Apfeltorte und lieferte dabei die erste Beschreibung der »freien Konvektion«.⁷⁵ Die freie Konvektion in Gasen und Flüssigkeiten unterscheidet sich von der erzwungenen dadurch, daß die Bewegung nicht durch äußere Kräfte, wie z. B. eine Pumpe, hervorgerufen, sondern spontan allein durch den in einer Flüssigkeit herrschenden Auftrieb (infolge aufsteigender Wärme) bewirkt wird, wobei Oberflächenspannung, elektromagnetische Felder und die Viskosität der Flüssigkeit durchaus eine wichtige Rolle spielen können. Eine systematische Untersuchung von Konvektionsphänomenen setzte jedoch erst zu Beginn unseres Jahrhunderts ein.

Damals entdeckte der französische Forscher Henri Bénard, daß sich beim Erhitzen dünner Flüssigkeitsschichten eigentümlich geordnete Strukturen ausbilden. In einer Flüssigkeitsschicht, deren horizontale Ausdehnung in einem völlig ebenen und nach oben

⁷⁵ Vergleiche M. G. Velarde und Ch. Normand, »Konvektion«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, H. 9, 1980, S. 119.

hin offenen Behälter um vieles größer als ihre Höhe ist, entstehen, wenn man sie gleichmäßig von unten erwärmt, zunächst lange walzenförmige Zellen, die der Gestalt des Gefäßes folgen und in denen die Flüssigkeit zirkuliert; zwei aneinandergrenzende Walzen rotieren dabei jeweils entgegengesetzt. Nach einer Weile tritt an die Stelle dieser Walzen ein Muster aus überwiegend sechseckigen (bienenwabenförmigen) Zellen, den sogenannten »Bénard-Zellen«, in deren Mitte Wärme aufsteigt und an die kühlere Luft abgegeben wird; an den Rändern der Zellen steigt die so abgekühlte Flüssigkeit wieder in Richtung Gefäßboden ab. Der für den Auftrieb (den Wärmetransport) erforderliche vertikale Temperaturgradient muß dabei groß genug sein, um die von der Viskosität und der Wärmediffusion verursachten Kräfte zu überwinden.⁷⁶ Offenbar wird der Wärmetransport durch die Ausbildung walzenförmiger bzw. hexagonaler Konvektionszellen effektiver gewährleistet als durch diffusen, ungeordneten Wärmedurchfluß.

Natürlich bemühte man sich sogleich um eine theoretische Deutung des Konvektionsphänomens: die 1916 von Lord Rayleigh vorgelegte Interpretation erwies sich allerdings als unzureichend und erst 1958 vermochte J. R. A. Pearson eine in vieler Hinsicht befriedigende Theorie der Konvektionsströmungen aufzustellen.⁷⁷ Heute - im Anschluß an die Arbeiten von I. Prigogine - wird die »Bénard-Instabilität« als ein Beispiel einer hydrodynamischen dissipativen Struktur interpretiert: jenseits eines kritischen Temperaturgefälles verstärken sich die Fluktuationen in der Flüssigkeit derart, daß die Dynamik des Geschehens in geordnete Konvektion übergeht; das System wechselt von einem Zustand nahe des thermischen Gleichgewichts (nahezu homogene Wärmeverteilung) in einen Zustand fern ab vom thermischen Gleichgewicht. Dadurch entsteht eine neue makroskopische Ordnung von Molekülströmen, die den Energieaustausch mit der Umgebung des Fluids stabilisiert. Diese selbstorganisierte Strukturierung des Energieflusses (in Form »dissipativer Strukturen«) erscheint aus der Perspektive der Flüssigkeitsmoleküle als »synergetischer Effekt«, als ein Resultat ihrer Kooperation.⁷⁸ Nicht-Linearität

⁷⁶ Ebenda, S. 127.

⁷⁷ Ebenda, S. 120 ff.

⁷⁸ Das Boltzmannsche Ordnungsprinzip versagt bei der Analyse der Bénard-Instabilität insofern, als innerhalb von Bénard-Zellen viele Moleküle sich kohärent, d. h. mit derselben Geschwindigkeit bewegen, während sie Boltzmann zufolge höchst unterschied-

kommt bei der Bénard-Instabilität deshalb ins Spiel, weil hier der Wärmefluß (die Dissipation) nicht mehr proportional (linear) zur Steilheit des Temperaturgradienten erfolgt. Zur Ausbildung von Konvektionszellen kommt es, wenn der Wärmefluß einen bestimmten (kritischen) Wert überschreitet, so daß er nicht mehr linear nach den wirkenden Kräften entwickelt werden kann: zu seiner Beschreibung werden Gleichungen mit nichtlinearen (quadratischen, kubischen usw.) Gliedern benötigt.⁷⁹

Es sollte der nicht-linearen Ungleichgewichts-Thermodynamik vorbehalten bleiben, die Bénard-Instabilität in dieser Weise zu deuten. Das gilt ebenso für andere Prozesse der Selbststrukturierung, die z.T. schon lange bekannt waren, aber mehr das Schattendasein von Kuriosa führten, als daß sie größere Aufmerksamkeit erregten: etwa die Entdeckung von Selbstsynchronisationseffekten bei miteinander verbundenen und anfänglich mit unterschiedlicher Frequenz schwingenden Pendeln (durch Ch. Huygens im 17. Jh.; ähnliches beobachtete J. Rayleigh Ende des 19. Jh.s bei Orgelpfeifen und Stimmgabeln); man könnte auch auf die »Taylor-Instabilität« verweisen, auf die »Plateauschen Figuren«, auf die Untersuchung »stationärer Figuren rotierender Flüssigkeiten« (durch Lagrange, Ljapunov u. a.) oder auf die in den zwanziger Jahren entwickelte »Lotka-Volterra-Gleichung« für die Beschreibung von Tierpopulationen, die ihrerseits auf eine kurz nach 1900 von A. Lotka formulierte Differentialgleichung für chemische Oszillationen zurückgeht. Gerade das Phänomen der chemischen Oszillation sollte für die Entwicklung der Prigogineschen Theorie der dissipativen Strukturen eine erhebliche Bedeutung erlangen.

In diesem Zusammenhang sei auch auf Musterbildungsprozesse bei Fällungsreaktionen hingewiesen, die z. T. schon recht lange bekannt sind, heute aber theoretsich in anderem Licht erscheinen: so berichtete der Bakteriologe R. E. Liesegang (1869-1947) bereits 1896⁸⁰ über die periodische Ausbildung von räumlichen Mustern (ring- und bandförmiger Strukturen: sogenannter »Liesegangscher Ringe« bzw. »Bänder«) bei der chemischen

liche Geschwindigkeiten aufweisen müßten; eine (spontan erzeugte) »supramolekulare Organisation« sieht sein Prinzip nicht vor, da sie aller Wahrscheinlichkeit widerspricht (vergleiche I. Prigogine und I. Stengers, *Dialog mit der Natur*, a. a. O., S. 150 ff.).

⁷⁹ Ganz allgemein gilt, daß Wirbel mit geordneten Wirbelstraßen auftreten können, wenn der Stoffdurchsatz nicht mehr proportional zur Druckdifferenz wie bei der laminaren (glatten) Strömung geschieht (vergl. F. R. Krüger, *Physik und Evolution*, Berlin/Hamburg 1984, S. 41).

Phasentrennung in Vielkomponentensystemen. Als Vertreter der »Pränukleationstheorie«, deren Wurzeln auf Ostwald, Wagner und Prager zurückgehen, betrachtete Liesegang diese Strukturen als Resultat eines räumlich diskontinuierlichen Fällungsprozesses, bei dem ein Konzentrationsgradient eine elektrolytische Diffusionswelle innerhalb einer Lösung erzeugt: jenseits einer Metastabilitätsgrenze bilden sich bestimmte diskrete Zonen der Nukleation von Kristallkeimen; deren Wachstum wiederum erzeugt durch Verbrauch der Reaktanten (Gegendiffusion) »leere« Zonen, so daß es zu einer Bänderung u. ä. kommt. Den Pränukleationisten gelang es allerdings nicht, die Entstehung von Bändern in gradientenfreien Systemen zu erklären. Hier führten erst »postnukleationäre« Ansätze, die auf Arbeiten des Computerpioniers A. Turing zurückgehen⁸¹, weiter: hier wird die Ursache der chemischen Instabilität in der Kopplung von autokatalytischem Wachstum der kolloiden Partikel mit dem Diffusionsprozeß gesehen.⁸² Derartige spontane Musterbildungsprozesse, dies erkannte schon Liesegang, besitzen offenbar für die Struktur- bildung in biologischen Systemen (Sporenmuster in Pilzkulturen, Fellzeichnungen, Strukturen des Zellskeletts usw.) eine enorme Bedeutung; ihre Deutung als Selbst- organisationsprozesse gelang indes erst, nachdem ein neues Verständnis von Ungleichge- wichtsphänomenen bzw. der Rolle der Nicht-Linearität (durch Prigogine, Haken usw.) entwickelt worden war.

Abschließend soll die allmähliche Entstehung des »nicht-linearen Denkens« noch von anderer Seite her kurz beleuchtet werden: speziell in der Elektrotechnik und Elektronik wurden nicht-lineare Effekte bereits frühzeitig theoretisch behandelt (Theorie selbsterreg- ter Schwingungen und Wellen) und technisch genutzt (Meißner-Oszillator). Von besonde- rer, heute erst allmählich zutage tretender Bedeutung war dabei der Beitrag der sowjetis-

⁸⁰ R. E. Liesegang, »Über einige Eigenschaften von Gallerten«, in: *Naturwissenschaftliche Wochenschrift*, 11, 1896, S. 353.

⁸¹ A. M. Turing, »The Chemical Basis of Morphogenesis«, in: *Philosophical Trans- actions*, B 237, 1952, S. 37 ff.

⁸² Vergleiche A. Deutsch, »Liesegangsche Ringe: Musterbildung bei Fällungsreaktionen«, in: L. Rensing und A. Deutsch (Hg.), *Natur und Form: Schönheit und Gesetzmäßig- keiten rhythmischer Strukturen*, Bremen (Universität Bremen) 1990, S. 47 ff.; sowie grundlegend: H. Brandl, *Oszillierende chemische Reaktionen und Strukturbildungs- prozesse*, Köln 1987.

chen Forschung in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts: »It was at that time that Mandelstam, van der Pol, Andronov and others originated a science describing nonlinear phenomena in lumped parameter systems of various nature - known as the theory of nonlinear oscillations, or nonlinear dynamics or the theory of nonlinear phenomena«. ⁸³ So hatte A. A. Andronov ab 1927, unter Rückgriff auf die nicht-linearen Gleichungen Poincarés und Ljapunovs, eine Theorie selbsterregter »Autoschwingungen« oder »Autowellen« entwickelt⁸⁴; und B. van der Pol begründete eben damals seine Theorie quasiharmonischer Oszillationen im Radio.⁸⁵

Galt bis dahin das »Superpositionsprinzip«, »i. e. the notion that the additivity of causes brings about the additivity of effects, ... as a universal key to the understanding and quantitative description of the majority of problems posed by nature«, so wurde die Situation zu Beginn dieses Jahrhunderts »dramatically« verändert:

»The number of nonlinear problems whose solution could not be shelved indefinitely began to snowball. Whereas earlier these problems were only related to traditional nonlinear mechanics (the three-body problem, the description of waves on fluid surface), in the 1910-30s nonlinear problems came to the fore in acoustics, solid-state physics and statistical physics. Problems of fundamentally nonlinear nature emerged in the incipient radio engineering (detection and generation of oscillations), they also occurred in other applied problems (automatic control theory). But the »nonlinear difficulties« in disparate

⁸³ A. V. Gaponov-Grekhov und M. I. Rabinovich, »Nonlinear Physics. Stochasticity and Structures«, in: Y. P. Velikhov et. al., *Physics of the 20th Century. History and Outlook*, Moskau 1984 (engl. Übersetzung: Moskau 1987), S. 231.

⁸⁴ Siehe etwa: A. A. Andronov und C. E. Chaikin, *Theory of Oscillations*, Princeton/-London 1949 (im russ. Original: Moskau 1937). Hieran knüpften sich u. a. Arbeiten von N. Minorski, den der Physiker W. Ebeling (persönliche Mitteilung) für ein wichtiges Bindeglied zu Prigogine hält; siehe z. B. Minorskis *Introduction to Non-Linear Mechanics*, Ann Arbor/Mich. 1947 (Erstausgabe 1944-46 bei D. W. Taylor, Model Basin, U. S. Navy).

⁸⁵ B. van der Pol, »A Theory of the Amplitude of Free and Forced Triode Vibration«, in: *Radio Rev.*, 1, 1920, S. 701 ff.

branches of physics and technology seemed to be specific for each problem and unrelated to each other.«⁸⁶

Diese disziplinär isolierte Behandlung nicht-linearer Probleme mag mit ein Grund dafür gewesen sein, daß es damals noch nicht zur Ausbildung einer allgemeinen Theorie der Selbstorganisation nicht-linearer Systemprozesse gekommen ist. Immerhin »among physicists of various specialities »nonlinear thinking« started to strike roots, and various branches of science started pooling their »nonlinear experience««, derart, daß L. Mandelstam, ein bedeutender Kollege A. A. Andronovs, damals von der Notwendigkeit sprach, das Programm einer »nicht-linearen Kultur« auszuarbeiten und damit der Tradition des »Linearisierens« ein Ende zu setzen.⁸⁷ Wir werden auf die Problematik dieser Tradition noch im Zusammenhang mit der Entstehung der Kybernetik zurückkommen.

2.6 Ganzheitlichkeit und Offenheit in biologischen Systemen

In der voranstehenden Darstellung naturwissenschaftlicher Vorläuferkonzepte haben wir frühe Konzepte, die Selbstordnungsphänomene im Bereich physiologischer, neurobiologischer und psychologischer Prozesse betreffen, außer Acht gelassen; ebenso die ersten Ansätze zur Definition von Lebewesen als offene Systeme und zur Formulierung ökologischer Systemzusammenhänge. Unbehandelt geblieben sind auch die Entstehung der Kybernetik, der Informationstheorie und der (allgemeinen) Systemtheorie, wodurch wichtige Voraussetzungen für die modernen Selbstorganisationskonzepte geschaffen wurden.

Der Grund dafür ist, daß wir bislang nur den wissenschaftlichen Vorlauf hin zur Entwicklung einer nicht-linearen Nichtgleichgewichts-Thermodynamik bzw. zur Einsicht in die prinzipielle Unberechenbarkeit selbst einfacher deterministischer Systeme verfolgt haben. Nunmehr wollen wir uns jenen Vorläuferkonzepten zuwenden, bei denen andere

⁸⁶ A. V. Gaponov-Grekhov und M. I. Rabinovich, »Nonlinear Physics«, a. a. O., S. 230 f.

⁸⁷ Ebenda, S. 231.

Gesichtspunkte in den Vordergrund rücken: die Ganzheitlichkeit von Organismen und Ökosystemen, die (modern gesprochen) Eigendynamik neuronaler Prozesse oder die organisationalen Leistungen kognitiver Systeme bei der Wahrnehmung von Gestalten und ihrer psychischen und intellektuellen »Verarbeitung«. Diese frühen physiologischen, neurologischen und wahrnehmungs- bzw. gestaltpsychologischen Konzepte enthalten Selbstorganisationsmomente, die für die Entwicklung »konnektionistischer« Selbstorganisationstheorien innerhalb der »cognitive science(s)« eine besondere Bedeutung erlangen: gemeint sind damit Theorien, in denen Begriffe wie »rekursive Netzwerkprozesse«, »Selbstreferentialität« oder »operationale Geschlossenheit« eine zentrale Rolle spielen. In Anknüpfung an unsere im vorstehenden Abschnitt getroffene Unterscheidung verschiedener Rekursionsmodi könnte man sagen, daß es bei Lebewesen nicht nur um die Selbstordnung von Strukturen, sondern auch um Selbstherstellung (wechselseitige Produktion von Komponenten des Organismus), um Selbsterhaltung und Selbstreproduktion geht. Im kognitiven Bereich kommen dann noch Prozesse der Selbstwahrnehmung oder -beobachtung, der bewußten Selbststeuerung und -kontrolle sowie schließlich der Selbstreflexion hinzu. Alle diese selbstreferenten Prozesse, mittels derer ein Organismus bzw. ein Nervensystem oder ein Bewußtsein auf sich selbst operiert, kreisen um das Phänomen der ganzheitlich geschlossenen Organisation, innerhalb derer alle Teilstrukturen und -prozesse spezifisch aufeinander abgestimmt sind und so ein komplexes Funktionsgefüge zirkular vernetzter Operationen bilden.

Auch wenn eine derartige Beschreibung erst auf der Grundlage des modernen Autopoiesekonzepts (H. Maturana) bzw. der Theorie hyperzyklisch vernetzter Katalyseschleifen (M. Eigen) möglich ist, so lassen sich doch in den Naturwissenschaften des 19. und frühen 20. Jahrhunderts erste Ansätze dazu ausmachen; ihre Durchsetzungskraft gegenüber dem vorherrschenden mechanistischen Denken mußte freilich gering ausfallen, da die zu ihrer Untermauerung erforderlichen experimentellen Möglichkeiten noch zu unterentwickelt waren. Auch konzeptionell schwankten sie häufig zwischen klassisch thermodynamischen Gleichgewichtsannahmen und vitalistischen Begründungen bei der Erklärung biologischer bzw. psychischer Selbstorganisationsleistungen. - In diesem Abschnitt werden wir zunächst

die Ganzheitlichkeit und Offenheit biologischer Systeme (Organismen und Ökosysteme) behandeln.

Das 19. Jahrhundert war nicht nur das Jahrhundert des Evolutionismus, sondern auch ein Jahrhundert, in dem dem Phänomen der Ganzheit, wie es vorzüglich in der organisatorischen Geschlossenheit von Lebewesen vor Augen tritt, besondere Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Behandelt die Evolutionsbiologie die Phylogenese, also den Ursprung und die Transformation der Arten, so untersucht die morphogenetische Entwicklungsbiologie statt dessen die Ontogenese, also die Entwicklung eines Lebewesens von der befruchteten Eizelle bis zum reifen Organismus. Die Embryologie und die ontogenetische Morphologie hatten im 18. Jahrhundert durch den Einsatz des Mikroskops einen raschen Aufschwung genommen; und bereits zu Anfang des 19. Jahrhunderts begründeten F. Burdach und J. W. von Goethe eine eigenständige biologische Gestaltlehre, in der das Problem von Teil und Ganzem im Mittelpunkt stand. Im Unterschied zur vom Menschen konstruierten Maschine bilden sich in der Natur ja alle organischen Formen selbsttätig, ohne einen von außen (fremdbestimmt) vorgesetzten Konstruktionsplan, und doch offenbar in hoher Zweckmäßigkeit: nur daß die Organismen ihre Zwecke in sich selbst tragen, d. h. sich selbst der Zweck sind, auf den hin alle ihre Lebensfunktionen ausgerichtet und harmonisch koordiniert sind. Vor allem in der romantischen Naturforschung fanden diese Vorstellungen Anklang; in diesen Kontext gehört auch die oben behandelte Naturphilosophie Schellings.

Neben solchen mehr holistischen und teilweise vitalistischen Ansätzen gab es aber durchaus auch Versuche, den Systemcharakter des Lebendigen nach dem mechanischen Modell der Maschine zu deuten.⁸⁸ Über die Frage, ob die Keimzellen den gesamten späteren Organismus schon enthalten oder dieser sich dank eines ihm innewohnenden »Bildungstriebes« erst herausbilde, spalteten sich die Theorien. Aber auch die Erklärung der physiologischen Zusammenhänge im fertig ausgebildeten Lebewesen bereitete große Schwierigkeiten. Je genauer man diese erkannte, desto unwahrscheinlicher erschien es vielen Forschern, sie auf chemische oder physikalische Kräfte zurückführen zu können. Auf der Grundlage des darwinistischen Evolutionsgedankens schob sich noch ein weiteres Problem der Selbstorganisation in den Vordergrund: Die »Selbsterkenntnis« der Materie

⁸⁸ Siehe etwa die 1909 erschienene und unter dem Einfluß des Positivismus stehende Arbeit von J. Schultz, *Die Maschinen-Theorie des Lebens*, Göttingen.

durch die Ausbildung von Bewußtsein. Freilich sorgte dieses Thema in erster Linie für weltanschauliche Turbulenz, da es einer über die Physiologie hinausgehenden empirischen Behandlung weitgehend unzugänglich blieb. Die Mehrzahl der damaligen Embryologen und Physiologen hielt indessen an der Hoffnung auf eine schließliche mechanistische Auflösung all dieser Probleme fest.

Besonders in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts dominierte in der Embryologie, Morphologie und Physiologie das mechanistische Organismusparadigma mit dem Ziel, Lebensvorgänge auf der Basis von *linearen* (linealen) Ursache-Wirkungs-Relationen zu beschreiben.⁸⁹ Im Anschluß an Darwins Prinzip des Daseinskampfes begründete W. Roux (1850-1924) seine »Entwicklungsmechanik« (1885), derzufolge der Organismus die Summe seiner Teile ist (»Merismus«) und die innere Zweckmäßigkeit biologischer Systeme als aus dem Konkurrenzverhältnis ihrer einzelnen Teile hervorgegangen erklärt wird.⁹⁰ Noch entschiedener führte K. Loeb's »Tropismenlehre« tierische Reize und Verhaltensweisen unmittelbar auf mechanische Ursachen (z. B. die Schwerkraft) zurück. Gestärkt wurde die mechanistische Position in der Physiologie auch durch H. Helmholtz, der physikalische Theorien erfolgreich auf die Sinnesphysiologie anzuwenden vermochte.

Es darf ja nicht übersehen werden, daß auch der Darwinismus von den meisten seiner Verfechter keineswegs als zum klassischen Mechanismus im Widerspruch stehend empfunden wurde; ganz im Gegenteil glaubten zahlreiche Darwinisten, »in dem scheinbar mechanistischen Prinzip der Selektion, welche das Zustandekommen des Zweckmäßigen unter Ausschluß zwecktätiger Kräfte erklärt, ... eine Lösung des dringendsten Problems des Mechanismus gefunden zu haben: der Frage nach der Entstehung der organischen ›Maschine‹, für welche Descartes einst einen Schöpfergott annahm«.⁹¹ Der Darwinismus oder Evolutionismus galt vielfach als Bestätigung und produktive Fortführung des

⁸⁹ Für eine derartige Deutung steht etwa M. Verworn's *Allgemeine Physiologie*, Jena 1894, ein damals sehr einflußreiches Lehrbuch.

⁹⁰ Siehe etwa folgende Arbeiten von W. Roux: *Über die Leistungsfähigkeit der Prinzipien der Deszendenzlehre zur Erklärung der Zweckmäßigkeiten des tierischen Organismus*, Breslau 1880, sowie *Der Kampf der Teile im Organismus. Ein Beitrag zur Vervollständigung der mechanischen Zweckmäßigkeitslehre*, Leipzig 1891.

⁹¹ L. von Bertalanffy, *Kritische Theorie der Formbildung*, Berlin 1928, S. 5.

Mechanismus (problematischer war hingegen sein Verhältnis zur klassischen Thermodynamik, wie wir gesehen haben).

Freilich gab es auch Kritiker dieser umstandslosen Verknüpfung, die das prinzipiell Unvereinbare beider »Weltbilder« hervorhoben und die dem »darwinisierten« Mechanismus Selbstwidersprüche nachzuweisen versuchten: sie stellten das Recht des Mechanisten infrage, von Anpassung und Zweckmäßigkeit, von Individualität, von Ganzheit und Einheit, von Organisation und Organismus, von Harmonie, Regulation, Aktivität und Autonomie sprechen zu dürfen. Diese Begriffe seien mit einer stringent mechanistischen Sprechweise unverträglich. Außerdem: wenn es keinen prinzipiellen Unterschied zwischen belebter und lebloser Materie gibt, wie sollten dann der Begriff des Vorteils oder Nutzens sinnvoll auf unbelebte Materie angewandt und somit dort Zustände verschiedener Wertigkeit unterschieden werden können. Fraglich sei überhaupt, ob der Selektionsbegriff als utilitaristische Erklärung organischer Zweckmäßigkeit brauchbar ist: »Schon der zentrale Entwicklungsbegriff kann als fortschreitende Komplikation nicht utilitaristisch oder gar mechanistisch aufgefaßt werden, da ja die niedrigeren Lebensformen ebenso vollständig angepaßt sind, wie die höheren.«⁹² Einerseits würden Wertbegriffe als Erklärungsprinzipien herangezogen, andererseits aber allein physiko-chemische Erklärungen als wissenschaftlich anerkannt. Der mechanistische Forscher »operiert also auf der einen Seite mit Ausdrücken wie Organismus, Funktion, Determination, Pathologie, Norm, Anpassung, Auslese und vielen anderen (lauter Ausdrücken, welche auf nicht restlos in physiko-chemischer Beschreibung erfaßbare Merkmale des Lebendigen hindeuten), und betont doch auf der andern Seite fortwährend, daß in den Lebensvorgängen keine andere als die physiko-chemische Gesetzmäßigkeit herrsche, und daß es keine andere Art wissenschaftlicher Forschung gebe, als die physiko-chemische.«⁹³ Wenn der Mechanismus also abzulehnen sei, blieb dann nur noch der Ausweg des Vitalismus?

Der wohl wichtigste Widersacher der mechanistischen Organismusinterpretation und Mitbegründer des »Neo-Vitalismus« gegen Ende des 19. Jahrhunderts war der deutsche Biologe und Philosoph Hans Driesch (1867-1941). Er hatte 1891 bei Teilungsexperimen-

⁹² Ebenda, S. 7.

⁹³ Ebenda, S. 8.

ten mit Seeiegeln eineiige Zwillinge erzeugt: die beiden aus demselben Seeigelkeim hervorgehenden Blastomeren wuchsen zu vollentwickelten, lebensfähigen Exemplaren heran, vermochten also durch die Teilung verursachte Verluste zu kompensieren; für Driesch ein Beleg für »Ganzheitswirkung durch Selbstdifferenzierung«⁹⁴ - wurde doch der Organismus nicht halbiert, sondern im Gegenteil verdoppelt. Die Teilung als ganzheitlicher Prozeß widerspreche aber allen mechanistischen Vorstellungen. Für die Entwicklung des Embryos sei statt dessen eine immaterielle »Entelechie« verantwortlich, die auch schwere Störungen in frühen Entwicklungsstadien auszugleichen imstande sei.⁹⁵ Von Driesch, der diesen Befund geradezu als »Vitalismusbeweis« betrachtete, wurde daraufhin der Begriff des »morphogenetischen Feldes« eingeführt, wobei er von der Hypothese ausging, daß die Differenzierung einer Zelle von ihrer Position in diesem Feld abhängt. Doch ergab sich damit das Problem, wie eine Zelle ihre Position innerhalb eines Organismus zu erkennen bzw. einzunehmen vermag. Der deutsche Zoologe H. Spemann (1869-1941) schlug eine nicht-vitalistische Lösung dieses Problems vor: nach ihm übernimmt die ganzheits- und gestaltbildende Funktion ein sogenannter »Organisator«, ein Komplex aus bestimmten, freilich noch unbekannten chemischen Substanzen, der keiner entelechialen Begründung mehr bedarf.⁹⁶

Damit erscheint der Organismus als ein selbstregulatives System, das seinen Aufbau und seine innere Prozeßstruktur selbst organisiert: deterministische Faktoren und eigenregulatorische Potenzen (Selbstorganisation und Zielstrebigkeit) wirken im Organismus stets zusammen. »Die von der Entwicklungsphysiologie (Driesch, Mangold, Child, Spemann) gebildeten Begriffe wie »prospektive Potenz«, »Determinationsfeld«, »Regulation«, »Selbstdifferenzierung«, »Induktion«, »Organisator« usw. können deshalb auch als entwicklungsphysiologische Beiträge zu einer Theorie der Selbstorganisation verstanden

⁹⁴ Vergleiche die instruktive Darstellung bei V. Schurig, »Die Entdeckung der System-eigenschaft »Ganzheit««, in: *Gestalt-Theory*, Vol. 7, No. 4, 1985, S. 209 ff. (S. 216).

⁹⁵ Siehe etwa die Schriften von H. Driesch: *Analytische Theorie der organischen Entwicklung*, Leipzig 1894, und *Philosophie des Organischen*, Bd. I und II, Leipzig 1909.

⁹⁶ H. Spemann, *Zur Theorie der tierischen Entwicklung. Rektoratsrede*, Stuttgart 1923.

werden.«⁹⁷ Noch aber ist der organismische Systembegriff - vor allem bei Driesch - vorwiegend vitalistisch geprägt, da die biologischen Mechanismen der Zelldifferenzierung und überhaupt des Zusammenhangs von System und Element (je nach dem: Zelle, Gewebe, Organ) unaufgeklärt sind. »Driesch hat zwar erstmals den Begriff ›System‹ in eine richtige Position gebracht, aber er entwickelte daraus *keine* explizite *Theorie biologischer Systeme*, sondern ersetzte diese durch eine spekulative ›Philosophie des Organischen‹ (1909).«⁹⁸

Eine systemtheoretische Begründung der von Driesch erkannten physiologischen Tatsache, daß in der Keimesentwicklung (etwa infolge experimenteller Teilungen) verschiedene Ausgangszustände häufig zu gleichen oder ähnlichen Endzuständen führen (weshalb nach Driesch Organismen »harmonisch-äquipotentielle Systeme« sind), gelang erst dem bedeutenden Biologen Ludwig v. Bertalanffy (1901-1972): in seiner Theorie »offener Systeme« von 1932⁹⁹ werden die »äquifinalen« Ganzheitseigenschaften von Organismen aus ihrer physikalisch-energetischen Wechselwirkung mit der Umwelt abgeleitet. Im Unterschied zu den »geschlossenen Systemen« der klassischen Thermodynamik, die gemäß dem Entropiesatz zur Einnahme von Gleichgewichtszuständen, zur wahrscheinlichsten Durchmischung oder Verteilung tendieren, bilden sich in für Materie- und Energieflüsse »offenen Systemen« - also etwa Lebewesen - sogenannte »Fließgleichgewichte« aus, die sich auch an neue Umweltbedingungen anpassen können.¹⁰⁰

⁹⁷ V. Schurig, »Die Entdeckung der Systemeigenschaft ›Ganzheit‹«, a. a. O., S. 222.

⁹⁸ Ebenda, S. 223.

⁹⁹ L. v. Bertalanffy, *Theoretische Biologie*, Bd. 1: *Allgemeine Theorie, Physikochemie, Aufbau und Entwicklung des Organismus*, Berlin 1932.

¹⁰⁰ In für die Ein- und Ausfuhr von Materie und Energie offenen Systemen »kann der gleiche Endzustand von verschiedenen Anfangsbedingungen aus und auf verschiedenen Wegen erreicht werden. Dieses Prinzip wird als Äquifinalität bezeichnet, und es ist von grundsätzlicher Bedeutung für Erscheinungen in der Welt des Lebendigen. ... Die Äquifinalität soll ... nach Driesch den Gesetzen der Physik widersprechen und könne nur durch das Walten eines seelenähnlichen Lebensprinzips erklärt werden. Dieses berühmte Argument des Vitalismus fällt zusammen innerhalb einer Theorie offener Systeme. Offene Systeme müssen, falls sie einem Fließgleichgewicht zugehen, die Erscheinung der Äquifinalität zeigen, und so besteht die angebliche Durchbrechung der physikalischen Gesetzmäßigkeit tatsächlich nicht« (L. v. Bertalanffy, »Allgemeine

Ein Fließgleichgewicht stellt eine Balance zwischen Systemimport und -export her, die vom echten Gleichgewicht weit entfernt ist. Entscheidend ist, daß in offenen Systemen nicht nur Entropie aufgrund irreversibler Prozesse erzeugt wird, sondern im Gegenzug dazu auch Energie von außen importiert wird (etwa auf dem Nahrungswege in Form energiereicher Moleküle), woraus ein »fließender«, »quasi stationärer« Gleichgewichtszustand des Gesamtorganismus resultiert, der vom (homöostatischen) Gleichgewicht einzelner Subsysteme des Organismus (z. B. Blutdruckregulation) wohl zu unterscheiden sei.¹⁰¹ Die offenen Systeme in Bertalanffys »organismischer Biologie« sind »nicht nur in der Lage, sich der Entropietendenz partiell zu entziehen, sondern ständig auch höher differenzierte Ordnungen aufzubauen, indem sie die Umweltregie in spezifischer Weise neu organisieren«.¹⁰² Dieser Ansatz sollte später von I. Prigogine - über mehrere Vorstufen ab 1947 - zu seiner Theorie offener Systeme fern ab vom Gleichgewicht (auch vom Fließgleichgewicht) fortentwickelt werden.

Bertalanffys Theorie fließgleichgewichtiger Systeme war nicht nur für die Auffassung vom einzelnen Organismus, sondern auch für die Beschreibung artenreicher Ökosysteme interessant. Mit ihrer Hilfe konnte die von den frühen Ökologen geführte Diskussion um die Holismus-Problematik auf eine rationale Grundlage gestellt werden. Immerhin war die Ökologie schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts soweit entwickelt, das die Zusammenfassung der Begriffe »Biozönose« (1877 von Karl Möbius zur Bezeichnung der Lebensgemeinschaft geprägt) und »Biotop« (womit der Lebensraum einer solchen Lebensgemeinschaft gemeint ist) zum Begriff des »Ökosystems« vollzogen werden konnte.¹⁰³ Als die Ökologen sich damals anschickten, ihre Wissenschaft von der deskriptiv-komparativen

Systemtheorie - Wege zu einer neuen Mathesis Universalis«, in: *Deutsche Universitätszeitung*, H. XII/5-6, 1957, S. 11).

¹⁰¹ »Wir sehen jedoch sofort ein, daß im Organismus zwar Einzelsysteme vorhanden sind, die sich im Gleichgewicht befinden, daß er als solcher jedoch nicht als System im Gleichgewicht betrachtet werden kann« (L. v. Bertalanffy, »Der Organismus als physikalisches System betrachtet«, in: *Naturwissenschaften*, H. 33, 1940, S. 521). Eine ähnliche Konzeption des Fließgleichgewichts hat übrigens der Chemiker W. Ostwald (1853-1932), der zusammen mit E. Haeckel die wissenschaftliche Weltanschauung des Monismus begründete, ausgearbeitet.

¹⁰² V. Schurig, »Die Entdeckung der Systemeigenschaft »Ganzheit««, a. a. O., S. 225.

Phase in die analytisch-experimentelle Phase fortzuentwickeln, war der Durchbruch zur Ökosystemanalyse ein gutes Stück näher gerückt. Freilich konzentrierte man sich auf die dynamischen Prozesse in biologischen *Gleichgewichtszuständen*, auf Stoffwechselkreisläufe und Stoffumsätze. Die elastischen und instabilen Vorgänge in Ökosystemen zogen nur geringes Interesse auf sich; entsprechend unerforscht blieb die Evolution derartiger Systeme bzw. die »Ko-Evolution« in Biozönose lebender Arten desselben Biotops.

Von großem Einfluß auf die ökologische Forschung (und die Ethologie) war zunächst der 1909 von dem baltischen Biologen und Pionier der Umweltforschung Jakob v. Uexküll (1864-1944) geprägte Begriff der »Umwelt« eines Lebewesens¹⁰⁴: seine Einführung stand im Zusammenhang mit Uexküls »Modell des Funktionskreises« und seiner »Kategorie des Bauplans«, welcher Umwelt und Innenwelt eines Tieres im Funktionskreis verbindet. Lebewesen befinden sich stets in einer Umwelt, bestehend aus anderen Lebewesen und physikalisch-chemischen Komponenten, und müssen aus ihren Wechselbeziehungen mit Umweltgegebenheiten heraus begriffen werden: dies wurde seitens der Fachwelt durchaus akzeptiert, obgleich die starken psychologischen Implikationen von Uexküls Umweltbegriff nicht unkritisiert blieben.

Die System-Umwelt-Terminologie hatte Einfluß auf die damals heftig geführte Debatte zwischen biologischen Reduktionisten und Holisten: mit ihrer Hilfe ließen sich systemare Ganzheiten als unableitbare Grundkategorien alles Lebendigen begreifen und so holistische Positionen stärken. Philosophisch war der Holismus 1925 von dem Burengeneral und Biologen Jan Ch. Smuts (1870-1950) begründet worden.¹⁰⁵ Die Reichweite des holistischen Denkens geht dabei über die Grenzen der Biologie weit hinaus: Ganzheiten gelten als konstitutives Element jedes Wirklichkeitsbereichs: »Ganze von verschiedenen

¹⁰³ Zum Komplex »Ökologie« siehe G. Küppers, P. Lundgreen und P. Weingart, *Umweltforschung - die gesteuerte Wissenschaft?*, Frankfurt a. M. 1978, S. 67 ff., sowie R. Paslack, *Die staatliche hochschulfreie Forschung im Bereich Erderschließung, Umweltschutz und Raumordnung (1870-1980)*, Bielefeld 1987, S. 60 ff.; instruktiv ist hier auch L. Trepl, *Geschichte der Ökologie*, Frankfurt a. M. 1987.

¹⁰⁴ J. von Uexküll, *Umwelt und Innenwelt der Tiere*, Berlin 1909.

¹⁰⁵ J. Ch. Smuts, *Holism and Evolution*, London 1925; dt. Ausgabe: *Die holistische Welt*, Berlin 1938.

Abstufungen sind die wirklichen Einheiten der Natur. Ganzheit ist der am stärksten charakteristische Ausdruck des Wesens der Welt in ihrer zeitlichen Vorwärtsbewegung.«¹⁰⁶
Kurzum: Das Ganze sei mehr als die Summe seiner Teile.

Dieser Vorstellung kommt Uexkülls »Bauplan«-Ansatz sehr nahe, während andere Autoren (etwa der Zoologe A. Portmann) das Ganze lieber als ein Spiel der Faktoren begreifen möchten, wodurch »Ganzheit« als eine empirisch gehaltvolle Hypothese konzipiert werden kann.¹⁰⁷ Dieser mehr pragmatischen Holismusposition schließt sich auch L. v. Bertalanffy an¹⁰⁸: Ganzheit bedeute »Gefügesetzlichkeit«; diese gelte es organis-
misch, aber auch ökologisch mit empirischen Methoden zu analysieren. Indem sich nun speziell die Ökologie auf die Holismusproblematik einließ, hat sie sich von vornherein mit jener »reduktionistischen Forschungslogik« schwer getan, »die den Hauptstrom der Biologie kennzeichnet und bestimmt. ... Gerade aufgrund ihres holistischen Konzepts gelingt es der Ökologie schon frühzeitig, die entscheidenden Konzepte und Begriffe einer globalen Theorie vom Ökosystem zu entwickeln«.¹⁰⁹ Auch wenn es von dort bis zur Auffas-
sung des Ökosystems als eines flexiblen, ungleichgewichtigen und evolutionsfähigen Systems ko-evolvierender Komponenten noch ein weiter Weg war, so erstaunt es doch nicht, daß gerade in der modernen Ökologie - durch C. S. Holling - eines der »Urkonzepte« der Selbstorganisationstheorie entwickelt worden ist.

¹⁰⁶ Ebenda (dt. Ausgabe), S. 101.

¹⁰⁷ Vergleiche G. Küppers et al., *Umweltforschung - die gesteuerte Wissenschaft?*, a. a. O., S. 76.

¹⁰⁸ L. v. Bertalanffy, *Das Gefüge des Lebens*, Berlin 1937.

¹⁰⁹ G. Küppers et al., *Umweltforschung - die gesteuerte Wissenschaft?*, a. a. O., S. 96.

2.7 Psychophysik, Gestaltpsychologie und Kognitionswissenschaft

Deutlicher noch als in den vorstehend diskutierten Fällen der organismischen Selbstregulation bzw. der ökologischen »Gefügesetzlichkeit« wird die Bedeutung der »konnektionistischen« Komponente, wenn wir uns jenen Vorläuferkonzepten zuwenden, die zur Entstehung gestalttheoretischer und kognitivistischer Selbstorganisationkonzepte »geführt haben«.¹¹⁰

Wie gesagt: Offenbar hat das Fehlen einer ausgearbeiteten Theorie offener (ungleichgewichtiger) Systeme und einer Thermodynamik *nicht*-linearer, irreversibler Prozesse die empirischen Naturwissenschaften des 19. und der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts daran gehindert, die Phänomene makroskopischer Ordnungsbildung aus der Wechselwirkung mikroskopischer Systemkomponenten zu verstehen und damit die klassische Sicht des Mechanismus erfolgreich in Frage zu stellen. Wie für die Biologie (Embryologie, Morphologie und Physiologie des Stoffwechsels) läßt sich dies auch für die Physiologie (und Neurologie) der Sinneswahrnehmung und für die Psychologie demonstrieren. So versuchte etwa Gustav T. Fechner (1801-1887), der Begründer der Psychophysik, den Zusammenhang zwischen »organischen und anorganischen Bewegungszuständen« über ein »Princip der Tendenz zur Stabilität« herzustellen, aber auch diese Darwin einbeziehende evolutionistische Betrachtungsweise blieb letztlich innerhalb der *homöostatischen* Modellierung *geschlossener* oder konstanten Umweltbedingungen ausgesetzter Systeme im Gleichgewicht.¹¹¹

¹¹⁰ Auch hier soll wiederum kein *gleitender* Übergang hin zu modernen Selbstorganisationstheorien neuronaler und kognitiver Prozesse suggeriert werden: trotz aller »Vorbereitung« durch Vorläuferkonzepte war ein »paradigm shift« durchaus notwendig: die *Vorläufergeschichte* ergibt sich erst retrospektiv, d. h. aus der »ex post«-Perspektive. Die alte Problemgeschichte und mit ihr bestimmte frühere Lösungsversuche *erscheinen* erst aus der Sicht des neuen Paradigmas der Selbstorganisation *als* theoretischer Vorlauf.

¹¹¹ G. T. Fechner, *Einige Ideen zur Schöpfungs- und Entwicklungsgeschichte der Organismen*, Leipzig 1873 (Nachdruck Tübingen 1985). - Immerhin vermochte Fechner

Einen wichtigen Schritt auf dem Wege zu einer Betrachtung des Nervensystems als eines (modern gesprochen) »operational geschlossenen Systems« bildete Johannes Müllers (1801-1858) Entdeckung des »Gesetzes der spezifischen Nervenenergie«, demzufolge es keine eindeutige Korrelation zwischen einem gegebenen physikalischen Stimulus und der Sinneswahrnehmung (Sensation) gibt: Müller hatte entdeckt, daß einerseits ein und derselbe Reiz verschiedene Sensationen in verschiedenen Sinnesorganen auslösen kann und daß andererseits ein und dieselbe Sensation eines bestimmten Sinnesorgans durch verschiedene Stimuli hervorgerufen werden kann. Das aber bedeutet, daß es keine unmittelbare Wahrnehmung von Objekten und ihrer Qualitäten außerhalb des Nervensystems gibt: das Nervensystem ist zwar reizoffen, jedoch »geschlossen« und »autonom« (sozusagen »selbstreferentiell« organisiert) hinsichtlich seiner Verarbeitung und Interpretation von Reizen.¹¹² Aber so sehr dies auch als ein Vorgriff auf die moderne Autopoiesetheorie von H. Maturana und F. J. Varela anmuten mag, so wenig darf man doch übersehen, daß »Müllers Gesetz« im damaligen Forschungskontext eher als ein erklärungsbedürftiges Rätsel denn als Ausgangspunkt für ein neues und empirisch fruchtbares Forschungsprogramm der neuronalen Selbstorganisation und der Selbstexplikation selbstreferentieller Gehirnprozesse wahrgenommen wurde. Noch war man weit davon entfernt, das Nervensystem als ein sich selbst regulierendes dynamisches und plastisches System der Informationserzeugung und -verarbeitung aufzufassen: dazu standen weder geeignete systemtheoretische Modellvorstellungen noch genügend empirische Kenntnisse über die Struktur und Arbeitsweise des Nervenapparates zur Verfügung.

Entsprechend spekulativ (und gleichgewichtstheoretischen Annahmen verhaftet) blieben auch die Überlegungen des Physikers und Philosophen Ernst Machs (1830-1916), als er Fechners Stabilitätsprinzip auf den Bereich der Kognition übertrug, wodurch er immerhin die moderne Interpretation der Gestaltwahrnehmung als selbstorganisierte Leistung des neuronal-kognitiven Apparates in ideeller Hinsicht vorbereitete. Gestaltphänomene oder

ner sein berühmtes »psychophysisches Grundgesetz«, auch »Fechnersches Gesetz« genannt - nach dem die subjektive Empfindungsintensität proportional zur Stärke des physikalischen Reizes zunimmt -, als Argument für die Begründung der Psychologie als einer gegenüber der Physik eigenständigen Wissenschaft stark zu machen.

¹¹² J. Müller, *Handbuch der Physiologie des Menschen*, 1834-1840.

»Gestaltqualitäten« als Inhalte psychischen Erlebens bilden bekanntlich das Gegenstandsfeld der Gestaltpsychologie. Mit ihr rückt das Problem ganzheitlichen Gestalterlebens in den Fokus des psychologischen Interesses. Wurde die Psychologie das ganze 19. Jahrhundert hindurch, in Anlehnung an mechanistische Vorstellungen, von der Assoziationspsychologie beherrscht, so drängen zu Anfang des 20. Jahrhunderts ganzheitliche Konzepte gleich mehrfach in den Vordergrund: zum einen durch die Denkpsychologie¹¹³, auf der Suche nach den teleologischen Verlaufsgesetzen des Seelenlebens, zum andern durch die psychologische Gestalttheorie (wichtige frühe Vertreter sind hier neben W. Köhler und K. Koffka etwa M. Wertheimer und Ch. von Ehrenfels). Ausgangspunkt gestalttheoretischer Ansätze ist die Wahrnehmung gesonderter Gestalten als ganzheitlicher Phänomene und nicht mehr ein Konglomerat von Empfindungen, die mosaikartig miteinander verknüpft (assoziiert) werden.

Es war Wolfgang Köhler (1887-1967), der sich an die Lösung eines der Hauptprobleme der (inneren) Psychophysik machte: nämlich die Diskontinuität des zentralnervösen Geschehens (das »Alles-oder-Nichts-Gesetz« der neuronalen Erregungsleitung: ein Neuron ist aktiv oder nicht) mit der Kontinuität des psychischen Erlebens in Einklang zu bringen. In den 1920er Jahren entwickelte Köhler unter Anwendung phänomenologischer Grundsätze und des Isomorphie-Postulats eine »Allgemeine Theorie des psychophysischen

¹¹³ So versuchten etwa die Vertreter der sogenannten »Würzburger Schule« (O. Külpe, N. Ach, K. Bühler, K. Marbe u. a.) das sensualistische und mechanistische Axiom der Assoziationspsychologie, daß Denken nur eine Verknüpfung von Vorstellungen sei, durch den experimentellen (bzw. introspektiven) Nachweis der Existenz eines unanschaulichen und vorstellungsfreien Denkens zu entkräften: die Denk- und Willensakte des Ich seien vielmehr Zielen und Zwecken untergeordnet, von denen determinierende »Tendenzen« ausgingen; seelische Vorgänge seien sinnvoll strukturiert und nicht bloß das Resultat von Assoziationen (vgl. etwa K. Bühler, »Tatsachen und Probleme zu einer Psychologie der Denkvorgänge«, in: *Archiv der Gesellschaft für Psychologie*, Bd. 9, 1907). - An die Vorstellung determinierender Tendenzen konnte die Gestaltpsychologie unmittelbar anschließen, indem sie etwa belegte, daß das Auffinden von Problemlösungen mit einem »Aha-Erlebnis« verbunden sei, als Ausdruck einer plötzlichen erfolgreichen Umstrukturierung der Einzelteile des Problems (vgl. dazu M. Wertheimer, *Produktives Denken*, Frankfurt a. M. 1957). - Auch die späteren Arbeiten von J. Piaget und H. Aebli zur Entwicklung des kindlichen Denkens, in denen kognitiven Selbstorganisationsphänomenen Rechnung getragen wird, haben hier eine ihrer Wurzeln (s. etwa J. Piaget, *Psychologie der Intelligenz*, Stuttgart 1966).

Feldes«.¹¹⁴ Nach dieser Feldtheorie bildet das zentrale Nervensystem (ZNS) einen homogenen elektromagnetischen Leiter, in dem feldförmige und damit kontinuierliche Prozesse ablaufen können. Auf ihrer Grundlage haben Köhler und seine Schüler zahlreiche Experimente durchgeführt und eine Reihe von Gesetzen (Tendenzen) der Gestaltwahrnehmung formuliert (Gesetz der Nähe, Gesetz der Symmetrie, Gesetz der guten Fortsetzung, Prägnanztendenz usw.).¹¹⁵ So tendiere etwa ein psychischer (figurativer) Prozeß, sofern sich selbst überlassen, zu einem stabilen Ordnungszustand mit minimaler Energieverteilung im psychophysischen Feld.¹¹⁶ Für uns wichtig an diesem Beispiel ist, daß Köhler die spontane Ausbildung von Wahrnehmungsmustern auf die Tendenz geschlossener Systeme, ein *finales Gleichgewicht* zu erlangen, zurückführt.¹¹⁷ Damit verfehlt sein Ansatz die für Selbstorganisationsprozesse typischen Merkmale von Offenheit und Ungleichgewichtigkeit der Prozeßstrukturen. Außerdem ist sein Feldbegriff noch zu phänomenologisch orientiert, um die ganzheitlichen Wahrnehmungsfiguren als aus vernetzten neuronalen Mikroprozessen hervorgegangen zu denken. Köhler fehlten einerseits die Begriffe einer nicht-linearen Thermodynamik des Ungleichgewichts und andererseits ein Modell neuronaler Netzwerke, das an die Stelle des psychophysischen Feldes tritt und deren Neuronen Gestaltprozesse interaktiv generieren. Statt dessen wird bei ihm mit quasi-teleologischen »Tendenzen« gearbeitet.

¹¹⁴ Siehe vor allem: W. Köhler, *Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand*, Braunschweig 1920.

¹¹⁵ Vergleiche M. Stadler, »Feldtheorie heute - von Wolfgang Köhler zu Karl Pribram«, in: *Gestalt Theory*, Vol. 3, No. 3/4, 1981, S. 185 ff.

¹¹⁶ Wie kritisch aus heutiger Sicht der *feld*theoretische Ansatz Köhlers zu bewerten ist und wie man ihn gleichzeitig so »modernisieren« kann, daß er in das Konzept einer Selbstorganisationstheorie der Gestaltwahrnehmung paßt, läßt sich nachlesen bei P. Kruse, G. Roth und M. Stadler, »Ordnungsbildung und psychophysische Feldtheorie«, in: *Gestalt Theory*, Vol. 9, No. 3/4, 1987, S. 150 ff.

¹¹⁷ Ebenda, S. 156: »Das einzig gültige physikalische Richtungsprinzip und damit die einzig denkbare systemische Wirktenzenz, die Köhler bei seiner Modellbildung zur Verfügung stand, war die im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik gefaßte allgemeine Entwicklung geschlossener Systeme auf ein finales Gleichgewicht hin.«

Dennoch bleibt es ein Verdienst der klassischen Gestaltpsychologie, auf die schöpferische Produktivität des Denkens aufmerksam gemacht zu haben, darauf, daß in der Konfrontation mit einem neuen Problem die Wahrnehmung regelmäßig neu organisiert wird, wobei Inspiration und Intuition eine hervorragende Rolle spielen: Kantisches Erbe klingt an, wenn der menschlichen Wahrnehmungsfähigkeit das Vermögen zu Kreativität und Konstruktivität (logisches Phantasieren und inneres Probehandeln) zugesprochen wird.¹¹⁸ Wahrnehmung wird nicht länger als bloßes Rezipieren von Außenweltgegebenheiten begriffen, als ein quasi passiver »Abbildungsprozeß«, vielmehr als ein aktiver und spontan die Welterfahrung neu strukturierender Akt. Die spätere, an die Theorie der Selbstorganisation anlehrende philosophische Position des »Radikalen Konstruktivismus« (Maturana/Varela/von Foerster) wird hier ideell vorbereitet.

Gleichermaßen von Bedeutung war der gestaltpsychologische Ansatz in den 1950er Jahren für die Herausbildung einer gänzlich neuen Disziplin: der sogenannten »Kognitionswissenschaft« (im angelsächsischen Kulturbereich als »cognitive science(s)« bezeichnet). Die »Kognitionswissenschaft« (unter Beteiligung von Psychologie, Philosophie, Linguistik, Anthropologie, Neurowissenschaft und »Künstlicher Intelligenz«-Forschung¹¹⁹) besitzt freilich noch andere Wurzeln, von denen die wichtigsten hier kurz angeführt werden sollen. Um die Jahrhundertwende beherrschte zunächst die introspektive Methode die Untersuchung kognitiver Prozesse. Diese ließ sich indes nur schwer an experimentelle Verfahren anschließen, widersprach daher dem positivistischen Geist jener Jahre. Nicht zuletzt in Reaktion auf diesen empirischen Mangel entstand der Behaviorismus, als deren bedeutendste Vertreter I. Pawlow, J. B. Watson, E. L. Thorndike und B. F. Skinner gelten. Die Behavioristen beschränken sich bekanntlich auf die Analyse (bzw. Konditionierung) des beobachtbaren Verhaltens und trachten, die Verwendung mentaler Begrifflichkeiten strikt zu vermeiden. Kognitiven Phänomenen wie Planung, Problemlösen, Vorstellen, Symboloperationen usw. wandten sich die Psychologen massiv erst wieder gegen Ende der 1940er Jahre zu, als deutlich geworden war, daß ausschließlich mit behavioristischen Vorstellungen (nach dem »stimulus-response«-Schema) insbesondere

¹¹⁸ Siehe etwa von M. Wertheimer, *Productive Thinking*, New York 1945.

¹¹⁹ Nach einem Vorschlag des von der Sloan Foundation hg. Berichts *Cognitive Science* (State of the Art Committee), New York 1978.

komplexe Verhaltensweisen - wie Sprechen, Musizieren, Theoretisieren usw. - nicht verstanden werden können. Aber auch assoziationspsychologisch waren die mit solchen komplexen geistigen Tätigkeiten verbundenen höheren cerebralen Prozesse nicht zu erklären: offenbar liegen solchen Aktivitäten schnell ablaufende und strukturell vororganisierte (neuronale bzw. mentale) Vorgänge zugrunde, die nicht nach dem Modell einfacher Reiz-Reaktions-Verkettungen beschreibbar sind. »Verhalten entsteht nicht als Reaktion auf Umweltanstöße, vielmehr gehen zentrale Hirnprozesse voraus, die festlegen, wie ein Organismus komplexes Verhalten ausführt. ... Organisation wird dem Organismus nicht von außen auferlegt, sie entsteht in ihm.«¹²⁰ Eben dies belegen auch die gestaltpsychologischen Befunde.

In dieser Situation kam es zu Versuchen, kognitive Phänomene auf neuartige Weise mit mentalen Begriffen (Intention, Idee, Symbol etc.) anzugehen und dabei neuere neurowissenschaftliche Erkenntnisse einzubeziehen. Die während des Zweiten Weltkriegs entwickelte Kybernetik bot sich als ein Konzept an, auf dessen Hintergrund die cerebralen Prozesse, die an Denkvorgängen und Wissensstrukturen beteiligt sind, modelliert werden konnten: so kamen Norbert Wiener und Julian Bigelow zu dem Schluß, daß es zwischen den hierarchisch organisierten Rückkopplungsaspekten von Waffenkontrollsystemen und den »homöostatischen Prozessen, die dem menschlichen Nervensystem ein zielgerichtetes Handeln ermöglichen, wichtige Parallelen gibt.«¹²¹ Neuropsychologische Untersuchungen bei Kriegsversehrten (etwa von A. Luria in der Sowjetunion) über den Zusammenhang von funktionellen (aphasischen, agnostischen usw.) Störungen und Ausfällen einerseits und von Gehirnläsionen andererseits schienen diese Parallelen zu bestätigen.¹²²

Weitere wichtige Schritte waren: Ausgehend von der Idee der »Turing-Maschine« (1936 von Alan Turing entworfen) ersann John von Neumann die für die technische Entwicklung von Computern folgenreiche Idee des gespeicherten Programms, das der Rechenmaschine die automatisierte Bearbeitung auch neuer Aufgaben ermöglicht. 1943 zeigten Warren S.

¹²⁰ H. Gardner, *Dem Denken auf der Spur - Der Weg der Kognitionswissenschaft*, Stuttgart 1989, S. 25.

¹²¹ Ebenda, S. 27.

¹²² Ebenda, S. 28.

McCulloch und Walter H. Pitts, wie sich die Operationen einer Nervenzelle in Vernetzung mit anderen Neuronen in Form logischer Aussagen (bzw. logischer Schaltungen) darstellen lassen.¹²³ Über diese offensichtlichen Entsprechungen zwischen Regeltechnik und Nervensystem gelang dann N. Wiener 1948 die Formulierung des Nervensystems als eines selbstreferenten, ganzheitlich operierenden und gleichwohl input-offenen Systems:

»Das zentrale Nervensystem erscheint nicht mehr als ein in sich abgeschlossenes System, das Eingaben von den Sinnesorganen erhält und an die Muskeln abführt. Im Gegenteil, einige seiner charakteristischen Handlungen sind nur als Kreisprozesse erklärbar, die vom Nervensystem in die Muskeln übergehen und durch die Sinnesorgane ins Nervensystem zurückkehren, ob diese nun Propriozeptoren oder Organe spezieller Sinne sind. Dies schien uns ein neuer Markstein im Studium jenes Teils der Neurophysiologie zu sein, der nicht allein die Elementarprozesse der Nerven und Synapsen betrifft, sondern das Wirken des Nervensystems als eines geschlossenen Ganzen betrachtet.«¹²⁴

Andererseits war immer noch der Gedanke der Homöostase konzeptionell grundlegend und damit der Weg zu einer Selbstorganisationstheorie des Nervensystems bzw. mentaler Prozesse versperrt.

¹²³ W. S. McCulloch und W. H. Pitts, »A Logic Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity«, in: *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 5, 1943, S. 115 ff. Die Aktivität der Nervenzellen zeigt einen »all-or-none«-Charakter (Neuronen befinden sich entweder im Ruhe- oder im aktiven Zustand, wobei der Übergang von der Ruhe zur Aktivität von der Stimulation durch andere Neuronen abhängt), der sich mit Hilfe der propositionalen Logik analysieren lasse. - Für die spätere Begründung konnektionistischer Selbstorganisationstheorien sollte übrigens auch der von McCulloch 1945 entwickelte Begriff der »Heterarchie« einige Bedeutung erlangen: »Heterarchie« - als Gegenbegriff zu »Hierarchie« - bildet die typische Organisationsstruktur rückkoppelnd vernetzter Systeme, wie eben auch des Gehirns (siehe W. S. McCulloch, »A Hierarchy of Values Determined by the Topology of Nervous Nets«, in: *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 7, 1945, S. 89 ff.).

¹²⁴ N. Wiener, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Cambridge (Mass.) 1948; zit. nach der dt. Ausgabe: *Kybernetik, Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und Maschine*, Reinbek b. Hamburg 1963, S. 28.

Ebenfalls in den 1940er Jahren formulierten Claude Shannon und Warren Weaver ihre bahnbrechende mathematische Informationstheorie, in der Information neben Materie und Energie als dritte Größe eingeführt wird, die für das Verständnis kognitiver Operationen richtungsweisend werden sollte: kognitive Prozesse wurden nun behandelbar *unabhängig* von ihrer jeweiligen materiellen Repräsentation.¹²⁵ Von daher ließ sich die kognitivistische Grundprämisse plausibilisieren, daß kognitive Vorgänge in mentalen (informationalen) Begriffen wie Symbol, Konzept, Idee usw. beschreibbar seien.

Große Bedeutung für die Begründung der neuen Disziplin »Kognitionswissenschaft« sollten die Konferenzen der »Josiah P. Macy Foundation« erlangen, die seit Winter 1944 stattfanden (insgesamt zehn Treffen, ca. einmal im Jahr) und Forscher wie W. S. McCulloch, H. von Foerster, G. Bateson, G. Miller und J. Bruner zusammenführten; auf diesen »Conferences on Cybernetics« wurden wichtige Weichenstellungen für die Entwicklung des Konzepts der Selbstorganisation vorgenommen.¹²⁶ Auf die für die Etablierung der »cognitive science(s)« bedeutsamen Beiträge des Neuropsychologen D. Hebb¹²⁷, des

¹²⁵ C. E. Shannon u. W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana/Ill. 1949.

¹²⁶ Siehe dazu die instruktiven Interview-Äußerungen H. von Foersters in: L. Segal, *Das 18. Kamel oder die Welt als Erfindung - Zum Konstruktivismus Heinz von Foersters*, München/Zürich 1988, S. 231 ff.

¹²⁷ Nach D. Hebb (1959) resultieren die lernabhängigen Veränderungen im Gehirn aus korrelierten Aktivitäten der Neuronen: die wiederholte gemeinsame Aktivierung zweier Nervenzellen stärkt und stabilisiert deren Verbindung (»Hebbsche Regel«). Damit hat er eine der Grundvorstellungen späterer »Konnektionisten« formuliert: kognitive Prozesse beruhen nicht auf symbolischen Verarbeitungsvorgängen, sondern auf Regeln, die eine graduelle Veränderung von Verknüpfungen in kognitiven Systemen bewirken (vgl. F. J. Varela, »Über die Natur und die Natur des Erkennens«, in: H.-P. Dürr und W. Ch. Zimmerli [Hg.], *Geist und Natur*, Bern/München/Wien 1989, S. 90 ff., und neuerdings: ders., *Kognitionswissenschaft - Kognitionstechnik. Eine Skizze aktueller Perspektiven*, Frankfurt a. M. 1990, besonders S. 58 ff.).

Anthropologen G. Bateson¹²⁸, des Entwicklungspsychologen J. Piaget¹²⁹ u. a. soll wenigstens hingewiesen werden.

Wir schließen unsere sehr kursorische Darstellung der Entstehungsgeschichte der Kognitionswissenschaft mit einigen systematischen und kritischen Bemerkungen: Konstitutiv für die Idee der Kognitionswissenschaft ist laut H. Gardner die »Annahme, daß für wissenschaftliche Zwecke das kognitive Handeln des Menschen in Begriffen wie Symbol, Schema, Idee und anderen Formen mentaler Repräsentation beschrieben werden muß«.¹³⁰ Große Uneinigkeit herrsche aber darüber, wie sich auf der Ebene mentaler Repräsentation von Struktur und Prozessen sprechen läßt; auch die Relevanz der Hirnforschung für kognitionswissenschaftliche Untersuchungen sei weitgehend ungeklärt. Dieser Diagnose

¹²⁸ Der Anthropologe, Psychologe, Kommunikations- und Evolutionsforscher G. Bateson (1904-1980), dessen neue ökosystemische Sicht der Lebensprozesse (»Ökologie des Geistes«) in den 1960er und 1970er Jahren einen unschätzbaren Einfluß auf einige Vertreter der modernen Selbstorganisationsforschung (etwa H. von Foerster) ausüben sollte, hatte bereits in frühen Arbeiten Begriffe wie »offenes System«, »Muster« und »Kontext« zu einem neuartigen Konzept des Lernens verknüpft; auch wenn er dabei noch weitgehend von homöostatischen Grundvorstellungen ausging, so lassen seine Arbeiten aus den 1940er und 1950er Jahren doch bereits ein ausgeprägtes Denken in »Netzwerken« erkennen (einen guten Überblick bieten die in dem Sammelband *Ökologie des Geistes*, Frankfurt a. M. 1982, versammelten Aufsätze). Im nächsten Kapitel werden wir noch auf diesen interessanten Forscher zu sprechen kommen.

¹²⁹ Die Rezeption der Arbeiten des Schweizer Psychologen und Biologen J. Piaget zur kognitiven Entwicklung von Kindern und zur »Genetischen Erkenntnistheorie« - z.T. bereits aus den 1930er und 1940er Jahren stammend - hat wesentlich zur Begründung des »Radikalen Konstruktivismus« beigetragen (s. z. B. H. von Glasersfeld, »Einführung in den radikalen Konstruktivismus«, in: P. Watzlawick, *Die erfundene Wirklichkeit*, München/Zürich 1985, S. 16 ff.). Piaget gelangt zu ähnlichen Schlußfolgerungen wie H. Maturana und F. J. Varela: das Bild, das wir uns von der Wirklichkeit machen, ist ein Resultat selbstgesteuerter (selbstorganisierter) kognitiver Prozesse, deren Regeln endogen erzeugt sind, auch wenn erst die Interaktion mit der Umwelt die Selbstorganisation unseres kognitiven Apparates in Gang setzt: die eigengeregelte Entfaltung epistemischer (logisch operativer) Kompetenzen, also unserer intellektuellen und sprachlichen Fähigkeiten - so erkannte Piaget - durchläuft offenbar eine wohldefinierte und universell gültige Stufenfolge, verlangt aber, daß sich das System (der kognitionsfähige Organismus) gegenüber seiner Umwelt sensomotorisch aktiv verhält, sich Irritationen aussetzt und »Erfahrungen« sammelt (vgl. etwa die Arbeiten Piagets in den Bden. 1-3 sowie 8-10 seiner *Gesammelten Werke*, Stuttgart).

¹³⁰ H. Gardner, *Dem Denken auf der Spur*, a. a. O., S. 51.

entsprechen die gravierenden Bedenken, die F. J. Varela, einer der »Väter« der Autopoiese-Theorie, dagegen vorgebracht hat, daß der (klassische) Kognitivismus Kognition als »Berechnung« symbolischer Repräsentationen definiert; zweifelhaft sei vor allem die herrschende Auffassung vom kognitiven Apparat als einer hierarchisch gegliederten »informationsverarbeitenden Maschine«; die gesamte Konstruktion sei zu sehr an der herkömmlicher Computer orientiert (z. B. »hardware« plus »software«, mehrere Kontroll-ebenen); die enorme kognitive Flexibilität des menschlichen Gehirns sei unter diesen Voraussetzungen schwerlich zu begreifen; statt von Symbolen und ihrer lokalisierten Verarbeitung nach Kettenregeln auszugehen, sei es geeigneter, den kognitiven Apparat als ein selbstorganisierendes System netzartig verwobener Komponenten vorzustellen, in dem die Komponenten nicht nur lokal wirksam sein, sondern unter bestimmten Randbedingungen auch global spontan wechselwirken können, ohne daß es einer übergeordneten Verarbeitungseinheit als Steuerungszentrale bedürfe.¹³¹

Varelas Plädoyer für einen »konnektionistischen« Neuansatz der Wissenschaft von der Kognition¹³² - ausgehend von Schlüsselwörtern wie »Vernetzung«, »Selbstorganisation« und »Netzwerkdynamik« -, der auf neuartige Weise das McCulloch-Pittssche Neuronenmodell mit der mathematischen Attraktorentheorie verbindet, ist freilich von dem

¹³¹ F. J. Varela, »Über die Natur und die Natur des Erkennens«, in: H.-P. Dürr und W. Ch. Zimmerli (Hg.), *Geist und Natur*, a. a. O., S. 95 f.

¹³² In seinem jüngst erschienenen Buch *Kognitionswissenschaft - Kognitionstechnik*, (a. a. O., S. 88 ff.) unternimmt Varela den Versuch, selbst den konnektionistischen Ansatz noch einmal zu überholen, indem er - i. S. des »Radikalen Konstruktivismus« - eine »handlungsbezogene Orientierung« einführt: die vernetzten Gehirnprozesse bzw. Kognitionsleistungen eines Lebewesens seien nur aus der Zeitlichkeit seiner gesamten Existenz heraus angemessen zu begreifen: dabei seien sowohl der onto- und phylogenetische als auch der sozio-kulturelle Kontext zu berücksichtigen. »Wirklichkeit« sei ein kognitives Konstrukt (nicht die »Entdeckung« und kognitive »Repräsentation« einer vorgefundenen objektiven Welt), das sich - auf unbestimmte Zeit - als hinreichend »handlungswirksam« (»viabel«) erweisen kann: die kognitiven Eigenschaften lebender Systeme »sind das Ergebnis historischer Abfolgen viabler Kompensationen, die Regularitäten erzeugen« (ebenda, S. 116). An anderer Stelle (S. 111) heißt es resümierend: »Kurz und knapp: So wie der Konnektionismus aus dem Kognitivismus hervorgegangen ist, und zwar aufgrund einer Annäherung an die Funktionsweise des Gehirns, so geht die handlungsbezogene Orientierung noch einen Schritt weiter in die gleiche Richtung und bezieht auch die Zeitlichkeit des Lebensprozesses ein, als Sepzies (Evolution), als Individuum (Ontogenese), und als gesellschaftliches Muster (Kultur).«

hier vorgestellten »kognitivistischen« Konzept durch einen »paradigm shift« getrennt - in ähnlicher Weise, wie sich etwa die Ansätze von H. von Foerster und H. Simon von den Konzepten der klassischen Kybernetik unterscheiden. Die traditionelle Kognitions- wissenschaft bietet ja den interessanten Fall, daß die frühe Bezugnahme auf den Computer die Ausbildung von Selbstorganisationstheorien *zunächst behindert* hat: indem die meisten Vertreter der Kognitionswissenschaft den mit digitalen Symbolen operierenden Computer klassischen Typs zum Modell für die Funktionsweise des menschlichen Erkenntnisapparates erklärten, konnten sie gerade kein Selbstorganisationsmodell des menschlichen Gehirns (bzw. Geistes) entwickeln.¹³³ In den 1940 und frühen 1950 Jahren entschied sich der Hauptstrom der Kognitionswissenschaft unter dem Eindruck der erfolgreichen Entwicklung programmgesteuerter Computer für eine »kognitivistische Orientierung« (nach dem Muster der Symbolrepräsentation und -verarbeitung) und nicht für die zunächst wenig aussichtsreich erscheinende Möglichkeit, geistige Prozesse nach dem Muster komplexer selbstorganisierender Systeme (McCulloch/Pitts) - von denen man noch kaum etwas wußte - zu modellieren.¹³⁴

Inzwischen hat sich die Situation insofern geändert, als man jetzt *umgekehrt* Computer nach dem neuronalen Modell des Gehirns zu konstruieren versucht.¹³⁵ In dieser Phase wird nun auch der Computer (seine »artificial intelligence«) für die Konzeption kognitions-

¹³³ Auch H. Gardner hält es für »paradox«, »daß Wissenschaftler als Folge der strikten Anwendung der Methoden und Modelle aus dem Computerbereich jetzt genauer wissen, wo und wie Menschen diesen prototypischen Computern gerade *nicht* besonders ähneln« (*Dem Denken auf der Spur*, a. a. O., S. 56).

¹³⁴ Dadurch schnitt sich die Kognitionswissenschaft »von ihrem zwar komplexen und undurchschaubaren, aber auch reichhaltigeren Wurzelgeflecht [ab], um als echte Wissenschaft etabliert werden zu können. Das geschieht oft in der Geschichte der Wissenschaften: es ist der Preis, der dafür zu zahlen ist, daß sich aus dem Nebel eines explorativen Stadiums ein Paradigma herauskristallisieren kann« (F. Varela, *Kognitionswissenschaft - Kognitionstechnik*, a. a. O., S. 31).

¹³⁵ »Erst in den späten siebziger Jahren entzündete sich erneut und in explosiver Weise das Interesse an diesen Ideen [der Selbstorganisation] - nach 25 Jahren der Herrschaft der kognitivistischen Orthodoxie (...). Zweifellos hat zu diesem neuen Interesse die parallele Wiederentdeckung der Ideen der Selbstorganisation in Physik und nichtlinearer Mathematik beigetragen« (ebenda, S. 55 f.). Wir werden diese parallelen Entwicklungen in der Thermodynamik (Prigogine) und in der Chaostheorie (Lorenz, Mandelbrot) im nächsten Kapitel ausführlich behandeln.

wissenschaftlicher Selbstorganisationstheorien à la Varela von Bedeutung, da Fortschritte in der Modellierung künstlicher Intelligenz als Belege für das angemessene Verstehen der >wirklichen< Dynamik menschlicher Kognitionen gewertet werden können.

2.8 Kybernetik, Informationsbegriff und Systemtheorie

Eine erst in unserem Jahrhundert entstandene wissenschaftliche Disziplin, die sich in besonderer Weise mit der formalen mathematischen Beschreibung und modellartigen Erklärung von dynamischen Systemen befaßt, ist die Kybernetik. Ihr Gegenstand ist das Prinzip der selbsttätigen Regelung und Steuerung (»feed back«), d. h. die rückgekoppelte Übertragung, Verarbeitung und Rückübertragung von Informationen. Zur allgemeinen Kybernetik, die die grundlegenden Strukturen und Funktionen von Regelsystemen untersucht, gehören die Informations-, Nachrichten- und Signaltheorie, die Automaten-theorie, die Spieltheorie und die Algorithmentheorie. Demgegenüber behandelt die spezielle Kybernetik die Theorie vor allem technischer Systeme (Flugsteuerungssysteme, Rechenautomaten usw.). Als Bionik beschäftigt sich die Kybernetik auch mit den Vorgängen im lebenden Organismus (mit der Übertragung von Nervenimpulsen und Hormonsignalen, der »Expression« genetischer Informationen etc.).

Oben haben wir bereits kurz über die frühen Ansätze von N. Wiener, J. Bigelow und J. von Neumann aus den 1940er Jahren berichtet. In den 1950er Jahren nun sorgten vor allem zwei Bücher für Aufsehen bei den Computer- und Kognitionswissenschaftlern: J. von Neumanns (1903-1957) *The Computer and the Brain*¹³⁶, in dem u. a. die Möglichkeit von Maschinen, sich selbst zu replizieren, behandelt wird, und W. Ross Ashbys (1903-1972) *Design for a Brain*¹³⁷, das - noch stark behavioristisch orientiert - zeigen wollte, wie man aufgrund ausschließlich logischer Axiome eine Maschine konstruieren kann, die lernfähig ist und adaptives Verhalten aufweist. Auf Organismen übertragen, ging es Ashby darum zu demonstrieren, »wie ein Organismus den Übergang von Chaos zu Stabilität vollziehen und

¹³⁶ New Haven 1958.

¹³⁷ New York 1952.

damit seine Überlebenschancen erhöhen kann«.¹³⁸ Schon in früheren Arbeiten hatte Ashby das Nervensystem als »self-organizing« bezeichnet, wobei diesem durch eine »adaptation by trial and error« die sprunghafte Veränderung seines Verhaltens möglich sei.¹³⁹ Nach Ashby besitzen selbstorganisierende Systeme die Fähigkeit zu einer spontanen (»self-induced«) Reorganisation ihrer Strukturen.¹⁴⁰ Angenommen wird, daß die »Überlebensfähigkeit« solcher Systeme, also etwa von Organismen, von dem vorhandenen »pool« an selbstregulatorischen Anpassungsmöglichkeiten (der »requisite variety«¹⁴¹) abhängig sei. Obwohl Ashby mit seinen Überlegungen heutigen Ideen der Selbstorganisation in mancher Hinsicht nahekommt, darf man doch nicht übersehen, daß er kybernetischen Homöostase- und behavioristischen Adaptionen-Vorstellungen weitgehend verhaftet bleibt. »Selbstorganisation« ist bei ihm lediglich ein Aspekt struktureller Modifikation, mehr ein »Mittel«, die grundlegenden Systemparameter durch Variation des Systemverhaltens innerhalb eines zulässigen Spielraums zu stabilisieren: seine Systeme erzeugen keine neuen Verhaltensmöglichkeiten, sondern realisieren selektiv geeignete (»viable«) Möglichkeiten aus ihrem jeweils vorhandenen »variety pool«. Ashby hält also letztlich am Primat der homöostatischen Stabilisierung komplexer Systeme fest (für seine »Ultrastabilität« ist Evolution kein Thema) und orientiert ihre Anpassungsleistungen an äußeren Umweltbedingungen, die als Kontrollparameter fungieren. Dies hat seine Gründe in der damals dominanten allgemeinen Auffassung vom Wesen kybernetischer Prozesse.

Insgesamt stand in den Anfängen der Kybernetik (in den 1940er und 1950er Jahren) der regelungstheoretische Aspekt der *negativen* Rückkopplung im Vordergrund der Betrachtung: das Hauptinteresse galt der iterierten Angleichung des »Istwerts« eines kyberneti-

¹³⁸ H. Gardner, *Dem Denken auf der Spur*, a. a. O., S. 38.

¹³⁹ W. Ross Ashby, »The Physical Origin of Adaptation by Trial and Error«, in: *Journal of General Psychology*, 32, 1945, S. 13 ff.

¹⁴⁰ W. Ross Ashby, »Principles of the Self-Organizing Dynamic System«, in: *Journal of General Psychology*, 37, 1947, S. 125 ff.

¹⁴¹ Siehe vor allem W. Ross Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, New York 1956; sowie von dems. Autor, »Requisite variety and its implications for the control of complex systems«, in: *Cybernetica*, 1, 1958, S. 83 ff. Über je vielfältigere Verhaltensmöglichkeiten ein Organismus verfügt, um sich einer sich wandelnden Umwelt anpassen zu können, desto sicherer überlebt er.

schen Systems (beispielsweise eines Thermostaten) an seinen von außen (durch den Konstrukteur) vorgegebenen »Sollwert« im Falle von »Störungen«; das System sollte den gewünschten »Kurs halten« und allen Kursabweichungen mit Hilfe eines festen Reaktionsmusters selbsttätig »gegensteuern«. »Homöostase« und »Ultrastabilität« waren die anpassungstheoretischen Grundtermini. Wiederum - wie in der klassischen Thermodynamik - ging es um die Aufrechterhaltung von Gleichgewichten (etwa einer gleichmäßigen, voreingestellten Raumtemperatur durch die Regulationstätigkeit des Thermostaten). Klassischerweise lagen derartige Vorstellungen bereits dem Prinzip des Fliehkraftreglers bei der Dampfmaschine (zur Vermeidung explosiven Überdrucks im Kessel) zugrunde. Der amerikanische Mathematiker und Kybernetiker N. Wiener (1894-1964) schuf hierzu die technisch folgenreiche mathematische Verallgemeinerung (1948), bei der er u. a. auf informationstheoretische Überlegungen aus der Dissertation seines Schülers C. Shannon zurückgriff.

Natürlich kannte man auch den Effekt der *positiven* Rückkopplung in kybernetischen Systemen, doch wurde dieser zunächst nur unter dem Gesichtspunkt einer für das System *destruktiven* Aufschaukelung von Abweichungen gesehen und eben nicht als mögliche Quelle von neuer Ordnung und höherer Systemkomplexität - als Ergebnis eines quasi »evolutionären Lernprozesses«. Einwirkungen auf das System, oder auch interne Fluktuationen, wurden als unliebsame Störungen gewertet, die es zu vermeiden galt. Dieser weitgehenden Vernachlässigung der »konstruktiven« Rolle positiv rückkoppelnder Prozesse in der Kybernetik entsprach in der allgemeinen Informationstheorie, daß man die Bedeutung von »noise« (Rauschen) als Ursprung neuartiger Information zunächst nicht einzuschätzen bzw. mathematisch angemessen zu behandeln vermochte. Von heute aus betrachtet, läßt sich sagen, daß die damalige Kybernetik eine solche »1. Ordnung« war, während die spätere »Kybernetik 2. Ordnung« die (Selbst-)Verstärkung von Abweichungen (Maruyama¹⁴²) betont, höherstufige Lernprozesse (»Lernen des Lernens«) kennt, von der

¹⁴² Siehe vor allem M. Maruyama, »The Second Cybernetics: Deviation-Amplifying Mutual Causal Processes«, in: *American Scientist*, 51, 1963, S. 164 ff.; wieder abgedruckt in: W. Buckley (Hg.), *Modern System Research for the Behavioral Scientist*, Chicago 1969, S. 304 ff.

Analyse beobachteter Systeme zu der (sich selbst) *beobachtender* Systeme überwechselt¹⁴³ und unter den Steuerungsvorgängen solche selbstreferenten Systemprozesse auszeichnet, in denen die Systeme ihre Sollwerte in Grenzen selbst festlegen.

Die »Kybernetik der Anpassung und des Gleichgewichts« wird um eine »Kybernetik der Entwicklung« ergänzt, in der es um die (beobachterabhängige) »Organisation der Organisation«, um die Entwicklung (Emergenz) neuer Eigenschaften und Potentiale überlebensfähiger Systeme geht. Selbstorganisierende kybernetische Systeme, wie sie heute Gegenstand der »KI-Forschung« sind, werden nicht durch Homöostase, Außensteuerung und Vorhersehbarkeit ihres Verhaltens bestimmt. Insofern ist ihre Konstruktion orientiert an den Eigenschaften natürlicher und sozialer Systeme, die sich in der Regel selbst konstituieren, steuern, erhalten und entwickeln (Transformation und Evolution). Von derartigen Vorstellungen waren die klassischen kybernetischen Modelle, deren Operationsweise vorgegebenen Algorithmen gehorcht, weit entfernt. Bestenfalls kann man den frühen Arbeiten von Ashby eine Art Brückenfunktion zuschreiben - so wie bereits Bertalanffys »Theorie offener Systeme«. Erst Jahre später (1961) fügte N. Wiener in der Neuauflage seiner 1948 erschienenen »Cybernetics« zwei ergänzende Kapitel über lernende und sich selbst reproduzierende Maschinen bzw. über selbstorganisierende Systeme (am Beispiel der Ausbildung von Gehirnwellen) hinzu und bekannte rückblickend:

»Die einfachen linearen Rückkopplungen, deren Untersuchung für das Aufmerksamwerden der Wissenschaftler auf die Bedeutung kybernetischer Forschungen so wichtig war, werden jetzt als wesentlich weniger einfach und als weit weniger linear angesehen, als sie zunächst erscheinen. - Tatsächlich reichten in den ersten Anfängen der elektrischen Schaltungstheorie die mathematischen Hilfsmittel für die systematische Behandlung von Netzwerken

¹⁴³ H. von Foerster hat dies auf den Grundsatz gebracht: »Alles was gesagt wird, wird von einem Beobachter gesagt« (übersetzt aus: »Cybernetics of cybernetics«, in: K. Krippendorff [Hg.], *Communication and control in society*, New York 1979, S. 5). Die Kybernetik wird auf sich selbst angewandt, indem der Beobachter in die Beschreibung des Systems miteingeschlossen wird; beobachtete Systeme sind Produkte beobachten-der Systeme; die klassische Dyade »System-Umwelt« wird zur Triade »System-Umwelt-Beobachter« erweitert.

nicht über das lineare Aneinanderreihen von Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten hinaus. (...) Lange vor der Veröffentlichung der ›Cybernetics‹ begann man sich darüber klarzuwerden, daß das Studium der nichtlinearen Netzwerke (so wie wir sie in vielen Verstärkern, in Spannungsbegrenzern, bei Gleichrichtern und ähnlichem finden) sich nicht ohne weiteres in diesen Rahmen fügte. Dennoch wurden, in Ermangelung besserer Methoden, viele Versuche unternommen, die linearen Begriffe der älteren Elektrotechnik weiter auszudehnen¹⁴⁴; so weit, daß die neueren Schaltungstypen hinreichend mit jenen Mitteln beschrieben werden konnten. - Als ich etwa 1920 zum M.I.T. kam, war es üblich, die Fragen nach dem Verhalten nichtlinearer Schaltungen so zu stellen, daß man versuchte, den Begriff der Impedanz so weit zu fassen, daß er lineare und auch nichtlineare Systeme umfaßte. Das Ergebnis war, daß die Theorie der nichtlinearen elektrischen Schaltungen allmählich in einen Zustand geriet, vergleichbar dem der letzten Stadien des Ptolemäischen Systems der Astronomie, in dem Planetenkreis auf Planetenkreis getürmt wurde, Korrektur auf Korrektur, bis dieses ungeheure Flickwerk unter seinem eigenen Gewicht zusammenbrach.«¹⁴⁵

Wie stand es nun - vor dem Einsatz der modernen Selbstorganisationstheorie - angesichts dieser Vorgaben von Kybernetik und Informationstheorie einerseits und des Entwicklungsstandes der Thermodynamik andererseits um die Begründung einer allgemeinen Systemtheorie? Wiederum können wir hier nur Schlaglichter werfen. Dazu wollen wir noch einmal auf Bertalanffy zurückkommen, der in seinen späteren Arbeiten - durchaus

¹⁴⁴ Dieser Hinweis Wieners bestätigt die Vermutung, daß die frühzeitige Entwicklung von Selbstorganisationstheorien sowohl durch einen Mangel an geeigneten mathematischen Methoden als auch durch den Konservatismus disziplinärer Forschungstraditionen verhindert wurde.

¹⁴⁵ Zitiert aus dem Vorwort der deutschen Übersetzung der 2. Auflage der *Cybernetics* unter dem Titel: *Kybernetik - Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und Maschine*, a. a. O., S. 9 f. Die abschließenden Bemerkungen Wieners erinnern frappant an jene Beschreibung, die Th. S. Kuhn für Situationen kurz vor dem Zusammenbruch eines alten Paradigma bzw. des Übergangs zu einem neuen Paradigma gegeben hat: die Vertreter des alten Paradigmas ›retten‹ sich von Hilfshypothese zu Hilfshypothese, anstatt den sich akkumulierenden Problemen durch das Wagnis eines radikalen Neuansatzes zu begegnen.

auch mit Blick auf die Schwächen der Köhlerschen Gestaltpsychologie sowie in bewußter Abgrenzung zur klassischen Kybernetik - den Weg zu einer Ungleichgewichts-Thermodynamik gewiesen hat.

Bertalanffy ging es letztlich um die Begründung einer »Allgemeinen Theorie offener Systeme« bzw. einer »Allgemeinen Systemtheorie«¹⁴⁶. Offene Systeme lassen sich ganz allgemein von geschlossenen Systemen auf folgende Weise unterscheiden: Ein geschlossenes System vermag keine Arbeit zu verrichten; dies vermögen nur offene Systeme, denen Energie entnommen werden kann, denen aber auch zur Aufrechterhaltung ihres »dynamischen Pseudogleichgewichts« ständig Energie wieder zugeführt werden muß.¹⁴⁷ Nur offene Systeme sind also arbeitsfähig und können aktiv ihre Ordnung (Struktur und Dynamik) bewahren. Ein solcher andauernder Ordnungszustand ist thermodynamisch betrachtet von hoher statistischer Umwahrscheinlichkeit: »Organismen entwickeln sich im Sinne abnehmender Wahrscheinlichkeit und steigender Differenzierung.«¹⁴⁸ Aus der systemischen Offenheit von Organismen lassen sich die »fundamentalen Kennzeichen des Lebens: Stoffwechsel, Wachstum, Entwicklung, Selbstregulation, Reaktion auf Reize, spontane Aktivität usf.«¹⁴⁹ *prinzipiell* verstehen und damit die sonst unlösbaren Probleme des mechanischen »Maschinenmodells« des Lebens - das Problem der Entstehung der Maschine, seiner Regulation und des Wechsels seiner Bestandteile¹⁵⁰ - umgehen; auch wenn dabei die *spezifischen Mechanismen* der einzelnen Lebensprozesse (zumal unterschiedlicher Lebewesen) auch weiterhin erklärungsbedürftig bleiben.

Bertalanffy hat auch durchaus die wesentlichen Unterschiede des Modells offener Systeme zum kybernetischen Modell gesehen: während er die dynamische Wechselwirkung der Komponenten zur Grundlage des offenen Systems erklärt - »die Theorie des

¹⁴⁶ Siehe vor allem L. v. Bertalanffy, *General System Theory*, New York 1968.

¹⁴⁷ Ebenda, S. 524.

¹⁴⁸ L. v. Bertalanffy, »Das Modell des offenen Systems«, in: *Nova Acta Leopoldina. Biologische Modelle*, 33, 1969, S. 78.

¹⁴⁹ Ebenda, S. 81.

¹⁵⁰ Ebenda, S. 75.

offenen Systems ist eine verallgemeinerte Kinetik und Thermodynamik«¹⁵¹ -, beruht das kybernetische Modell auf dem Regelkreis (Rückkopplung und Information): der Regelmechanismus ist ein thermodynamisch und kinetisch geschlossenes System, das keinen Stoffwechsel besitzt. Aus der Differenz beider Modelle läßt sich auch verstehen, warum in offenen Systemen eine Zunahme von Ordnung und Information und zugleich eine Abnahme von Entropie möglich ist, während »im geschlossenen Regelmechanismus ... Information nur abnehmen, nicht zunehmen, d. h. Information ... sich in »Lärm« verwandeln (kann), aber nicht umgekehrt«; das kybernetische Modell mag daher für die Darstellung »sekundärer« Regulationen (die auf gegebenen strukturellen Anordnungen basieren) hervorragend geeignet sein, es versagt jedoch bei der Beschreibung »primärer« Regulationen, die der freien Dynamik im offenen System entspringen und dasselbe »auf Grund der Bedingungen im System von einem weniger geordneten zu einem mehr geordneten Zustand übergehen« lassen.¹⁵² Dies ist die Stelle, an der die Überlegungen des »späten« Bertalanffy sich an die Ideen des »frühen« Prigogine (sein »Theorem der minimalen Entropieproduktion« von 1945¹⁵³) anschließen lassen; wir befinden uns damit bereits im unmittelbaren Vorspiel zur Theorie selbstorganisierender Systeme.

»Die bisher herrschende mechanistische Naturauffassung bestand in der Auflösung des Geschehens in lineare Kausalketten, einer Konzeption der Welt als Ergebnis von Zufällen oder als physikalisches und darwinistisches »Würfelspiel« (Einstein), der Reduktion biologischer Vorgänge auf augenblicklich aus der unbelebten Natur bekannte physikalische Gesetze. Dem gegenüber treten in der Theorie offener Systeme (und derer weiterer Generalisierung in der allgemeinen Systemtheorie) Prinzipien der multivariablen Wechselwirkung (z. B. Reaktionskinetik, Flüsse und Kräfte in der irreversiblen Thermodynamik), eine dynamische Organisation von Prozessen und eine mögliche Erweiterung der physikali-

¹⁵¹ Ebenda, S. 82.

¹⁵² Ebenda, S. 82 f. Bertalanffy hat hier natürlich die »Kybernetik 1. Ordnung« vor Augen.

¹⁵³ Siehe die Darstellung in I. Prigogine, *Etude thermodynamique des phénomènes irréversible*, Liège 1947.

schen Gesetzmäßigkeiten bei Einbeziehung des biologischen Bereichs in Erscheinung. Diese Entwicklungen bilden daher einen Teil einer gegenwärtigen Neuformung des wissenschaftlichen Weltbildes.«¹⁵⁴

Daß hiermit ein umfassender Umschwung in der Grundauffassung der Wissenschaften eingeleitet sein könnte, darauf hatte Bertalanffy bereits Ende der 1950er Jahre hingewiesen: Parallele Strömungen wie die allgemeine Systemtheorie, der es auf der Basis identischer Systemprinzipien um das Auftreten struktureller Ähnlichkeiten oder sogenannter »Isomorphien« auf sonst völlig verschiedenen Gebieten gehe, »die Informationstheorie, die Kybernetik, die Spiel- oder game-Theorie, die operationelle Forschung und andere« Forschungszweige (Bertalanffy verweist hier auch auf die gestalttheoretischen Vorstellungen W. Köhlers und A. Lotkas »Physical Biology«)¹⁵⁵ sind nicht mehr - wie die klassische Physik - an der Entwicklung einer »Theorie der unorganisierten Kompliziertheit«, sondern statt dessen an dem »Problem ... der organisierten Kompliziertheit«, an Organisation, Ganzheit, Gerichtetheit von Prozessen, Differenzierung usw. interessiert: »Ein einheitliches Weltbild kann basiert werden, nicht auf die möglicherweise trügerische und sicher heute unerreichbare Reduzierung aller Wirklichkeitsschichten auf die Physik, sondern vielmehr auf die Isomorphie, die Gesetzmäßigkeiten in verschiedenen Gebieten und Schichten der Wirklichkeit aufweisen.«¹⁵⁶ Wo die klassischen Denkformen uns im Stich lassen, nämlich beim Verständnis der »Wechselwirkungen einer größeren, aber begrenzten Zahl von Elementen oder Prozessen«, da würden neuartige mathematische Denkmittel weiterhelfen, wie sie etwa »in der von Shannon begründeten Informationstheorie oder der sogenannten game-Theorie, der Theorie der Spiele und der Konkurrenz nach von Neumann« vorliegen.¹⁵⁷ Die hier visionär geforderte Einheit eines neuen wissenschaftlichen Weltbildes zu realisieren, blieb (oder bleibt) allerdings der Theorie der Selbstorganisation vorbehalten.

¹⁵⁴ L. von Bertalanffy, »Das Modell des offenen Systems«, a. a. O., S. 85.

¹⁵⁵ L. v. Bertalanffy, *Allgemeine Systemtheorie*, a. a. O., S. 8.

¹⁵⁶ Ebenda, S. 9 f.

¹⁵⁷ Ebenda, S. 10 f.

3 Sozialwissenschaftlicher Vorlauf

Zur Illustration der Spannweite des sich ankündigenden Umdenkens in der Wissenschaft verweist Bertalanffy auf ein Buch des Nationalökonom K. Boulding, *The Organizational Revolution* (1955), in dem eine Reihe von »eisernen Gesetzen« der Organisation entwickelt werden: von Interesse ist hier vor allem Bouldings »Gesetz der Unstabilität«, wonach sich viele Organisationen nicht in einem Gleichgewicht befinden, sondern Fluktuationen zeigen, die den Schwankungen in wirtschaftlichen Konjunkturzyklen, aber auch der Individuenzahlen biologischer Arten ähnlich sind. Ferner stellt Boulding das »Gesetz der Oligopole« auf, demgemäß die Beziehungen zwischen einander konkurrierenden Organisationen umso instabiler würden, je mehr die Zahl dieser Organisationen abnehme. »Solange daher soziale Systeme verhältnismäßig klein und zahlreich sind, können sie in irgendeiner Form der Koexistenz durchkommen. Wenn aber nur wenige oder nur ein einziges Paar übrigbleibt, wie in den gigantischen politischen Blöcken der Gegenwart, dann werden Konflikte katastrophal.«¹⁵⁸ Für uns ist daran interessant, daß sich unabhängig von Bertalanffy - aber dazu parallel - auch in Wissenschaftsgebieten, die fernab der Biologie und Physik liegen, Tendenzen einer Umorientierung des Denkens ankündigen, die in die Richtung einer Theorie der Selbstorganisation gehen, insofern hier Instabilität, Wechselwirkung und organisationale Dynamik als Motor für Veränderungen thematisiert werden (bei Boulding allerdings vorrangig »destruktiver Veränderungen«, während Bertalanffy auch mit Übergängen zu höheren Ordnungszuständen rechnet).

Nun haben innerhalb der Sozialwissenschaften, auf die wir abschließend einen Blick werfen wollen, Selbstorganisationsphänomene schon immer ein gewisses Interesse hervorgerufen: wir haben darauf bereits hingewiesen, als wir den Evolutionismus des 19. Jahrhunderts behandelten (Spencer, Marx, Engels u. a.). So hat etwa E. Durkheim (1858-1917) die Entstehung der gesellschaftlichen Arbeitsteilung als Folge von Prozessen des Bevölkerungswachstums beschrieben, da dieser eine Verschärfung des Kampfes ums Überleben mit sich bringe: es ergebe sich eine Konkurrenzsituation, die - falls Migration

¹⁵⁸ Ebenda, S. 12.

keinen Ausweg bietet - zu einer relativen Schwächung des »kollektiven Bewußtseins« und der entsprechenden sozialen Kontrollen führe: normativ festgefügte Verhaltensweisen würden so tendentiell aufgelöst, wodurch Individuen im modernen Sinne erst entstehen könnten. Damit aber sei die gesellschaftlichkulturelle Voraussetzung dafür geschaffen, daß arbeitsteilige Beziehungen zwischen »freien« Bürgern an die Stelle alter solidarischer Bindungen treten können.¹⁵⁹ Arbeitsteilung und die durch sie bewirkte Steigerung der ökonomischen Produktivität ist nach Durkheim also keinesfalls als Ergebnis individueller Entscheidungen nach Maßgabe eines Nutzenkalküls zu betrachten - darin nimmt er eine zu dem Utilitaristen Spencer entgegengesetzte Position ein -, sondern als Resultat kollektiver Wandlungsprozesse. Zurecht gilt Durkheim daher als einer der Begründer des »methodologischen Kollektivismus«: nicht Individuen konstituieren die Gesellschaft, sondern die Gesellschaft konstituiert die Individuen, ihr Erleben, Denken und Handeln. Freilich war damit noch lange kein hinreichendes Verständnis der den kollektiven Selbstorganisationsprozessen zugrundeliegenden Mechanismen gewonnen.

Besonders in der Sozialpsychologie und Gruppensoziologie hat man die Entstehung von (kleineren) sozialen Einheiten häufig als spontan und selbsttätig beschrieben: die Etablierung von Normen, Gruppenregeln, Wertpräferenzen und Rollen- bzw. Positionsmustern erfolge interaktiv im Rahmen kollektiver Handlungsprozesse; und zwar weitgehend unabhängig von den individuellen Absichten und Vormeinungen der Mitglieder. Für die Beschreibung der Entstehung und Erhaltung von Gruppen würden dabei keine externen (gruppenfremden) Elemente benötigt. Aus der reichhaltigen frühen gruppensoziologischen und -psychologischen Literatur¹⁶⁰ sei hier nur das Modell von G. C. Homans herausgegriffen, in dem bereits mit für die Selbstorganisationstheorie so wichtigen Kategorien wie Umweltoffenheit, systemische Generativität und Koevolution

¹⁵⁹ E. Durkheim, *De la division du travail social. Etude sur l'organisation des sociétés supérieures*, (1893) Alcan, 9. Auflage, 1973.

¹⁶⁰ Ohne nähere Qualifizierung sei hier verwiesen auf Autoren wie R. F. Bales, A. P. Bates, Ch. H. Cooley, L. Festinger, Th. M. Mills, J. E. Moreno, T. Parsons, E. A. Shils und Ph. E. Slater. In der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts haben sich vor allem amerikanische Soziologen und Psychologen dem Gegenstand Gruppe zugewandt; vielleicht deshalb, weil damals in dem klassischen Einwandererland USA Gruppen und »Communities« von jeher wichtiger schienen als große gesellschaftliche Zusammenhänge.

(wenn auch nicht mit diesen Termini) gearbeitet wird: so untersucht Homans die reziproken Beziehungen zwischen dem System der institutionellen Normen einer Gruppe (»äußeres System«) und dem gruppeninternen Interaktionskontext (»inneres System«): »Das äußere System wird als ein Gruppenverhalten vorgestellt, das der Gruppe das Überleben in einer Umwelt ermöglicht, das innere System dagegen als das Gruppenverhalten an sich, ... , das von den Gruppenmitgliedern im Laufe ihres Zusammenlebens entwickelt (wird).«¹⁶¹ Der »koevolutive« Zusammenhang ist dabei der, »daß das innere System ständig aus dem äußeren hervorgeht und sich kontinuierlich rückkoppelt, um das äußere System zu modifizieren oder - besser gesagt - um das soziale System als Ganzes auf etwas »mehr« einzuschwingen, als es das äußere System war, mit dem wir begannen.«¹⁶² Im ganzen jedoch verbleibt auch der Homanssche Ansatz innerhalb der Grenzen des »interaktionistischen Paradigmas«.

Auch wußte man allgemein in der Soziologie, daß einmal gesetzte Regeln des Sozialverhaltens keineswegs stabil bleiben müssen, sondern mehr oder minder kontinuierlichen Wandlungen unterliegen (»sozialer Wandel«), also evolvieren können. Doch standen derartige Prozesse der sozialen Selbstorganisation lange Zeit keineswegs im Zentrum des soziologischen und sozialpsychologischen Interesses.¹⁶³ Hinzu kommt, daß man gesellschaftliche Veränderungen häufig aus dem Vorliegen bestimmter Determinanten der allgemeinen Entwicklung (Trends, übermächtigen Faktoren oder gar »historischen Gesetzen«) nach dem Muster quasi-logischer Deduktionen erklären wollte oder mehr aus der Perspektive möglicher Re-Stabilisierung betrachtete, wobei soziale Fluktuationen primär als Abweichungen (»Devianzen«) oder Störungen gewertet wurden, denen es gegenzusteuern galt: in diesem Falle stand der Gesichtspunkt der Stabilität von Zuständen, der Erhaltung von Gleichgewichten (»sozialer Frieden« etc.) und der »sozialen Kontrolle« im Vordergrund des analytischen Interesses. Leitend war dabei - nicht zuletzt unter dem

¹⁶¹ G. C. Homans, *Theorie der sozialen Gruppe*, Opladen 1976, S. 124 (im amerik. Original: *The Human Group*, New York 1950).

¹⁶² G. C. Homans, »Systeme beobachtbaren Verhaltens«, in: K. H. Tjaden (Hg.), *Soziale Systeme: Materialien zur Dokumentation und Kritik soziologischer Ideologie*, Neuwied 1971, S. 130.

¹⁶³ Außer gelegentlich bei der Deskription von Kleingruppen.

Eindruck klassisch-kybernetischer Vorstellungen - die »adaptionistische« Perspektive strukturellen Wandels: »Die meisten dieser Diskussionsbeiträge betrachten soziale Systeme als gänzlich unfähig, eine fundamentale Transformation ihrer eigenen Strukturen zustande zu bringen; sie behaupten, daß die strukturelle Transformation primär durch die Tatsache bedingt ist, daß diese Systeme kontinuierlich von ungestümen, unvorhersehbaren äußeren Kräften hin- und hergestoßen werden.«¹⁶⁴ »Endogenetische« Erklärungsversuche bildeten eher die Ausnahme und waren häufig an darwinistischen Modellen orientiert (dies gilt auch für eine Reihe prominenter Ansätze zur Erklärung »wissenschaftlicher Revolutionen«: vor allem S. Toulmin¹⁶⁵).

Aber auch dort, wo der Gedanke einer gesellschaftlichen Entwicklung *aus sich heraus* ernstgenommen und - im Hinblick auf evolutionäre Chancen - positiv gefaßt wurde, ohne gleich auf sozusagen »schicksalhaft« wirkende Entwicklungsfaktoren zurückzugreifen, kam es zwar gelegentlich zu Begriffsprägungen, die an das Vokabular der modernen Selbstorganisationstheorien erinnern, doch blieb das Niveau der theoretischen Durchdringung eigentümlich niedrig; vor allem, solange die Analyse sich im Vorfeld der Systemtheorie bewegte, etwa auf einen am individuellen Akteur orientierten Handlungsbegriff fixiert blieb. Erst die diversen Theorien sozialer Systeme im Anschluß an T. Parsons¹⁶⁶ haben hier einiges verändert und dem Verständnis der Konstitution sozialer Einheiten (etwa Gruppen, Verbände, funktionale Systeme) soziologisches Neuland erschlossen. So war etwa T. Parsons »für eine individualistischsubjektive Handlungstheorie nicht zu gewinnen. Er hätte die naive Annahme, daß es letztlich immer Individuen sind, die handeln, nicht geteilt, sondern die Auffassung vertreten, daß die Emergenz von Handlung im Laufe der Evolution

¹⁶⁴ M. Guessous, »Probleme der Instabilität sozialer Systeme«, in: K. H. Tjaden (Hg.), *Soziale Systeme: Materialien zur Dokumentation und Kritik soziologischer Ideologie*, Neuwied 1971, S. 233.

¹⁶⁵ Siehe etwa S. Toulmin, *Human Understanding*, Princeton 1972.

¹⁶⁶ Siehe vor allem seine frühen grundlegenden Schriften: *The Structure of Social Action*, New York 1949; *Toward a General Theory of Action*, New York 1951; und zus. mit N. J. Smelser, *Economy and Society*, London/New York 1956; sowie aus seiner »mittleren« Schaffensperiode: *Societies*, Englewood Cliffs 1966 und *Sociological Theory and Modern Society*, New York 1967. Bezeichnenderweise hat sich auch Parsons frühzeitig mit gruppen- und familiensoziologischen Fragestellungen beschäftigt.

zur Ausdifferenzierung von Teilsystemen, unter anderem auch von personalen Systemen, führt.«¹⁶⁷

Dennoch hat erst der explizite Anschluß an die in den Naturwissenschaften entstandenen Selbstorganisationstheorien (und deren gegenstandsspezifische »Zurichtung« auf soziale Entitäten) zur Ausbildung sozialwissenschaftlicher Konzepte der Selbstorganisation geführt (wofür N. Luhmann das paradigmatische Modell bildet¹⁶⁸).

Ohne eine solche - gleichwohl spezifizierende oder modifizierende - Anknüpfung an naturwissenschaftliche Selbstorganisationsmodelle bleibt die soziologische Rede von »sozialer Selbstorganisation« weitgehend unerklärt oder mehr metaphorisch: sie erreicht nicht das Niveau einer soziologischen Theoriebildung, sondern verfährt bestenfalls deskriptiv oder phänomenologisch: Selbstorganisation erscheint als krudes Faktum, dessen innere Struktur (Mechanismen) nicht verstanden sind; es bleibt bei bloßen Beschwörungsformeln und »Losungsworten« ohne größeren Erklärungswert. Noch bei einem so bedeutenden Soziologen wie A. Etzioni ist dies sichtbar: in seinem Buch *Die aktive Gesellschaft*¹⁶⁹ beschreibt er Gesellschaften als Systeme, die ihren Wandel aus sich selbst heraus generieren, indem sie alte Struktur- und Wertemuster in neue transformieren. Die dabei wirksamen Mechanismen der kollektiven Reorganisation bleiben indes unbestimmt: der Übergang der alten stabilen Ordnung in eine instabile Phase und der anschließende Umschlag in ein neues stabiles »Ordnungsregime« werden in einer phänomenologischen Sprache analysiert, auch wenn dem Autor durchaus eine systemevolutionäre Perspektive zugebilligt werden kann.

Insgesamt hat man sich in den Sozialwissenschaften schwer getan, komplexe dynamische Prozesse als solche ernst zu nehmen, ihnen keine »reduktionistische« Gewalt anzutun, die evolutionäre Bedeutung »kritisch« werdender Fluktuationen anzuerkennen, synergistischen Effekten Rechnung zu tragen und damit makrosoziale Veränderungen als Ergebnis

¹⁶⁷ N. Luhmann, »Neue Politische Ökonomie«, in: E. Boettcher, Ph. HerderDorneich u. K.-E. Schenk (Hg.), *Jahrbuch für Neue Politische Ökonomie*, Bd. 1-3, *Soziologische Revue*, Nr. 8, Tübingen 1985, S. 115.

¹⁶⁸ Siehe seine monumentale Arbeit *Soziale Systeme*, Frankfurt a. M. 1984, die sich explizit an die Theorie autopoietischer Systeme anschließt.

¹⁶⁹ Opladen 1975.

eines Zusammenwirkens zahlreicher mikrosozialer Prozesse unter besonderen Randbedingungen zu interpretieren. So verwundert es nicht, daß in den Sozialwissenschaften (besonders deutlich in der Ökonomie) lange Zeit versucht wurde, interne Systemvorgänge und deren Outputs als durch spezifische Umwelt-Inputs determinierte Wirkungen zu analysieren und darauf rationalistische Planungskonzepte aufzubauen (von der Wirtschafts- über die Bildungs- bis hin zur Familienplanung), mit deren Hilfe man glaubte, unintendierte Folgen von sozialen Prozessen vermeiden und politisch wünschbare Entwicklungen steuern zu können. Eigentlich haben erst die unübersehbar werdenden Fehlleistungen derartiger interventionistischer Ansätze jene häufig anzutreffende »Planungsmüdigkeit« erzeugt und der Aufgabe einfacher reduktionistischer Erklärungsmodelle zugearbeitet, die das notwendige »Vakuum« für theoretische Neuansätze schaffen, in dem sich nunmehr Selbstorganisationskonzepte ansiedeln können.

4 Schlußfolgerungen

Man kann die Entstehung von Konzepten der Selbstorganisation mit einigem Recht als die dritte große wissenschaftliche Revolution dieses Jahrhunderts nach der Formulierung der Relativitätstheorie und der Quantentheorie bezeichnen; man kann sie aber auch als die *einzige* theoretische Großinnovation seit der »kopernikanischen Wende« ansehen, insofern die Relativitäts- und die Quantentheorie nur »Korrekturen der Newtonschen Theorie und der Elektrodynamik [waren], die die Grundbehauptung des mechanistischen Weltbildes, die Determiniertheit, nicht angriffen«; die neuen Theorien der Selbstorganisation und speziell des deterministischen Chaos aber sind »im Begriff, dieses Weltbild umzustoßen und durch ein evolutionäres zu ersetzen«.¹⁷⁰ Die einstmals als »Dreckeffekte« geltenden Abweichungen vom strengen Determinismus sind mit ihnen in den Rang »essentieller Effekte« gerückt, die Unvorhersagbarkeit des komplexen Verhaltens rekursiv geschlossener Prozesse in gleichwohl umweltoffenen (d. h. für Randbedingungen »sensiblen«) selbstorganisierenden Systemen gilt nunmehr als irreduzibel.

¹⁷⁰ R. von Woldeck, »Formeln für das Tohuwabohu«, a. a. O., S. 9.

Man muß aber zugestehen, daß die Arbeiten Einsteins und der Quantenphysiker der Selbstorganisationstheorie insofern vorgearbeitet haben, als sie den traditionellen Determinismusbegriff abgeschwächt bzw. bestimmte klassische Absolutheitsvorstellungen verabschiedet haben. Die Quantentheorie (QT) erschütterte das mechanistische Weltbild, indem sie u. a. zeigte, daß

- (1.) die Natur »Sprünge macht« (Quantelung der Energie), was die mechanistische Kontinuumsvorstellung zerstörte;
- (2.) quantenphysikalische Ereignisse prinzipiell nicht vollständig determiniert sind, sondern nur mit statistischer Wahrscheinlichkeit eintreten (Beispiel: die Halbwertszeit beim Betazerfall radioaktiver Elemente), womit der strenge Determinismus der klassischen Mechanik im Grundsatz aus den Angeln gehoben wurde;
- (3.) der Vorgang des Messens im mikrophysikalischen Bereich die zu messenden Größen beeinflusst¹⁷¹, womit das klassische Ideal der objektivdistanzierten Naturbeobachtung radikal eingeschränkt wurde.¹⁷²

Die (spezielle bzw. allgemeine) Relativitätstheorie (RT) schließlich zeigte, daß es

- (4.) die »absolute Zeit« und den »absoluten Raum« der Newtonschen Mechanik ebensowenig gibt wie beliebig große Geschwindigkeiten (»absolute Konstanz« der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum) noch vollkommen starre Körper oder bewegungsunabhängige Massenverhältnisse: jedes physikalische Bezugssystem verfügt über seine eigene »Raum-Zeit« (neues Relativitätsprinzip). Der durch diese neuen Theorien ausgelöste »Schock« ließ sich aber noch dadurch in Grenzen halten, daß man die neuen Erkenntnisse einerseits auf den *mikroskopischen* Bereich (QT), andererseits auf den Fall *extremer*

¹⁷¹ Beschrieben wird dies durch die berühmten »Heisenbergschen Unschärferelationen«, die zum Ausdruck bringen, daß der Ort und der Impuls eines Teilchens nicht beide zugleich mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden können; ebensowenig kann die Messung seiner Energie und die Festlegung des Zeitpunktes, für den diese Messung gilt, gleichzeitig erfolgen, wodurch die exakte Vorausberechnung künftiger Bewegungen des Teilchens unmöglich wird.

¹⁷² Diese Tatsache wird noch verstärkt durch den Umstand, daß sich ein Quant je nach Experimentieranordnung entweder als Korpuskel oder als dazu komplementäre Welle präsentiert.

Geschwindigkeiten bzw. *kosmologischer* Größenordnungen (RT) beschränken konnte. Demgegenüber verkörpern die Selbstorganisationskonzepte eine zweite »Schockwelle«, die das Erbe der Quantentheorie gewissermaßen in dem jedermann sichtbaren *makrophysikalischen* Größenbereich, in der Dimension lebensweltlicher Erfahrungen, fortsetzt: »Quantensprünge« i. S. spontaner Übergänge zu (neuer) Ordnung oder Bifurkationen möglicher Entwicklungspfade bzw. unberechenbarer (»sensibler«) Reaktionen auf minimale Variationen in den Anfangs- oder Randbedingungen von Systemprozessen kennzeichnen Vorgänge innerhalb der Domänen der *klassischen* Physik, der Biologie, der Chemie und der Humanwissenschaften.

Zusammenfassend ergibt sich für die lange Vorgeschichte der modernen Selbstorganisationstheorie etwa folgendes Bild:

(1.) In grober Annäherung läßt sich der wissenschaftliche Vorlauf zu den heutigen Theorien der »innovativen Selbstorganisation« in zwei Phasen bzw. Klassen von Ansätzen gliedern:

- in Ansätze, die die spontane Entstehung von Ordnung aus Unordnung bzw. den Übergang zu Zuständen komplexerer Ordnung entweder zu »trivialisieren« versuchen (mechanistische Reduktion) oder als Resultat »darwinistischer« Evolutionsstrategien betrachten (Variation und Selektion) oder aus dem Wirken »geheimnisvoller« Kräfte erklären möchten (so werden etwa ein göttlicher oder demiurgischer Schöpferwille, finale Kräfte wie Entelechien oder eine »vis vitalis«, das Walten einer das Marktgeschehen durchherrschenden »unsichtbaren Hand« u. ä. m. postuliert); der Beginn dieser Phase läßt sich mindestens bis zu den Vorsokratikern zurückdatieren, sie erfährt ihre Höhepunkte aber in der Zeit vom 17. bis zum Ende des 19. Jahrhunderts und endet im wesentlichen im frühen 20. Jahrhundert; sowie
- in Ansätze, die »konservative« Selbstorganisationsprozesse thematisieren: systemischer Holismus, Ausbildung von Fließgleichgewichten, Adaptations- und Stabilisierungsprozesse in rückkoppelnden Systemen (i. S. einer »Kybernetik 1. Ordnung«); derartige Ansätze markieren vor allem die Phase von etwa 1920 bis 1960; gelegentlich überschneiden sich die beiden Phasen auch.

(2.) Frühe theoretische Selbstorganisationsansätze in der Philosophie und in den Wissenschaften sind im wesentlichen daran gescheitert, daß

- mangels empirischen Wissens die Idee der Selbstorganisation häufig nur als ein philosophisches Thema in spekulativer Form und an bestimmte philosophische Vorurteile angepaßt behandelt wurde (wie z. B. im Falle des Deutschen Idealismus) (*Wissensdefizite*);
- es an geeigneten experimentellen und mathematischen Methoden zur Untersuchung und Beschreibung empirischer Selbstorganisationsphänomene fehlte (*analytische Defizite*);
- die vorherrschenden und sich gegenseitig stützenden naturphilosophischen und natur- bzw. humanwissenschaftlichen Vorstellungen (»mechanistisches Weltbild«, Newtonsches Paradigma, Physikotheologie usw.) - sowie nicht zuletzt auch deren erfolgreiche Umsetzung in empirische Forschungsstrategien und technische Anwendungen (Maschinen) - das für die Selbstorganisationsforschung notwendige Umdenken verhinderten, indem bestimmte »rätselhafte« (mit Selbstorganisationsprozessen zusammenhängende) Phänomene wenn nicht ignoriert, so doch trivialisiert, marginalisiert oder (wie im Falle des Vitalismus) mystifiziert wurden (*epistemologische »Defizite« oder »Barrieren«*);
- die Möglichkeit einer numerischen Behandlung nicht-linearer Gleichungen mittels automatisierter Berechnungsverfahren (digitale Computer) nicht vorhanden war (*»kalkulatorische« Defizite*).

Insgesamt kann man für die Zeit vor der Begründung moderner Selbstorganisationstheorien, speziell einer nicht-linearen Thermodynamik gleichgewichtsferner Prozesse, konstatieren, daß man den Phänomenen der Selbstorganisation, sofern man sie nicht als enigmatische Vorgänge unbeachtet ließ bzw. noch unbekannte teleologische Wirkkräfte als Erklärung vermutete, entweder recht hilflos gegenüberstand (von »undurchschaubarer Komplexität« sprach) oder aber sie zu »linearisieren«, d. h. konventionell zu behandeln versuchte. So wundert es nicht, daß es zu einer folgenreichen Wiederaufnahme der Selbstorganisationsthematik erst kommen konnte, als es gelang, in einigen paradigmatischen Fällen die Mechanismen zu identifizieren, durch die aus Unordnung Ordnung entsteht und die somit das Verhalten komplexer Systeme beschreiben. Es sei nochmals

nachdrücklich auf den bedeutenden Beitrag des Computers bei der Analyse komplexer Systeme hingewiesen, dessen Einführung die Etablierung einer »experimentellen Mathematik« (z. B. der Fraktalgeometrie) recht eigentlich erst ermöglicht hat.

(3.) Bis zum »Vorabend« der Entstehung der modernen Selbstorganisationsforschung war dennoch eine Reihe von Voraussetzungen geschaffen, d. h. waren bestimmte Entdeckungen gemacht, mathematische Methoden entwickelt und partielle Erklärungsansätze ersonnen worden, ohne die das neue »Paradigma« der Selbstorganisation kaum formulierbar gewesen wäre: man denke nur an die oben besprochenen Arbeiten von Poincaré zum Dreikörperproblem und von Bertalanffy zur Theorie offener Systeme, an Maxwells Reformulierung des Kausalprinzips, die Entdeckung der Mechanismen der biologischen Evolution durch Darwin, die thermodynamische Behandlung irreversibler Prozesse, die Erkenntnis der Ganzheitlichkeit des Organismus (Driesch), die Postulierung von Gesetzen der Gestaltwahrnehmung (Köhler), »Müllers Gesetz« der spezifischen Nervenenergie, die ersten neuronalen Vernetzungsmodelle (McCulloch/Pitts), die kybernetische Beschreibung von Rückkopplungsvorgängen, die Formulierung allgemeiner Systemgesetze sowie das allmähliche Ernstnehmen von Ordnungsphänomenen wie der Bénard-Instabilität, der hydrodynamischen Wirbelbildung und anderer dynamisch komplexer Prozesse. Dies vor Augen läßt sich die Vorgeschichte der modernen Selbstorganisationsforschung statt nur als eine Folge ständig erneuerter Widerstände gegen »ganzheitliches«, evolutionäres und selbstorganisatives Denken auch als eine Folge oder Kette von Fortschritten auf dem Wege zum »reifen« Selbstorganisationsdenken beschreiben. Auch wenn letzten Endes immer noch ein entscheidender »paradigmatic shift«, ein erkenntnistheoretischer »switch« notwendig war, um der neuen Sichtweise Raum und Durchschlagskraft zu verschaffen, so haben doch die nachstehenden theoretischen »Verschiebungen« in der Wahrnehmung und Bewertung von Phänomenen das moderne Konzept der Selbstorganisation epistemologisch vorbereitet:

- von der Reversibilität zur Irreversibilität
- von der »Linearität« zur Nicht-Linearität

- von periodischen Vorgängen zu rekursiven Prozessen
- von der kontinuierlichen (extrapolierbaren) Entwicklung zu Verzweigungsprozessen (Bifurkation)
- von sukzessiven Wirkungsketten zu (»heterarchischen«) Wechselwirkungsnetzen
- vom Gleichgewicht zum Fließgleichgewicht (bzw. Fluktuationen, Oszillationen u. ä.)
- von systemischer Geschlossenheit zu systemischer Offenheit
- von der starken zur schwachen Kausalität bzw.
- vom Ideal der prinzipiellen Vorhersagbarkeit zur Anerkennung des prinzipiell Unvorhersehbaren
- von der Suche nach allgemeinen Naturgesetzen zur Aufwertung je besonderer Randbedingungen und individueller Lösungen
- von der Reduktion des Komplexen auf Einfaches zur Anerkennung der Komplexität (auch des Einfachen) bzw.
- vom methodischen Reduktionismus zur Akzeptanz ganzheitlich (»holistisch«) organisierter Entitäten (autonomer Systeme)
- von der Auffassung eines geschichtslosen Universums zur evolutionären Sichtweise.

Diese Entdeckungen und Entwicklungen vor allem markieren den positiven Bestand an wissenschaftlichen Errungenschaften, an den Selbstorganisationskonzepten wie die Theorie »dissipativer Strukturen« (Prigogine) oder das Konzept der »Autopoiese« (Maturana/Varela) anknüpfen konnten, indem sie sie in einen erweiterten Rahmen stellten bzw. in eine veränderte Perspektive einrückten. Speziell der Synthese der Ideen von Nicht-Linearität (bereits zu Anfang dieses Jahrhunderts entwickelt) und Nicht-Gleichgewicht verdanken mehrere moderne Selbstorganisationskonzepte ihre Entstehung. So war es insbesondere die Entdeckung irreversibler und fließgleichgewichtiger Prozesse sowie rekursiv vernetzter Wechselwirkungen zwischen (vielen) Teilchen bzw. energetisch offenen Systemen, die der nicht-linearen Ungleichgewichts-Thermodynamik Prigogines den Boden bereitet haben; während vor allem die erstmalige Beschäftigung mit gestalthaften oder selbstreferentiell strukturierten Vorgängen im organismischen Stoffwechsel und im Nervensystem, mit den Phänomenen des onto- und phylogenetischen Formwandels, mit Selbstregulation,

-erhaltung und -reproduktion (in der Morphologie, Physiologie, Gestaltpsychologie bzw. in den Kognitionswissenschaften) der Entwicklung des »konnektionistischen« Zweigs des Selbstorganisationskonzepts vorgearbeitet hat.

Es wäre somit ein Irrtum, würde man wissenschaftliche Umbrüche als gleichsam »vom Himmel gefallen« und als ausschließlich der genialen Intuition großer Forscher entspringend betrachten: auch bedeutende Forschungsleistungen werden von Wissenschaftlern erbracht, die »auf den Schultern von Riesen« (R. K. Merton) stehen, die ihnen vorausgehen. Dies braucht dem »revolutionären« Charakter ihrer Leistungen aber keinen Abbruch zu tun. Trotz zahlreicher Wegbereiter bleibt der unter großen Mühen und mit viel Mut vollzogene Übergang von einer »Erforschung des Einfachen« zu einer »Erforschung des Komplexen« (Nicolis/Prigogine) bzw. einer Umstellung der Forschungsperspektive »vom Sein zum Werden« (Prigogine¹⁷³) eine enorme Leistung, für die sich in der Geschichte der neuzeitlichen Wissenschaft nur wenige Parallelen aufzeigen lassen: Kopernikus, Newton und Darwin, vielleicht noch Freud, Einstein und Planck.

¹⁷³ Um auf zwei Buchtitel der genannten Forscher anzuspielen.

III Moderne Konzepte der Selbstorganisation

1 Vorbemerkung

Wir kommen nunmehr zu den »Keimzellen« der modernen Selbstorganisationsforschung, die wir in der Einleitung bereits kurz skizziert haben. Die oben behandelte Urgeschichte des Selbstorganisationsdenkens bildet gewissermaßen den geistigen Humus, in dem diese neuen Konzepte Wurzeln schlagen konnten.

Die nachstehende Erörterung der sieben »Wurzeln«¹⁷⁴ der modernen Selbstorganisationsforschung schließt ein die Behandlung

- der namhaften »Gründerväter« der Urkonzepte, d. h. des biographischen Hintergrunds, vor dem deren Formulierung stattfand,
- der entscheidenden Anlässe (Weichenstellungen) zur Entwicklung von Selbstorganisationskonzepten,
- der wichtigsten Vorarbeiten, die die Änderung der Problemwahrnehmung vorbereiten,
- der ersten »wesentlichen« Arbeiten, die auf dem jeweiligen Forschungsgebiet den »Durchbruch« markieren oder ankündigen,
- der strukturellen und instrumentellen »Erfolgsbedingungen« der Begründung dieser Selbstorganisationsansätze (mathematische Methoden, Computer etc.),
- der spezifischen Fragestellungen bzw. der zentralen theoretischen Aussagen der Konzepte,
- ihrer spezifischen Erklärungsleistungen sowie
- der ersten (später oftmals »paradigmatisierten«) empirischen Entdeckungen auf der Grundlage dieser Konzepte.

¹⁷⁴ Eine weitaus detailliertere Darstellung der Entstehungsphase wird einer späteren Publikation des Autors vorbehalten; dort sollen auch die nachfolgenden Entwicklungsphasen der Selbstorganisationsforschung eingehend behandelt werden.

2 Die Entstehung der neuen Konzepte

2.1 Die Theorie dissipativer Strukturen

Die Theorie dissipativer Strukturen brachte auf dem Gebiet der Nichtgleichgewichts-Thermodynamik den entscheidenden Durchbruch zur Selbstorganisationstheorie. Ihr Begründer, Ilya Prigogine, gebürtiger Moskowiter des Jahrgangs 1917, lehrt seit 1951 als Professor für physikalische Chemie an der Freien Universität Brüssel. 1977 erhielt er den Nobelpreis für Chemie, wodurch einem Selbstorganisationskonzept erstmals die höchste wissenschaftliche Ehrung zuteil wurde. Durch Prigogine, der sich vor seinem Chemiestudium mit Archäologie und Geschichte befaßt hatte, sollte der klassische Zeitbegriff der Naturwissenschaften revolutioniert werden: gegenüber dem starren (deterministischen) Zeitbegriff der klassischen Mechanik und der Gleichgewichts-Thermodynamik (Entropiesatz) entwickelte er einen Zeitbegriff, der eine entwicklungsmäßige Abfolge von Mustern zunehmender Komplexität gestattet und der somit der Prozeßstruktur der kosmologischen, biologischen und sozio-kulturellen Evolution gerecht wird. Die Zeit wird damit von einem bloßen Parameter der Bewegung zu einer gerichteten Größe, die innere Entwicklungen in einer Welt ungleichgewichtiger Prozesse mißt. Dadurch wollte Prigogine die traditionelle »Physik des Seins« in eine »Physik des Werdens« verwandeln und die *Naturgeschichte* auf neuartige Weise in die Naturwissenschaften zurückholen. Indem aber Zeit und Geschichte als naturwissenschaftliche Wirklichkeiten anerkannt werden, rückt die alte Idee einer Synthese von Natur- und Kulturwissenschaften wieder in den Bereich des Möglichen.

Prigogine arbeitete bereits seit Mitte der 1940er Jahre an Problemen der irreversiblen Thermodynamik.¹⁷⁵ Zunächst galten seine Arbeiten der Stabilität thermodynamischer Systeme in der Nähe von Gleichgewichten (bereits 1945 hatte er hierfür das »Prinzip der minimalen Entropieproduktion« formuliert). Anfang der 1960er Jahre wandte er sich sodann intensiv der Untersuchung von Systemen *fern ab* vom thermodynamischen

¹⁷⁵ 1955 erschien sein bedeutendes Buch *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, New York, das bis 1967 drei Auflagen erlebte.

Gleichgewicht zu, in denen die Flüsse auf nicht-lineare Weise von den Kräften abhängen: Stabilität ist nicht länger durch die Existenz einer »Potentialfunktion«, die bei Gleichgewichtssystemen das Minimum eines Potentials beschreibt, gewährleistet; Schwankungen können folglich nicht mehr automatisch ausgedämpft werden, sondern verstärken sich; dadurch vermögen Fluktuationen - seien dies nun Störungen aus der Systemumwelt oder Eigenfluktuationen des Systems - das System in einen ganz neuen Zustand zu treiben; die makroskopischen Systemzustände werden somit abhängig von den Anfangsbedingungen.

Die endgültige Ausdehnung des Formalismus der irreversiblen Thermodynamik auf Prozesse fern ab vom Gleichgewicht erfolgt in dem 1971 zusammen mit P. Glansdorff verfaßten Werk *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*¹⁷⁶, das den eigentlichen Durchbruch zur Theorie dissipativer Strukturen markiert: mit Blick auf oszillierende chemische Reaktionen und bestimmte Probleme der Hydrodynamik sei es notwendig geworden, die Thermodynamik irreversibler Prozesse auf das Gebiet ungleichgewichtiger, nicht-linearer Phänomene auszudehnen. Als Beispiel führen die Autoren das Instabilwerden einer statischen Flüssigkeitsschicht (Bénard-Instabilität) mit anschließender Zellularkonvektion an. Hier bedeute die Anwendung entsprechend erweiterter thermodynamischer Methoden »a substantial increase of the power of macroscopic methods. Various problems treated till now by quite different methods may be approached in a new unified way; even some problems of classical equilibrium thermodynamics find their natural answer once formulated in the frame of a more general approach.«¹⁷⁷

Eine neue, aus einer instabilen Phase hervorgehende (dissipative) Struktur »originates from a fluctuation«.¹⁷⁸ »Ordnung durch Fluktuation« bildet also das grundlegende Prinzip der erweiterten Thermodynamik. Während Gleichgewichtsstrukturen, wie etwa Kristalle, »may be formed and maintained through *reversible* transformations implying no apprecia-

¹⁷⁶ London/New York/Sydney/Toronto 1971. Vgl. auch I. Prigogine, »Dissipative structures in chemical systems«, in: S. Claessons (Hg.), *Fast Reactions and Primary Processes in Chemical Kinetics*, Proceedings of the A. Nobel-Symposium, Stockholm/New York, 1967, S. 371 ff.

¹⁷⁷ Ebenda, S. XIII.

¹⁷⁸ Ebenda, S. XIV.

ted deviation from equilibrium«, sind »dissipative Strukturen«, also spontan erzeugte Ordnungsmuster wie die bekannten Bénardschen Konvektionszellen, »formed and maintained through the effect of exchange of energy and matter in non-equilibrium conditions«. Übersteigt in offenen Systemen der Durchfluß an Energie oder Materie einen gewissen Schwellenwert, so kommt es nicht einfach nur zu immer größeren Fluktuationen, sondern es treten häufig spontan räumliche und zeitliche Muster auf - relativ stabile, aber ungleichgewichtige Strukturen -, die ihre Existenz energetischen oder materiellen »Dissipationen« (Streuungen) verdanken. »We may consider a convection cell as a *giant fluctuation* stabilized by the flow of energy and matter prescribed by the boundary conditions.«¹⁷⁹ Die raumzeitliche dissipative »Prozeßstruktur«, die das System annimmt, wird dabei nicht durch äußere Bedingungen bestimmt - auch wenn für offene Systeme die Wechselwirkung mit der Umwelt grundlegend ist -, sondern durch die innere Funktion des Systems: genau aus diesem Grund kann von der *Selbstorganisation* dissipativer Prozeßstrukturen gesprochen werden.

Solche dissipativen Strukturen können - bei weiterer Steigerung des Durchflusses - sogar evolvieren, d. h. über erneute Instabilitäten in Strukturen erhöhter Komplexität übergehen. Derartige Streustrukturen beziehen ihre Energie von außerhalb des Systems (z. B. Wärmezufuhr), doch die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für diskontinuierliche »Ordnungssprünge« zu neuer räumlicher oder zeitlicher Organisation resultieren aus selbstverstärkenden Fluktuationen im Systeminnern. In Normalzeiten - bei »unterkritischen« Fluktuationen - funktioniert ein System um einen Gleichgewichtspunkt (»Attraktor«) herum. Werden die Fluktuationen jedoch, durch »positives feedback«, amplifiziert, so können sie den gegebenen Stabilitätsspielraum überschreiten und das gesamte System in eine neue dynamische Prozeßstruktur (ein neues »Ordnungsregime«) überführen.

Prigogine zieht hier das Konzept der Bifurkationen (Verzweigungen) heran, um die Bildung immer neuer dissipativer Strukturen zu beschreiben. In der Nähe von Bifurkationspunkten zeigen ungleichgewichtige Systeme extrem große Schwankungen: das System wird für kleinste Störungen aus seiner Umwelt »sensibel«, es scheint bei der >Wahl< zwischen verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten oder -pfaden zu zögern, als ob es ständig

¹⁷⁹ Ebenda.

die Stabilität seines momentanen Zustandes »austesten« würde, wobei das klassische »Gesetz der großen Zahlen« versagt. Sein künftiges Verhalten wird dadurch unvorhersagbar. Eine beliebige und beliebig kleine Fluktuation vermag, wenn die Instabilität ein kritisches Maß erreicht hat, eine völlig neue Entwicklung einzuleiten, wodurch das *makroskopische* Gesamtverhalten des Systems drastisch verändert werden kann.

Damit aber wird eine historische Dimension in physikalische Prozesse eingeführt. Ein physikalisches System könne nicht mehr allein durch den Wert der es definierenden Variablen zu einer bestimmten Zeit beschrieben werden, denn »we need to know the succession of instabilities which have occurred in the past.«¹⁸⁰ Das zukünftige Verhalten eines dissipativen Systems ist von seiner bisherigen »Systemgeschichte« abhängig.

Ein anderes Beispiel, das Prigogine diskutiert, sind die sogenannten »chemischen Uhren«, also chemische Reaktionen fern vom chemischen Gleichgewicht, die ein kohärentes, rhythmisches Verhalten zeigen: während die Ausgangsstoffe und Endprodukte solcher chemischer Reaktionen von den Oszillationen nicht betroffen sind, weisen die Zwischenprodukte periodische Konzentrationsschwankungen auf. Zum Paradebeispiel wurde die 1958 von B. Belousov entdeckte und von A. M. Zhabotinsky weiterentwickelte »Belousov-Zhabotinsky-Reaktion«, die ein »bistabiles« Reaktionssystem darstellt, insofern ein bestimmter Stoff (das Element Cer) zwischen zwei Zuständen verschiedener Wertigkeit hin und her pendelt, wobei die Lösung abwechselnd farblos und gelb erscheint.¹⁸¹ Andere »chemische Uhren« warten mit alternierenden räumlichen Mustern oder sich zeitlich ausbreitenden Wellenstrukturen auf. Solche Systeme mit stabilen periodischen Oszillationen um einen stationären Zustand zeigen ein sogenanntes »Grenzzyklus-Verhalten«. In der Brüsseler Schule um I. Prigogine wurde zu Anfang der 1970er Jahre das Modell einer cross-katalytischen chemischen Reaktion entwickelt - in der Literatur seither als »Brüssela-

¹⁸⁰ Ebenda, S. XVII.

¹⁸¹ Informative Darstellungen finden sich bei I. R. Epstein et al., »Oszillierende chemische Reaktionen«, in: *Spektrum des Wissenschaft*, H. 5, 1983, S. 98 ff., sowie bei B. Hess und M. Markus, »Chemische Uhren«, in: A. Dress et al. (Hg.), *Selbstorganisation - Die Entstehung von Ordnung in Natur und Gesellschaft*, München 1986, S. 61 ff.

tor« bezeichnet -, das die Evolution einer dissipativen Struktur zeigt.¹⁸² Die Bénard-Instabilität bzw. Zellularkonvektion und die »chemischen Uhren« bilden gewissermaßen die paradigmatischen Fälle, die der Theorie dissipativer Strukturen erstmals empirische Überzeugungskraft verliehen haben. Heute gibt es zahllose weitere Anwendungsbeispiele.

Um die Ausgangslage, die zur Formulierung der Theorie dissipativer Strukturen geführt hat, noch etwas genauer zu bestimmen, wollen wir auf mündliche Äußerungen Prigogines zurückgreifen, die dieser in einem noch unveröffentlichten Interview gemacht hat.¹⁸³ Für Prigogine selbst liegen die Ursprünge seiner Selbstorganisationstheorie weit zurück: »When I wrote in 1945¹⁸⁴ already that the steady state in non-equilibrium is determined by minimum of entropy production, I showed immediately that this minimum generally leads to selforganization even near equilibrium, because I considered for example the case of temperature differences, and I showed that - if there is a temperature difference - the minimum entropy production would lead to a difference in composition left and right: therefore to a selforganization. In other words: the uniformity was destroyed by the flow and that is, why I was so satisfied. Therefore I would say, the idea of selforganization was clearly formulated in the frame of non-equilibrium in my work of 1945, and then I showed that this lead to a wide unexpected extension in non-equilibrium far from equilibrium, and this is shown in 1962.«¹⁸⁵ Eine Durchsicht der Schriften zeigt aber, daß Prigogines Arbeiten in den 1940er und 1950er Jahren sich noch im Rahmen einer Thermodynamik von Systemen nahe beim Gleichgewicht bzw. im linearen Nichtgleichgewicht bewegen¹⁸⁶ und stark von den Ideen seines Lehrers de Donder (»my teacher«) sowie Onsagers und

¹⁸² Ausführlich diskutiert in G. Nicolis und I. Prigogine, *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*, New York 1977.

¹⁸³ Interview mit I. Prigogine, durchgeführt von G. Küppers in Brüssel im Juli 1985, unveröffentl. Tonbandabschrift, Universität Bielefeld. Alle folgenden Zitate stammen, sofern nicht anders ausgewiesen, aus diesem Interview.

¹⁸⁴ Gemeint ist wohl Prigogines *Etude thermodynamique des phenomenes irreversible*, Liège 1947.

¹⁸⁵ Offenbar bezieht sich Prigogine hier auf seine Arbeit *Non-Equilibrium Statistical Mechanics*, New York 1962; hier wird erstmals Dissipativität im Sinne einer Zerstörung von »invariants of the motion« definiert.

Meixners bestimmt sind (»my first influence was de Donder; my second was in linear, non-equilibrium theory: the work of Meixner and of Onsager«). So bekennt Prigogine auf Nachfrage auch, daß er tatsächlich erst um 1962/63 herum entdeckte, »that the non equilibrium flow can be transformed into structures - space structures or time structures«, und daß er erstmals in der 3. Auflage seiner *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes* von 1967 (s.o.) »the fact« diskutierte, »that when you have a minimum of entropy production, you increase a complexity. Therefore you have selforganization. And the idea that selforganization in a stronger sense can start far from equilibrium that is the idea, which came in in the sixties.«¹⁸⁷

Daß Prigogine die ersten Anfänge seiner Theorie der Entstehung dissipativer Strukturen unter Bedingungen nicht-linearer Ungleichgewichtsprozesse in dem Interview zunächst bis in die 1940er Jahre zurückdatiert, zeigt, daß er hier einen Prozeß sukzessive erreichter Fortschritte sehen möchte, die aus innerer Folgerichtigkeit aufeinander aufbauen, daß er sich der Bedeutung von Vorläufern¹⁸⁸ bewußt ist und wie er dementsprechend den großen

¹⁸⁶ »Now, to obtain my theorem of minimum entropy production I had to make the assumption of small deviation from equilibrium, you see, it is only in the linear range.«

¹⁸⁷ Nicht unerwähnt bleiben sollte vielleicht, daß Prigogine nach eigener Aussage zu seinem Theorem der minimalen Entropieproduktion durch die Beschäftigung mit dem biologischen »Lebensproblem« gekommen ist: »I was very much interested in the problem of life, because life is typically an evolutionary phenomenon. I mean, since Darwin we cannot imagine what life is, without a theory of evolution.« Prigogine war beeindruckt von der Tatsache, daß Organismen ihre Lebensprozesse unter Bedingungen des Ungleichgewichts aufrechtzuerhalten vermögen; offenbar war ihnen dies nur aufgrund ihrer Offenheit für Austauschprozesse mit der Umwelt möglich: Prigogine wollte sehen, »if non-equilibrium situations may be stable. And that is the reason, why I formulated my theorem of minimum entropy production in 1945.« Offenbar war Prigogine schon sehr früh an Problemen der Evolution interessiert, was seine Behandlung des Zeitbegriffs möglicherweise nachhaltig beeinflußt hat: »I thought always that the existence of life is telling us something very important about nature. Universe without life would be a different universe; therefore inversely, if life exist, that means something in terms of laws of physics, and therefore I would say, my point was the consideration of irreversibility now as an essential element.«

¹⁸⁸ »I am very much influenced by the work of Kolmogorow, Poincaré, and so on.« Den Russen A.N. Kolmogorow hat Prigogine andernorts als den »vielleicht bedeutendsten Mathematiker unseres Jahrhunderts« bezeichnet: »Kolmogorow fand heraus, daß es viele dynamische Systeme gibt, die so instabil sind, daß die beiden Trajektorien (Ent-

Um- und Durchbruch in eine Reihe von Teilerrungenschaften auflöst. Dabei mag freilich auch das »selbststilisierende« Motiv hineinspielen, die Entwicklung des eigenen Gedankenweges so zu rekonstruieren, daß der Eindruck entsteht, Prigogine sei eigentlich schon immer Selbstorganisationstheoretiker gewesen. Andererseits ist aber auch schwerlich von der Hand zu weisen, daß Prigogines Theorie letztlich eine Reihe von Vorarbeiten - eigenen und fremden - zu einer kühnen Synthese zusammengeführt hat: viele Ideen mußten zusammenkommen, um die eine neue Theorie zu ermöglichen. »I was, you see, when I see my life in the past, I am a very persistent person, I keep on with this very few ideas for long periods, and I was always astonished that my theorem of minimum entropy production was only valid in the neighbourhood of equilibrium.«

Ausschlaggebend für den Übergang zu einer neuen (bzw. erweiterten) Thermodynamik war offenbar die Hartnäckigkeit, mit der Prigogine an einer bestimmten Fragestellung festhielt: »Always I was asking the question, what happens far from equilibrium, and that seemed to be a very naive question.« Es war unklar, was geschehen würde, wenn ein System daran gehindert wird, einen Gleichgewichtszustand einzunehmen, etwa dadurch, daß ihm verstärkt Wärme zugeführt wird. »But this naive question has led me to very unexpected results, because by asking this question I was able - and now we come to the 1960s -, with the help of my colleague Professor Glansdorff, to show: far from equilibrium the entropy production is not necessarily decreasing ... and this led us immediately to a stability criterion, that is formulated in my book in 1971.¹⁸⁹ We found a criterion and we showed that this criterion is not always true, not always satisfied.¹⁹⁰ This was a great

wicklungslinien) im Laufe der Zeit exponentiell auseinanderlaufen werden, egal wie groß bzw. klein die Entfernung anfänglich zwischen ihnen auch sein mag. ... Wie auch immer die Anfangsbedingungen gewesen sein mögen, der Begriff Trajektorien macht nach einiger Zeit keinen Sinn mehr, es sei denn, man würde über ein unendliches Wissen verfügen oder die präzisen Anfangsbedingungen kennen«; aus: »Die Wiederentdeckung der Zeit - Naturwissenschaft in der Welt begrenzter Vorhersagbarkeit«, in: H.-P. Dürr und W. Ch. Zimmerli (Hg.), *Geist und Natur*, Bern/München/Wien 1989, S. 52.

¹⁸⁹ I. Prigogine und P. Glansdorff, *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*, a. a. O.

¹⁹⁰ G. Nicolis, ein wichtiger Mitstreiter Prigogines seit den 70er Jahren, bemerkte 1988 in einem Interview mit G. Küppers und W. Krohn (unveröffentl. Tonbandabschrift, Universität Bielefeld), daß es wohl großen Mut (>courage<) erfordert habe, zunächst ver-

surprise: it was not trivial at all, that far from equilibrium you cannot extrapolate the equilibrium branch; and that was the birth of the thermodynamic theory of selforganization.«

Wiederum verweist Prigogine auf Vorarbeiten aus den 1960er Jahren, besonders auf zwei Vorträge aus dem Jahre 1967¹⁹¹, wo »I give the first clear definition, I think, of dissipative structures and non-equilibrium selforganization«. An dieser Stelle erfolgt dann auch der Hinweis auf den »main point«, auf die entscheidende Idee, die der Theorie dissipativer Strukturen als einer Selbstorganisationstheorie zugrundeliegt: »The main point, which I would like to emphasize is that there is a clear relation between far from equilibrium and non-linearity, because close to equilibrium one can always linearize: you have only one solution; and far from equilibrium there are many solutions, there are much more possibilities you can dream of as in equilibrium or near equilibrium.«

Erst mit der ideellen Verbindung der Begriffe »Gleichgewichtsferne« und »Nicht-Linearität« öffnet sich das Feld einer thermodynamischen Selbstorganisationstheorie, in der dann auch Begriffe wie »Ordnung durch Fluktuation«, »Bifurkation« von »Entwicklungspfaden«, »Symmetriebruch«, »Phasenübergang« usw. eine spezifische systematische Rolle spielen. Um jedoch erfolgreich nicht-lineare Prozesse untersuchen zu können, mußte Prigogine auf neuartige mathematische Methoden zurückgreifen; ja deren Vorhandensein war geradezu eine Voraussetzung dafür, die Nicht-Linearität überhaupt als

geblich nach »principles governing stability of non-equilibrium states« zu suchen und dann »to admit that there are no such principles ... There are no universal principle guaranting stability of highly constrained systems« bzw.: »there is no universal stability criterion in far from equilibrium systems«; diese Einsicht (»realization«) aber sei die Voraussetzung gewesen für »the origin of present day theory of what you call theory of selforganization.«

¹⁹¹ I. Prigogine, »Quantum Theory of Dissipative Systems and Scattering Processes«, in: S. Claessons (Hg.), *Fast Reactions and Primary Processes in Chemical Kinetics*, a. a. O., 1967, S. 99 ff.; sowie ders., »Dissipative Structures in Chemical Systems«, in: ebd., S. 371 ff.; die zuletzt genannte Arbeit stellt eine Art Exposé zur Theorie dissipativer Strukturen dar und enthält einen bemerkenswerten Hinweis auf analoge Überlegungen von M. Eigen, die dieser am Vortage auf demselben Nobel-Symposium vorgetragen hatte.

ein Forschungsproblem anzugehen: »First of all, there are new problems have been arisen thanks to the development of non-linear methods.«¹⁹²

Wir können hier festhalten, daß der entscheidende Durchbruch zur Theorie der dissipativen Strukturen offenbar in den frühen 1960er Jahren (ca. 1962/63) erfolgt ist, als Prigogine klar wurde, daß in energetisch offenen Systemen fern ab vom Gleichgewicht - aufgrund nicht-linearer Wechselwirkungen zwischen den Komponenten solcher Systeme - über kritische Instabilitätsschwellen (Bifurkationspunkte) hinweg spontan neue Strukturmuster (Ordnungsregimes) entstehen können. Diese Erkenntnis ergab sich aus einer konsequenten (gleichwohl originellen) Fortentwicklung von Fragestellungen aus der linearen Nichtgleichgewichts-Thermodynamik (was geschieht, wenn thermodynamische Systeme systematisch an der Einnahme eines Gleichgewichts »gehindert« werden?), unter Benutzung von Methoden einer nicht-linearen Mathematik. Mag Prigogine auch bereits recht frühzeitig die weitreichenden Auswirkungen (Anwendungsmöglichkeiten) seiner »neuen« Thermodynamik - über das Gebiet der physikalischen Chemie hinaus - geahnt haben, so ist doch nicht zu übersehen, daß er seinen Ansatz aus der Bearbeitung von traditionellen Problemen seines Fachgebiets gewonnen hat und ihm der »revolutionäre« Gehalt seines Selbstorganisationskonzepts erst Ende der 1960er Jahre deutlich wurde, als er auf analoge Konzeptentwicklungen bei anderen Forschern in anderen Disziplinen stieß (etwa bei M. Eigen).

2.2 Synergetik

Der Begründer der »Synergetik«, Hermann Haken, geboren 1927, ist derzeit Professor für Theoretische Physik an der Universität Stuttgart. Haken hatte Anfang der 1960er Jahre damit begonnen, eine Theorie des Lasers (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) auszuarbeiten, in der er zeigte, wie durch das Zusammenwirken vieler unabhängiger Teile (der Laseratome) kohärentes Verhalten (kohärentes Laserlicht) entsteht. Später hat er seinen Ansatz zu einer allgemeinen Lehre vom Zusammenwirken (»Synerge-

¹⁹² G. Nicolis in einem Interview mit G. Küppers und W. Krohn im Jahre 1988; unveröffentl. Tonbandabschrift, Universität Bielefeld.

tik«) ausgebaut, als er der Frage nachging, wie generell Ordnung aus Unordnung (Chaos) entsteht, d. h. wie natürliche (und kulturelle) Systeme sich selbst organisieren. Die Zielsetzung der Synergetik hat er selbst wie folgt umrissen: »Die Synergetik, ein interdisziplinäres Forschungsgebiet, befaßt sich mit dem Zusammenwirken der einzelnen Teile eines Systems, das makroskopische räumliche, zeitliche oder funktionelle Strukturen hervorbringt. Sie befaßt sich sowohl mit deterministischen als auch stochastischen Prozessen.«¹⁹³ Es geht dabei um die Suche nach den gemeinsamen, universellen Prinzipien, die der Strukturbildung in den unterschiedlichsten Systemen zugrundeliegen.

Bahnbrechend war Hakens Beschreibung der kohärenten Aktionen der Laseratome: »Das Grundprinzip ist ja hier, daß man sehr viele Atome hat, die in der Lage sind, durch kohärente Aktionen die schöne Lichtwelle zu erzeugen. Und nachträglich gesehen ist es natürlich ein schönes Beispiel für Selbstorganisation; es war mir nur damals in dem Sinne nicht bewußt, sondern ich fand eben, daß der Laser diese Welle durch Wechselwirkung zwischen den Atomen erzeugt; ich entwickelte dann eben auch die adäquaten mathematischen Methoden.«¹⁹⁴ Interessant ist, daß Haken seine frühen Arbeiten zur Lasertheorie als völlig in der Tradition stehend betrachtet und sich der Bedeutung seiner Entdeckung (»ich fand eben«) noch keineswegs sofort »bewußt« war. Auf die Frage nach dem Kontext dieser Arbeiten antwortet Haken denn auch: »Der Hintergrund, von dem ich herkam, war ja die Quantenfeldtheorie des Festkörpers und da quantisiert man das elektromagnetische Feld und betrachtet die Wechselwirkung der Elektronen, so daß es sich von daher anbot, Gleichungen herzuleiten für die Wechselwirkung zwischen Lichtfeld und Materie...«¹⁹⁵

Anfang der 1960er Jahre hätten noch falsche Vorstellungen über die Natur des Laserlichts geherrscht: seine Erzeugung interpretierte man als einen Verstärkungsprozeß (»Amplification«), den Einstein bereits 1917 als »induzierte Emission« beschrieben hatte: dabei »kann eine Lichtwelle ein angeregtes Elektron zwingen (>induzieren<), mit seiner

¹⁹³ H. Haken, »Entwicklungslinien der Synergetik I«, in: *Naturwissenschaften*, 75, 1988, S. 163.

¹⁹⁴ H. Haken, Interview mit G. Küppers in Stuttgart 1985, unveröffentl. Tonbandabschrift, Universität Bielefeld.

¹⁹⁵ Ebenda.

Energie die bereits vorhandene Lichtwelle zu verstärken. Dadurch wird sowohl die Wellenhöhe als auch die Länge des Wellenzuges größer. Diese verstärkte Lichtwelle kann ihrerseits ein weiteres Elektron zwingen, diese Welle nochmals zu verstärken, und es kommt schließlich zum lawinenartigen Anwachsen.«¹⁹⁶ Andere Elektronen initiieren gleichzeitig andere sich verstärkende Wellenzüge. Damit hat sich jedoch *qualitativ* gegenüber dem Licht einer Lampe »nichts geändert, da die einzelnen »Lichtlawinen« zueinander völlig ungeordnet, chaotisch oder, wie der Physiker sagt, inkohärent sind. (...) Wie wir heute wissen, ist dies aber nur der sogenannte Verstärkungsbereich - das eigentliche Laserlicht hat grundsätzlich andere Eigenschaften.«¹⁹⁷

Es war daher das Verdienst Hakens, 1964 theoretisch dargelegt zu haben, daß das Laserlicht aus *einer einzigen kohärenten* Welle mit nur noch geringen Intensitätsschwankungen besteht.¹⁹⁸ Hier wird der Übergang des Lichts einer Lampe in das des Lasers durch die »Lasergleichung« exakt beschrieben. Eine wichtige Vorarbeit dazu bildete ein 1963 zusammen mit H. Sauermann publizierter Aufsatz, der die nicht-lineare Interaktion zwischen zwei Laserlichtmoden beschreibt.¹⁹⁹ Die dortigen Ausführungen bereiten die Idee der Synergetik vor.

Ebenfalls bereits in den 1960er Jahren wurden von Haken der Begriff des »Ordnungsparameters« und das »Versklavungsprinzip« eingeführt. Während der Begriff des Ordnungsparameters »den frühen Arbeiten von Landau entlehnt« wurde, der diesen Begriff »allerdings hauptsächlich im Hinblick auf Phasenübergänge von Systemen im thermischen Gleichgewicht bei Gitterumwandlungen« benutzt hatte²⁰⁰, sieht Haken zum Versklavungs-

¹⁹⁶ H. Haken, »Entwicklungslinien der Synergetik«, a. a. O., S. 165.

¹⁹⁷ Ebenda.

¹⁹⁸ H. Haken in: *Zeitschrift für Physik*, 181, 1964, S. 96.

¹⁹⁹ H. Haken und H. Sauermann, »Nonlinear Interaction of Laser Modes«, in: *Zeitschrift für Physik*, 173, 1963, S. 261 ff.

²⁰⁰ »... das haben wir dann bei der Deutung hergenommen. Den Landau haben wir nicht verwendet, um die Lasertheorie zu entwickeln, sondern hinterher haben wir gesehen: man kann die Lasertheorie auch phänomenologisch deuten, wenn man sich eben auf Landau bezieht.« (Interview mit H. Haken, a. a. O.) Diese Übernahme von Begriffen oder Theorieteilern aus fremden Konzepten zur Deutung des eigenen Ansatzes, *nachdem* dieser bereits in seinen Grundzügen entwickelt ist, ist für die Ausformulierung der

prinzip »eigentlich keine Vorläufer«.²⁰¹ Dieses »hatte ich schon 1963 eingeführt. Typisch ist ja bei den Lasergleichungen, daß man ungeheuer viele Variablen hat, meinetwegen 10^{17} oder 10^{18} Atome, und dann vielleicht zehn oder hundert Laserschwingungen - jedenfalls ein hochdimensionales, nicht-lineares System -, und der entscheidende Gedanke war: wie werde ich nun diese vielen Freiheitsgrade der Atome los? Das geschieht eben durch, wie wir es damals nannten, »adiabatische Elimination«. Im Laufe der Jahre haben wir dann festgestellt, daß das nur ein Zipfel einer größeren Wahrheit ist, nämlich daß man diese Varianten exakt eliminieren kann. Das eben ist das Versklavungsprinzip, das besagt, daß in der Nähe von Instabilitätspunkten die ganze Dynamik des Systems nur durch wenige Ordnungsparameter bestimmt wird und nicht durch viele Freiheitsgrade der versklavten Systeme.«²⁰²

Damit hatte Haken seine Grundbegriffe zur Theorie des Lasers beisammen, dessen Funktionsweise zum besseren Verständnis hier abschließend skizziert werden soll²⁰³: Laseraktive Atome einer bestimmten Substanz werden im Laser durch permanente Energiezufuhr im thermischen Ungleichgewicht gehalten. Überschreitet die Energiezufuhr einen kritischen Wert, wird aus normalem Licht Laserlicht, aus Unordnung Ordnung. Normales Licht besteht bekanntlich aus einem »Gemisch« von Photonenwellen (Moden) mit unterschiedlicher Frequenz und Phase. Die emittierenden Atome senden ihre Elementarwellen spontan und unkorreliert aus. Laserlicht dagegen zeichnet sich durch seine hohe

Lasertheorie durch Haken und seine Mitarbeiter charakteristisch: so erwähnt Haken etwa die Blochsche Theorie der Spinrelaxation, die sich zur Beschreibung von Dämpfungseffekten im Laser heranziehen läßt. Die Suche nach Analogien setzte bei Haken offenbar schon recht früh ein.

²⁰¹ Es gab »später allerdings in der Mathematik Parallelentwicklungen, so um Ende der 60er Jahre ... und zwar in Rußland von Pliss. Das ist mir persönlich aber erst Ende der 70er Jahre bekannt geworden. ... Das Theorem von Pliss besagt im wesentlichen auch wieder die Möglichkeit der Elimination überflüssiger Variablen. Aber andererseits haben wir unser eigenes Versklavungsprinzip weiterentwickelt, ... so daß wir also im gewissen Sinne eine Entwicklung gemacht haben, die sogar jetzt noch der Mathematik voraus ist.« (Interview mit H. Haken, a. a. O.)

²⁰² Interview mit H. Haken, a. a. O.

²⁰³ Eine populäre Darstellung findet sich in H. Haken, *Erfolgsgeheimnisse der Natur*, Frankfurt a. M./Berlin/Wien 1984, S. 61 ff.

Kohärenz aus: Es besteht praktisch nur aus einem unendlichen, monochromatischen Wellenzug, in dem die gesamte Energie des lichtelektrischen Feldes steckt. Die Ursache dafür liegt in der Koordination der Emissionen der Laseratome. Entscheidend dabei ist, daß diese Koordination vom Laserlicht selbst geleistet wird. Freilich ist dieser Prozeß der Selbst-Koordination von den technischen Anfangsbedingungen abhängig: durch die besondere Konstruktion der Laserapparatur (Spiegelausrichtung und -abstand) und bedingt durch die elektrische Pumpleistung (Arbeitsspannung) erhält ein bestimmter Wellenzug einen minimalen Vorteil gegenüber allen anderen, sich zu verstärken; dadurch wird die Symmetrie der »gleichberechtigten« Wellenzüge »gebrochen« und die geringfügig bevorzugte Mode kann sehr rasch so amplifizieren, daß sie schlagartig alle anderen Laserelektronen dazu zwingt, ihre Photonenwellen in gleicher Phase mit ihr zu emittieren (dies nennt Haken »Versklavung«). Die Folge ist, daß das den Laser verlassende Licht schließlich aus nahezu vollkommen kohärenten Wellenzügen besteht.

»Versklavung« bedeutet übrigens nur, daß die stabilen Moden die Wirkung der instabilen Moden über nicht-lineare Wechselwirkungen begrenzen; keineswegs werden diese dadurch eliminiert. Vielmehr findet unter den kritischen Moden eine Selektion statt dergestalt, daß die »siegreiche« Welle zum »Ordner« wird, wie Haken sagt, und damit das Leuchtverhalten der Elektronen bestimmt. Umgekehrt bringen aber die Elektronen durch ihr gleichmäßiges Schwingen den Ordner erst hervor. Das Auftreten des Ordners und das kohärente Verhalten der Elektronen bedingen sich daher gegenseitig: beides »synergisiert«.

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

»Ende der 60er Jahre wurde uns klar, daß der Laser nur ein Spezialfall ist, von einer viel größeren Wirklichkeit sozusagen; und wir haben daraufhin systematisch angefangen, die mathematischen Methoden zu entwickeln, nicht nur für den Laser, sondern auch für diese allgemeinen Systeme. Aber da hat sich eben doch erwiesen, daß wir vieles im Lasergebiet schon vorweggenommen hatten, z. B. wie man die Fluktuationen wegbringt, die ja beim

Laser wesentlich sind und die den Anstoß geben dafür, daß die Selbstorganisation erst mal anfängt, und die dann auch darüber entscheiden, in welche Richtung die Selbstorganisation läuft. Es gibt ja gerade an den Instabilitätspunkten eine ganze Klasse von Möglichkeiten, wo das System hineinlaufen kann; wo es dann tatsächlich hineinläuft, das entscheiden die Fluktuationen.«²⁰⁴

Von traditionellen Arbeiten auf dem Gebiet der Laserphysik unterscheide sich der neue Ansatz vor allem in drei Punkten, die für drei wesentliche Merkmale von Selbstorganisationsprozessen überhaupt ständen: (1.) das Moment der *Selektivität* (Auslese bestimmter Moden), (2.) die Rolle der *Fluktuationen* als Motor der Systementwicklung sowie (3.) die Bedeutung der *Nicht-Linearität* als Mechanismus der Selbstverstärkung von Schwankungen.

(1.) Neu war zum einen »der Vielmodenbetrieb, der ja vorher beim vorangegangenen Maser überhaupt nicht diskutiert zu werden brauchte«; hingegen müsse »der Laser von einer Vielmodentheorie behandelt werden, was gerade im Hinblick auf die Frage nach Selektionsvorgängen wichtig ist ... später bei Selbstorganisationsprozessen; also für die Frage: wie kommt es überhaupt, daß im Laser nur eine einzige Mode überlebt und die anderen kaputt gehen?«²⁰⁵

(2.) Ein »anderer Punkt, der wesentlich neu hinzukam, war die Rolle der Fluktuationen, die ja quantentheoretischer Natur sind. Der Aufbau des Ordnungszustandes im Laser wird eben durch einen Spontanemissionsakt oder ein paar Akte am Anfang erst einmal getriggert.«²⁰⁶

(3.) »Ein weiterer Punkt war noch die Mitnahme der Nicht-Linearität. Ich habe damals ziemliche Auseinandersetzungen gehabt mit einer Reihe anderer amerikanischer Theoretiker, die den Laser auch behandelt haben, aber mit einer linearen Theorie, und die also gar

²⁰⁴ Interview mit H. Haken, a. a. O.

²⁰⁵ »Wir haben damals gewissermaßen ... eine Art Darwinismus der Lasermode entwickelt, ohne auf Darwin Bezug zu nehmen und auch ohne uns damals bewußt zu sein, daß das da ja Darwinismus ist; jedenfalls die Gleichungen haben damals gezeigt, daß (...) diese Modenselektion stattfindet.« (Interview mit H. Haken, a. a. O.)

²⁰⁶ Ebenda.

nicht erkannt haben, daß da an der Stelle qualitativ etwas Neues passiert.«²⁰⁷ Wiederum, wie schon bei Prigogine, bildet die Anerkennung der hervorragenden Rolle nicht-linearer Prozesse die Voraussetzung für die Entwicklung einer Theorie selbstorganisierender Systeme, in diesem Falle des Lasers.

In der Frühphase, von der hier die Rede ist, war Haken jedoch der Charakter seiner Lasertheorie als einer Selbstorganisationstheorie noch keineswegs deutlich; zu dieser Einsicht bedurfte es zahlreicher Analogiewahrnehmungen und entsprechender Verallgemeinerungen seines Ansatzes. In dem Interview heißt es dazu:

Küppers: Das heißt also, es gab in dieser Zeit eindeutig ganz spezielle Problemstellungen, die Ihre Arbeiten von anderen Arbeiten, damals üblichen Arbeiten zur Laserphysik, unterschieden haben?

Haken: Richtig.

Küppers: Und gleichzeitig kann man sagen, daß diese ersten Laserarbeiten nicht explizit einen Bezug zur Selbstorganisation hatten.

Haken: Richtig.

Küppers: ... Wenn man so will, so war es die klassische Problemtradition, die definiert war von diesem neuen Effekt²⁰⁸, den man gefunden hatte und den es nun zu erklären galt.

Haken: Ja, d.h. es war vielleicht ein bißchen umgekehrt, insofern wir die Effekte vorausgesagt hatten. Was vorausgesagt worden war, war eben ..., daß man das Maserprinzip auf den sichtbaren Bereich ausdehnen kann und daß es hier möglich sein sollte, kohärentes Licht zu erzeugen. Aber welche Eigenschaften dieses kohärente Licht im einzelnen hatte, wie insbesondere die Mechanismen beschaffen sind, durch die im Laser die einzelnen Moden ausgewählt werden, das war damals alles nicht bekannt. ... Die Aufgabe war gewissermaßen abstrakt gestellt. ...

Küppers: Das heißt also, der Maser war der Ausgangspunkt, dann kamen die Arbeiten, die zeigten, dies muß auch im optischen Bereich möglich sein, und die zuerst global und dann immer genauer die Eigenschaften dieses optischen Lasers beschrieben.

²⁰⁷ Ebenda.

²⁰⁸ Gemeint ist die Entstehung kohärenten Laserlichts.

Haken: Genau. Und dann hatten wir eben das Glück, daß unsere Voraussagen kurz nachher experimentell bestätigt worden sind.

Insgesamt erstreckte sich die Begründungsphase von Anfang bis Ende der 1960er Jahre. Auf je mehr Parallelen Haken während dieser Zeit bei älteren Konzepten (z. B. Darwin) bzw. bei anderen Selbstorganisationsforschern (z. B. M. Eigen) stieß und je mehr Übertragungsmöglichkeiten seine Theorie im Hinblick auf andere Forschungsfelder offenbarte (z. B. Populationsdynamik), desto deutlicher wurde ihm die globale Tragweite seines Ansatzes, so daß er im Ausgang der 1960er Jahre zu einer allgemeinen Lehre von der Synergetik ausbaute.

Bereits Ende der 1960er Jahre war, wie gesagt, Haken und seinen Stuttgarter Mitarbeitern klar geworden, daß der Laser nur einen speziellen Fall aus einer weitaus größeren Fallklasse darstellt. Die kognitiven Voraussetzungen und die Bereitschaft für eine systematische Suche nach weiteren Anwendungsbeispielen waren damit geschaffen. Zu diesem Zeitpunkt hatten Hakens Überlegungen einen Punkt erreicht, dessen Ergebnisse er selbst so zusammenfaßt:

- »1) Beim Übergang vom Lampenlicht zum Licht des Lasers kommt es zu einer Ordnung im Laser, d.h. zu einer ausgeprägten *Selbstorganisation*.
- 2) Der Übergang steht in einer strengen *Analogie* zu bestimmten *Phasenübergangsmodellen* für Systeme im thermischen Gleichgewicht.
- 3) Bei der Auswahl zwischen verschiedenen Lasermodes tritt eine Art *Darwinismus* bereits in der unbelebten Natur auf.«

Die beiden letzten Punkte regten Haken zu der Überlegung an, »ob die beim Laser gefundenen Erscheinungen nicht auch in vielen anderen physikalischen Systemen fern vom thermischen Gleichgewicht als Nichtgleichgewichtsphasenübergänge angetroffen werden können« (bei Schmelzvorgängen, Gitterumwandlungen usw.); besonders aber drängte sich ihm der Verdacht auf, »daß eine Art von Darwinismus auch in der unbelebten Natur eine entscheidende Rolle spielt, nämlich bei der Entstehung von Strukturen in Systemen fern

vom thermischen Gleichgewicht.« Um den vermuteten allgemeinen Prinzipien hinter all diesen Phänomenen auf die Spur kommen zu können, machten sich Haken und seine Mitarbeiter daran, zum einen »weitere Beispiele zu finden, die meinen Verdacht bestärkten«, und zum andern geeignete theoretische Konzepte sowie mathematische Methoden zu finden oder zu entwickeln.

»Beispiele entnahm ich damals der Biologie, z. B. das Auftreten bestimmter Pflanzen in den verschiedenen Klimazonen, die sich auch an den Höhenmarken im Gebirge ablesen lassen. Dabei wirkt das Klima ähnlich wie ein äußerlich veränderbarer Parameter, wie z. B. die Pump-Energie beim Laser. Andere Beispiele, die wir damals heranzogen, waren das Umkippen von Gewässern, wenn der Verschmutzungsgrad eine kritische Größe erreicht, oder dann im soziologischen Bereich Hinweise auf Modellvorstellungen von W. Weidlich über die Bildung der öffentlichen Meinung, die er in Analogie zum sogenannten Ising-Modell des Ferromagnetismus entwickelte.«²⁰⁹

Damit war der Boden bereitet für die Gründung eines neuen Forschungsgebietes: der *Synergetik*.²¹⁰ Deren Aufgabe ist es, die Prinzipien und Mechanismen für das Zusammenwirken zahlreicher Teile eines Systems zu untersuchen und die daraus resultierende Entstehung räumlicher, zeitlicher oder funktioneller Strukturen zu erklären. »Um die neue Forschungsrichtung zu kennzeichnen, führte ich in einer Vorlesung im Wintersemester 1969/70 das Wort »Synergetik« ein«²¹¹; publikationsmäßig tritt der neue Begriff erstmals auf in dem zusammen mit R. Graham verfaßten Artikel »Synergetik - die Lehre vom Zusammenwirken. Was verbindet die Physik, Chemie und Biologie?«.²¹²

²⁰⁹ H. Haken, »Entwicklungslinien der Synergetik I«, a. a. O., S. 169. Die erwähnte Arbeit von W. Weidlich findet sich im *Brit. J. Math. Stat. Psychol.*, 24, 1971, S. 251 ff.

²¹⁰ »Im nachhinein scheint es mir zuweilen, als hätte ich dieses Gebiet nicht »gegründet«, sondern eher entdeckt.« (Ebenda, S. 169)

²¹¹ Ebenda.

²¹² In: *Umschau in Wissenschaft und Technik*, 6, 1971, S. 191 ff. - Wie Haken bald feststellte, war der Begriff nicht völlig neu: »Der bedeutende Physiologe Sherrington hatte schon um die Jahrhundertwende das Wort »Synergy« eingeführt, um das Zusam-

Begriffsgeschichtlich interessant ist, wie Haken den Bedeutungsunterschied zwischen »Synergetik« und »Selbstorganisation« faßt: den Hinweis des Interviewers (G. Küppers) aufgreifend, daß »Instabilität« der »Urbegriff« sei, der so verschiedene Konzepte wie Synergetik, dissipative Strukturen, Autopoiese und die Theorie selbstreferentieller Systeme miteinander verklammere, führt er aus:

»Also bei mir war es so, daß ich zu dem Wort »Synergetik« eigentlich von der Tradition der Laserphysik kam. Da sieht man ja, daß durch das Zusammenwirken der einzelnen Atome etwas qualitativ Neues, diese kohärente Lichtquelle, entsteht ... Der Begriff der »Selbstorganisation«, hätte man auch dran denken können, aber mir kam es eigentlich darauf an: wie entstehen Strukturen? So daß bei mir der Blick gerichtet war ... durch die Laserphysik - vielleicht voreingenommen war, wenn man so will - auf die Frage des Zusammenwirkens von Einzelteilen, um etwas Neues zu erzeugen; und da gibt es ja an sich den Begriff der »kooperativen Effekte« in der Physik, aber die kooperativen Effekte sind eigentlich in Beschlag genommen vor allem für Systeme im thermischen Gleichgewicht. Und deshalb war die Idee, man muß doch jetzt die Systeme fern vom thermischen Gleichgewicht unterscheiden von denen im thermischen Gleichgewicht, und deshalb schien es mir geboten, ein neues Wort für Kooperation zu erfinden. Und die andere Idee war, daß die Selbstorganisation in gewissem Sinne dann - dies ist vielleicht zu hart gesagt - zu einem Beiprodukt wird, nämlich so, daß die Synergetik eben eine Methodik ist, eine Wissenschaft ist, während das Wort »Selbstorganisation« ja ein Phänomen bezeichnet. ...

menwirken der Muskeln, ein höchst komplizierter Vorgang, zu kennzeichnen. Zu meiner eigenen Überraschung schließt sich nun der Kreis: Gemeinsam mit Kelso, Bunz und Schöner konnte ich kürzlich mit Hilfe der Synergetik ein neuartiges Paradigma für dieses Zusammenspiel der Muskeln und Neuronen aufstellen«. Ebenso ist bei dem bekannten Architekten Buckminster Fuller, wenn auch in völlig anderer (nämlich »geodätischer«) Bedeutung, von »Synergetics« die Rede (H. Haken, »Entwicklungslinien der Synergetik, Teil I«, a. a. O., S. 170). - Auch Hakens Wortneuschöpfung »Versklavung« besitzt in der Wissenschaft eine gewisse Tradition: »Das Wort »Versklavung« gibt es natürlich in gewissem Sinne in der Elektrotechnik. Wenn ein Oszillator einer Schwingung ausgesetzt wird, dann kann der Oszillator von der Schwingung versklavt werden, so daß in diesem Sinne das ein terminus technicus ist, der allerdings in der Synergetik nun viel, viel weiter gefaßt ist und auch einen Bedeutungswandel erfahren hat.« (H. Haken, Interview mit G. Küppers, a. a. O.)

Mir ging es darum zu kennzeichnen, daß wir für diese Vorgänge eine neue Disziplin brauchen. Und daher das Wort »Synergetik«: das ist ja eine Wissenschaftsbezeichnung wie Physik oder Mathematik; während das Wort »Selbstorganisation« ja die Bezeichnung eines Phänomens oder Vorgangs ist. Das heißt also, die Synergetik könnte man, nachträglich gesehen, als eine Wissenschaft auffassen, die sich unter anderem, vielleicht nicht ausschließlich, mit dem Phänomen der Selbstorganisation befaßt und gleichzeitig eine Interpretation gibt: nämlich Selbstorganisation kommt zustande durch das Zusammenwirken von Teilen, so daß die Synergetik gewissermaßen eine Erklärungsmöglichkeit für Selbstorganisation vorwegnimmt.«²¹³

Haken interessierte sich also gleich nach Ausbildung seiner Lasertheorie für die Etablierung einer *neuen Wissenschaft*, die u. a. eine *Erklärung* für Phänomene der Selbstorganisation auf *allen* nur möglichen Gebieten leisten sollte, und er wählte zu ihrer Benennung den Terminus »Synergetik«, weil dadurch zugleich der für alle selbstorganisativen Prozesse *grundlegende Mechanismus* bezeichnet werde. In der Tat ist ja »Selbstorganisation« zunächst nur die Benennung eines erklärungsbedürftigen Phänomens. Aber gerade dadurch ist »Selbstorganisation« als »Brückenbegriff« zwischen den verschiedenen Konzepten höchst geeignet, zumal auch spezifischer als der oben genannte Begriff »Instabilität«.

²¹³ H. Haken, Interview mit G. Küppers, a. a. O. Zudem weist Haken auf die »doppelte Bedeutung« der Synergetik hin: sie bedeute »einerseits das Zusammenwirken der Teile in einem System, andererseits das Zusammenwirken der verschiedenen Disziplinen, um wieder eine neue Qualität zu erzielen«.

2.3 Die Theorie autokatalytischer Hyperzyklen

Ein spezifisches Konzept von Selektivität liegt auch der Theorie autokatalytischer Hyperzyklen zugrunde, die die Entstehung des Lebens als ein Resultat von Ausleseprozessen im molekularen Bereich erklärt. Wie schon die Hakensche Lasertheorie, so kann auch diese Theorie als eine Fortsetzung des Darwinschen Ansatzes im präbiotischen Gebiet betrachtet werden: in beiden Fällen geht es um die Selbstorganisation der Materie im Rahmen nicht-linearer, selektiver Prozesse.

Der Begründer der Theorie autokatalytischer Hyperzyklen ist Manfred Eigen, Jahrgang 1927, Chemie-Nobel-Preisträger von 1967 und seit 1964 Direktor des Max-Planck-Instituts für physikalische Chemie in Göttingen. Ab Mitte der 1950er Jahre hatte sich Eigen mit der Untersuchung sehr schnell verlaufender Ionenreaktionen befaßt, zu Beginn der 1960er Jahre beschäftigte er sich mit der Anwendung neuartiger Analysetechniken auf biochemische Reaktionen. Im Zusammenhang damit setzte er sich erstmals intensiv mit Fragen der Speicherung und Verarbeitung von Information in biomolekularen Systemen auseinander. Dabei bildete für Eigen die Wechselwirkung zwischen den Nukleinsäuren der RNS (als den Informationsträgern) und den Proteinen (als den Funktionsträgern) die Basis für alle molekularen Informationsübertragungsvorgänge in der Zelle. Es wird freilich eine Spezifität der Zuordnung benötigt, damit diese Wechselwirkung zur »Unterscheidung« genutzt werden kann; darüber hinaus müsse man ein dem System immanentes Programm postulieren, damit Unterscheidungen zu einer »Erkennung« führen.²¹⁴

Von »Selbstorganisation« ist bei Eigen erst zu Beginn der 1970er Jahre die Rede. Die Beschäftigung mit Selbstorganisationsphänomenen ergab sich aus der Sicht Eigens folgerichtig aus seinen Arbeiten zur Reaktionskinetik, genauer aus dem Versuch »zu zeigen, daß Selektion einfach das Ergebnis eines kinetischen Verhaltens ist, das auf

²¹⁴ Siehe seine Arbeit »Information, ihre Speicherung und Verarbeitung in biomolekularen Systemen«, erschienen in den *Berichten der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 68, 1964, S. 889 ff. Eine zusammen mit L. de Mayer überarbeitete und erweiterte Fassung erschien 1966 unter demselben Titel in *Naturwissenschaften*, 53, S. 50 ff.

bestimmten Voraussetzungen basiert«.²¹⁵ Eigen hatte erkannt, daß das Problem der Entstehung biologischer Information gelöst werden kann, wenn man sie auf präbiotische molekulare Ausleseprozesse zurückführt. Die Genese und Stabilisierung biologischer Information müsse als das Resultat selbstorganisierter Wechselwirkungsprozesse zwischen Nukleinsäuren und Proteinen (Enzymen) verstanden werden. Den Weg zu dieser Erkenntnis, ausgehend von der Reaktionskinetik, beschreibt Eigen wie folgt:

»Wir hatten ja früher sehr viel mehr Kinetik gemacht von schnellen Reaktionen, zunächst mal das methodisch entwickelt, dann haben wir verschiedene Phasen durchlaufen: erst wurden die ganz schnellen protolytischen Reaktionen untersucht, dann kamen die Metallkomplexe und dann die Organiker ..., zum Schluß kamen die Biochemiker dran. Und dann sind wir darangegangen, Enzymreaktionen zu untersuchen; und dann kam in einem unserer Winterseminare mal die Frage: wie kommt es eigentlich, daß die Enzyme immer so optimal funktionieren, daß diese komplexen Mechanismen so aufeinander abgestimmt sind?²¹⁶ Da sagte einer der Mitarbeiter: das liegt am Darwinschen Prinzip, das ist Selektion ... und dann kam die Frage auf: was ist überhaupt »Selektion«? ... Da haben wir dann versucht, eine Theorie der Selektion zu machen, die sich auf Moleküle anwenden läßt. Und daraus ist das Ganze dann entstanden.«

²¹⁵ M. Eigen, Interview mit G. Küppers in Göttingen im Juli 1985, unveröffentl. Tonbandabschrift, Universität Bielefeld.

²¹⁶ Durch die neue Technik zur Untersuchung schneller chemischer Reaktionen waren »wir zum ersten Mal (...) in der Lage, so einen Enzymmechanismus in seine Elementarreaktionen zu unterteilen, um festzustellen, das paßt ja alles, das geht ja bis an die Grenze des physikalisch Möglichen; es bleibt alles im Rahmen des Erklärbaren, aber es ist optimal. Daher die Frage: wie ist so etwas möglich, das kann doch nicht einfach von ungefähr kommen, das muß doch irgendwie konstruiert sein? Aber dann waren wir doch so weit - biologisch und darwinistisch genug - zu sagen: na ja, das muß sich selbst organisiert haben in dieser Weise. Aber wie kann man solche Gesetzmäßigkeiten auffinden? So haben wir dann in der ersten Zeit versucht, das eben kinetisch aufzubauen, (...) wir haben also Nukleinsäuren untersucht. (...) Wir machen auch jetzt noch sehr viel Kinetik mit Phagen, also RNA-Replikation, um zu sehen: sind diese Gleichungen auch realistisch, sind die wirklichen Prozesse der Reproduktion auch tatsächlich so abgelaufen?«

1971 erschien M. Eigens erste Arbeit zur molekularen Selbstorganisation²¹⁷, in der er zeigte, daß Selektion ein »physikalisches Gesetz« ist; es ging ihm um den Nachweis, daß sich die Ideen Darwins auch auf eine Evolution von Strukturen weit unterhalb der Ebene der Organismen - also im präbiotischen Bereich autokatalytischer Prozesse - anwenden und damit ihrerseits auf Prinzipien der chemischen Reaktionskinetik beziehen lassen. Das Ziel war, »einfach zu zeigen, daß »natural selection« nichts ist, was irgendwie mystisch ist, was von außen kommt, sondern daß es Eigenschaften im Materieverhalten gibt, die sich in dieser Form organisieren, die immer komplexer werden, die immer mehr Informationen speichern, und daß das doch an physikalische Gesetzmäßigkeiten geknüpft ist; das ist so etwa die Idee.«²¹⁸ Diese erste Arbeit Eigens zur Theorie der Selbstorganisation präbiotischer Materie kommt zu folgenden Ergebnissen:

1. »Das für die Evolution lebender Systeme charakteristische Selektionsverhalten« tritt bereits auf der Stufe der Reproduktion von Nukleinsäuren und Proteinen »als eine speziellen Reaktionssystemen inhärente Materieeigenschaft in Erscheinung«.
2. »Das Auftreten einer Mutation mit selektivem Vorteil entspricht einer Instabilität, die mit Hilfe des Prinzips von Prigogine und Glansdorff für stationäre, irreversible thermodynamische Prozesse als solche erklärt werden kann. Der Optimierungsvorgang der Evolution ist somit im Prinzip unausweichlich, hinsichtlich der Auswahl der individuellen Route jedoch nicht determiniert.«
3. Die Entstehung des Lebens sei an eine Reihe von Eigenschaften geknüpft, »die sich sämtlich physikalisch eindeutig begründen lassen«; der Ursprung des Lebens lasse sich »ebensowenig wie die Evolution der Arten als einmalig vollzogener Schöpfungsakt darstellen«.²¹⁹

²¹⁷ M. Eigen, »Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules« in: *Naturwissenschaften*, 58, 1971, S. 465 ff. Einer Anmerkung zufolge (S. 465) wurde ein Teil dieser Arbeit bereits im Frühjahr 1970 als »Robbins Lectures« am Pomona College in Kalifornien präsentiert.

²¹⁸ Interview mit M. Eigen, a. a. O.

²¹⁹ M. Eigen, »Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules«, a. a. O., S. 521 f.

Im gleichen Jahr (1971) erschien Eigens Artikel »Molecular Self-Organization and the Early Stages of Evolution«.²²⁰ Im Folgenden zitieren wir aus der 1972 publizierte deutschen Übersetzung.²²¹ Eine Theorie der Selbstorganisation sei notwendig, um den *Ursprung* des in der lebenden Zelle ablaufenden Wechselspiels zwischen Nukleinsäuren und Proteinen verstehen zu können. Bei diesem Wechselspiel greifen »Funktion« und »Information« in zirkulär geschlossener Weise ineinander: »Es ist so, als ob man einen geschlossenen Kreis zeichnet.«²²² Bei der Entstehung derartiger »operational geschlossener« Reaktionszyklen wirken auch viele Zufallsereignisse mit, »die keinerlei instruierte funktionelle Bedeutung haben. Es kommt vielmehr darauf an, daß irgendwann einmal derartige Zufallseffekte auf ihren Ursprung zurückkoppeln können und dadurch selbst die Ursache eines verstärkten Wirkungsmechanismus werden.«²²³ Hier haben wir einige der zentralen Begriffe von Selbstorganisationstheorien beieinander: die »operationale Geschlossenheit« systemischer Prozesse, die mögliche »positive Rückkopplung« kontingenter Ereignisse auf ihre Ursachen sowie die dadurch eingeleiteten »nicht-linearen Selbstverstärkungsprozesse«, die zur Etablierung relativ stabiler »Kopplungen« von Prozessen bzw. Strukturen führen können.

Im ersten Kapitel des umfangreichen Artikels werden die Voraussetzungen zur Selbstorganisation der Materie diskutiert:

(1.) Die Evolution der Materie qua Selbstorganisation geht stets von Zufallsereignissen aus; der Ursprung des Lebens nimmt seinen Ausgang im »molekularen Chaos«. Es sei nun aber eine falsche Vorstellung anzunehmen, »daß irgendwelche Organismen, wie wir sie heute kennen, sich etwa auf zufällige Art bilden können«: dazu sei die Komplexität der möglichen Anordnungen der Bausteine schon bei relativ kleinen Proteinmolekülen viel zu hoch; es war ja gerade diese offensichtliche Unwahrscheinlichkeit der zufälligen Entstehung funktionstüchtiger komplexer Moleküle, die immer wieder die Ansicht genährt hat,

²²⁰ In: *Quarterly Reviews of Biophysics*, 4, 2 & 3, S. 149 ff.

²²¹ M. Eigen, »Molekulare Selbstorganisation und Evolution«, in: *Nova Acta Leopoldina*, Nr. 206, Bd. 37/1, 1972, S. 171 ff.

²²² Ebenda, S. 173.

²²³ Ebenda.

»daß unsere gegenwärtige Physik die Existenz oder den Ursprung des Lebens nicht erklären kann«. ²²⁴ Eigen zieht aus dieser Unwahrscheinlichkeit einen ganz anderen Schluß:

(2.) Selbstorganisation erfordert *instruktive* Eigenschaften bereits auf der *molekularen* Ebene. Für selbstorganisierende Systeme ist die »Reproduktion« oder »Konservierung« des eigenen Informationsinhalts funktionell grundlegend. »Eine Theorie der Selbstorganisation muß den Ursprung und die Evolution dieser primären Information beschreiben, d. h. einer »Urinformation«, in der die funktionelle Fähigkeit, sich selbst zu erhalten, niedergelegt ist.« ²²⁵ Über den evolutionären »Wert« einer neuen Information entscheidet aber die natürliche Selektion.

Daher gilt (3.): Information »entsteht« oder gewinnt an Wert durch Selektion. Einer »physikalischen Selektions- und Evolutionstheorie« stellt sich dann die Aufgabe, »eine Korrelation zwischen einem geeignet definierten Überlebens- oder Selektionswertparameter und den physikalischen Eigenschaften des Systems [zu] liefern«. Eine solche Theorie »kann dann als eine statistische Theorie »irreversibler« chemischer Prozesse verstanden werden«. Einer solchen Theorie zeigt sich das Besondere selbstorganisierender Systeme daran, daß in ihnen die Erzeugung der »Urinformation« einem *reflexiven* Selektionsprozeß unterliegt: »Ein selbstorganisierendes System selektiert für eine optimale Selektionsleistung.« ²²⁶ »Optimierte Selektivität« ist die Voraussetzung für eine Evolution, die zwar von Zufallsereignissen *ausgeht*, deren Auswirkungen dann aber selbsterzeugten Selektionsregeln unterwirft. Selektion ist indes keine allgemeine Eigenschaft der Materie, da sie

(4.) nur bei geeigneten Substanzen und unter bestimmten Bedingungen auftritt. An dieser Stelle führt Eigen die Unterscheidung zwischen drei Evolutionsphasen ein: (I) einer präbiotischen, rein »chemischen« Phase, in der sich »alle wichtigen Bestandteile biologischer Makromoleküle«, z. B. Nukleotide und Aminosäuren, »bilden und zu potentiellen

²²⁴ Ebenda, S. 173 f.

²²⁵ Ebenda, S. 174.

²²⁶ Ebenda, S. 175.

»Informationsträgern« polymerisieren konnten«²²⁷; (II) einer Phase des Übergangs vom »Unbelebten« zum Belebten sowie (III) jener phylogenetischen Phase, in der die Entwicklung der Arten stattfindet, die lange Zeit im Vordergrund der biologischen Betrachtung stand. Eigen interessiert sich nun vor allem für die bislang vernachlässigte zweite Phase, die durch die Selbstorganisation der Materie zu replikationsfähigen »Individuen« gekennzeichnet ist: hier treffen wir auf offene biochemische Systeme fern ab vom Gleichgewicht, die über die Aufnahme freier Energie bzw. die Abgabe von Zerfallsprodukten (Metabolismus) ihre interne Entropieproduktion beständig kompensieren; die »Einfütterung« energiereicher Materie (>Nahrungsaufnahme<) dient dazu, »bestimmte Reaktionen ablaufen zu lassen und damit das System daran zu hindern, in den trägen oder »toten« Gleichgewichtszustand »abzufallen««. Explizit weist Eigen an dieser Stelle auf Prigogines thermodynamische Theorie nichtgleichgewichtiger Prozesse hin.²²⁸

Es ist diese Phase, in der es zur Ausbildung kreisförmig geschlossener, selbstreproduktiver »Hyperzyklen« kommt, deren Wachstum autokatalytisch geregelt ist und die in hohem Maße zur Korrektur von Replikationsfehlern und damit zur Erhaltung und Weitergabe komplexer Information befähigt sind. Hyperzyklen sind Zusammenschaltungen aus mehreren katalytischen Zyklen, die ihrerseits aus mehreren Enzymen zusammengesaltet sind: jeder dieser einzelnen Katalysezyklen (I_1 bis I_n) enthält zum einen die Information für seine eigene Reproduktion und zum andern Information für die Synthese eines spezifischen Enzyms (E), das die Tätigkeit des im Hyperzyklus jeweils nachfolgenden Katalysezyklus katalytisch unterstützt: im ganzen ergibt sich ein hyperzyklisch geschlossener Katalyse-»Ring«. Ein Vergleich dieser Phase mit der vorhergehenden zeigt: Der Prozeß der Lebensentstehung setzt ein unter den biologisch unspezifischen Randbedingungen der chemischen Evolution, während der die Makromoleküle noch keinerlei genetische Information verschlüsseln, und geht im Verlauf der Selbstorganisation autokalytischer Hyperzyklen sukzessive über zur Ausbildung spezifischer biologischer Randbedingungen, in denen genetische Informationen codiert werden (Selbstinstruktivität).

²²⁷ Ebenda.

²²⁸ Ebenda, S. 176.

Untereinander konkurrieren solche Hyperzyklen um Selektion (Viabilität); die Selektion geschieht hierbei äußerst scharf, d. h. sie ähnelt einem »Alles-oderNichts«-Verhalten. Diese Eigenschaften erlauben den miteinander konkurrierenden Hyperzyklen die Nutzung bereits sehr geringer Selektionsvorteile.²²⁹ Indem die verschiedenen Hyperzyklen als »Quasispezies« untereinander um die knappen Aminosäuren zur Produktion von Proteinen streiten, stimulieren sie wechselseitig ihre Evolution: »schwächere« Hyperzyklen mutieren entweder vorteilhaft oder sie fallen auseinander und aus den freiwerdenden Bausteinen bilden sich neue Hyperzyklen mit neuen Eigenschaften.²³⁰

Für Eigen ist Lebensentstehung identisch mit der Entstehung biologischer Information innerhalb eines selbstinstruktiven Biosynthesezyklus. Sein »molekulardarwinistischer« Ansatz²³¹ vermeidet sowohl die teleologische Sackgasse des Vitalismus als auch die Reduktion der biologischen Evolution auf das Wirken purer Zufallsereignisse (Zufallstheorem): seine Theorie des Hyperzyklus liefert eine mathematische Formulierung des Wechselspiels von Mutation und Selektion mit Hilfe der Prinzipien der Nichtgleichgewichtstatistik bzw. der Physik offener Systeme. Dabei erweist sich die natürliche Selektion nicht als eine irreduzible Eigenschaft lebender Systeme, sondern als ein bereits bei unbelebten Materiesystemen in Erscheinung tretendes physikalisches Extremalprinzip. Im Zuge der Evolution - in der Phase der evolutiven Optimierung des Biosynthesezyklus - werden die biologischen Randbedingungen (in Form genetisch codierter biologischer Information) allerdings wichtiger als die physikalischen Milieubedingungen, indem die selbstinstruktiven biologischen Randbedingungen mit der durch sie gesteuerten Systemdynamik rückgekoppelt sind.²³² Seine »revolutionäre« theoretische Bedeutung erhält das

²²⁹ Ebenda, S. 203.

²³⁰ Entscheidend für die weitere Entwicklung ist, daß die zunächst als Eigenwert eines komplexen Selektionsprozesses entstandene organische Struktur (DNA) zur inneren Randbedingung der weiteren (phylogenetischen) Entwicklung wird.

²³¹ Vgl. B.-O. Küppers, *Der Ursprung biologischer Information*, München 1986, S. 248 ff.

²³² »Es sind vorrangig die biologischen Randbedingungen, die im Rahmen evolutionärer Erklärungsmodelle zum Explanandum werden, während die physikalischen Milieubedingungen als Antezedensbedingungen vorgegeben sind«, ebenda, S. 259 f.

Eigensche Hyperzyklus-Modell dadurch, daß es erstmals eine allgemeine mathematische Formulierung aller möglichen evolvierenden Systeme liefert, indem es dem rückgekoppelten Charakter der Evolution Rechnung trägt.²³³

2.4 Chaostheorien

Wie wir gesehen haben, ist bereits die Vorgeschichte der modernen Selbstorganisationsforschung reich an Vorstellungen zu einem »kreativen Chaos«. Überlegungen hierzu finden sich angefangen bei den frühen Atomisten bis hin zu Schelling, für den Chaos die »metaphysische Einheit der Potenzen« bedeutet. Aber erst die neueren naturwissenschaftlichen und mathematischen Theorien »dynamischer Systeme«, in denen es um die Entstehung von Ordnung aus Unordnung bzw. um Ordnungs-Ordnungs-Übergänge geht, haben diesen alten »produktiven« Chaosbegriff zu wissenschaftlichen Ehren gebracht. Die Wissenschaften selbst mußten dabei allerdings in einem schwierigen Umdenkprozeß von althergebrachten mechanistischen Vorstellungen Abschied nehmen. Heute gilt die »Chaosforschung« als ein weithin akzeptiertes neues Forschungsgebiet, ja als eine wohlfundierte eigenständige Disziplin.

Eine Chaostheorie²³⁴ haben wir bereits kennengelernt: Hakens Theorie des »chaotischen Lasers«. Aber auch Prigogines Theorie dissipativer Strukturen kann hier herangezogen werden: zeigt sie doch, daß thermodynamische Systeme fern ab vom Gleichgewicht bei Phasenübergängen chaotische Situationen durchlaufen, um sich sodann auf höheren Ordnungsniveaus wieder zu stabilisieren. Hier wollen wir einige weitere wichtige Ansätze aus den 1960er Jahren vorstellen, die zunächst unabhängig voneinander das Verhältnis von Ordnung und Unordnung thematisiert und so das, was heute unter dem Titel »Chaosforschung« verhandelt wird, begründet haben.

Einen besonderen Platz nehmen hierbei die Arbeiten von Mathematikern ein - genauer: die Versuche, mit Hilfe des Computers eine Art »experimenteller Mathematik« zu begrün-

²³³ Vgl. F. Cramer, *Chaos und Ordnung - Die komplexe Struktur des Lebendigen*, Stuttgart 1988, S. 131.

²³⁴ Allgemein auch als »Theorie dynamischer Systeme« bezeichnet.

den (Attraktortheorie und Fraktalgeometrie): z. B. das Wettergeschehen im Computer zu simulieren oder die Länge unregelmäßig gezackter Konturlinien von Küsten, Blättern usw. auszurechnen. Was solche unregelmäßigen Strukturen oder ungeordneten Systeme aus mathematischer Sicht verbindet, ist die Nicht-Linearität ihres Erzeugungsprozesses: die Beschreibung chaotischer Systeme verlangt die Verwendung nicht-linearer Gleichungen, in denen die Variablen rekursiv gekoppelt sind. Sehr bald fanden sich - ausgehend von diesen mehr mathematischen Überlegungen - zahlreiche Anwendungen auf physikalische Gegenstände: etwa Turbulenzen in Gewässern oder Luftströmungen. Die Beobachtung von Unregelmäßigkeiten - z. B. bei der Entwicklung von Preisen oder Börsennotierungen bzw. von Tierpopulationen -, das Operieren mit nicht-linearen Differentialgleichungen und die enormen Möglichkeiten von Digitalcomputern bei numerischen Lösungen bilden, wie wir sehen werden, ein kompliziertes Wechselwirkungs-dreieck, innerhalb dessen die Chaosforschung sich etabliert.

Die ersten »Chaologen«, die in den 1960er und frühen 1970er Jahren auftraten, vermochten nicht nur zu zeigen, daß selbst einfache deterministische Systeme, deren Variablen rekursiv verknüpft sind, »chaotisieren« können, es gelang ihnen auch, »Inseln der Ordnung« innerhalb chaotischer Prozeßverläufe (»Intermittenz«) sowie Übergänge vom Chaos zu neuen (stabilen) Ordnungszuständen nachzuweisen. »Die Chaosforschung ist einerseits aus dem Bemühen entstanden, sehr ungeordnet erscheinenden Abläufen, Vorgängen oder Strukturen doch eine gewisse Ordnung nachzuweisen, und andererseits aus der Überraschung, daß bestimmte Abläufe, von denen man nur wohlgeordnetes Verhalten erwartet hätte, unter bestimmten Voraussetzungen völlig chaotisch erscheinendes Verhalten zeigen. Es geht also letzten Endes darum zu verstehen, unter welchen Voraussetzungen geordnetes Verhalten vorliegt, und zu versuchen, innerhalb des nichtgeordneten Verhaltens den Grad und die Art der dennoch vorhandenen Ordnung nachzuweisen.«²³⁵

Bei dem Versuch, die Gültigkeit des klassischen deterministischen Programms auch für »scheinbar« ungeordnete, chaotisch »anmutende« Phänomene zu demonstrieren, sollte dieses Programm letztendlich Schiffbruch erleiden - obwohl oder gerade weil es den Chaoswissenschaftlern gelang, »Ordnung im Chaos«, aber eben auch »Chaos in der Ord-

²³⁵ G. Binnig, *Aus dem Nichts*, München/Zürich 1989, S. 171.

nung« nachzuweisen: Zufälle sind strukturiert, aber umgekehrt ist die Entstehung von Strukturen ihrerseits von Zufällen abhängig.²³⁶ Genau darin gründet der Schock, den die Chaostheorien bei Physikern und anderen »Freunden der Ordnung« (z. B. Planungsexperten) auslösen sollte: daß auch in deterministischen Systemen, deren Verhalten doch eigentlich - zumindest im Prinzip - beliebig weit voraussagbar sein sollte, Unordnung auftritt und mithin allenfalls kurzfristige Prognosen möglich sind: das Ergebnis ist ein »deterministisches Chaos«²³⁷, dem das Prinzip der »kleinen Ursachen mit großen Wirkungen« zugrundeliegt. Die Beachtung dieses Prinzips läuft der reduktionistischen Grundannahme, daß sich das Verhalten eines Systems aus der Summe seiner Teile herleiten läßt, zuwider.

Im folgenden sollen die beiden wichtigsten Stammväter der Chaosforschung näher behandelt werden: die Mathematiker Edward N. Lorenz und Benoit Mandelbrot. Bezogen auf E. Lorenz findet sich bei I. Ekeland eine hübsche Kurzbeschreibung der wahrlich »märchenhaften« Erfolgsstory der Chaosforschung: »Es war einmal ein Meteorologe, der hieß Lorenz. Er lebte - und er lebt noch heute - in der Zeit, in der die Computer begannen, die Bedingungen wissenschaftlicher Forschung zu verändern. Man konnte sich künftighin dem anvertrauen, was man »numerische Simulation« nennt, d. h., man konnte ein mathematisches Modell durch Berechnungen überprüfen, die einen normal begabten Forscher die Arbeit eines ganzen Lebens gekostet hätten.«²³⁸ So gesehen hat die Chaosfor-

²³⁶ Wiederum haben wir es mit nicht-linearen Phänomenen zu tun, bei deren Beschreibung sich »the two concepts of nonlinear physics - stochasticity and structures« keineswegs gegenseitig ausschließen, wie A. V. Gaponov-Grekov und M. I. Rabinovich ausführen: »Chaos and order can, specifically, transform continuously into each other as a system's parameters change. We would even be safe in saying that there is neither absolute order nor absolute chaos - these are just limiting cases. But any real system is always in some intermediate state, and one should only estimate the degree of closeness of this state to one of the limiting states, i. e. to absolute order or total disorder« (aus: »Nonlinear Physics. Stochasticity and Structures«, in: Y. P. Velikhov et. al., *Physics of the 20th Century. History and Outlook*, Moskau 1987, S. 284).

²³⁷ Bezogen auf Bewegungsvorgänge bedeutet »deterministisches Chaos« die »Entstehung einer chaotischen Trajektorie trotz deterministischer Bewegungsgleichungen« (F. Cramer, *Chaos und Ordnung*, a. a. O., S. 159).

²³⁸ I. Ekeland, *Das Vorhersehbare und das Unvorhersehbare*, München 1985, S. 82.

schung zumindest zwei »Helden«: Edward Lorenz und seinen Computer.²³⁹ Es wäre jedoch verfehlt, die revolutionären Gedanken von Lorenz oder überhaupt die »Chaos-Revolution« auf die »Computer-Revolution« zu reduzieren.²⁴⁰ Mag der Computer auch so etwas wie die »technische Erfolgsbedingung« der Chaoswissenschaft bilden - ohne ihn wären gewisse Entdeckungen nicht möglich gewesen -, so wird dadurch die originelle Interpretationsleistung hinsichtlich der elektronisch erzeugten Daten doch nicht obsolet. Dies wird deutlich, wenn man sich die Geschichte des Edward Lorenz etwas genauer ansieht.

1960 entwickelte Lorenz am Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) auf seinem Royal McBee, einem noch recht primitiven Computer, ein globales Wettermodell, das von zwölf numerischen Regeln - die sozusagen die »Gesetze« seines »Computer-Wetters« repräsentierten - beherrscht wurde. Lorenz teilte die allgemeine Skepsis unter den Meteorologen hinsichtlich der Möglichkeit von *realen* Wettervorhersagen durchaus; sein Interesse an der computeriellen Modellierung von Wetterprozessen war vorwiegend mathematischer Natur. Darin freilich unterschied er sich von den meisten Meteorologen, die in der Erstellung numerischer Wettersimulationen nur eine unseriöse Beschäftigung mit Pseudoproblemen erblickten.

»Doch die Zeit war reif für diesen Ansatz. Die Kunst der Wettervorhersage schien gleichsam zweihundert Jahre lang auf die Erfindung einer Maschine gewartet zu haben, die gestützt auf unpersönliche und mechanische Kräfte jedwede Rechnung unbegrenzt reproduzieren konnte.«²⁴¹ So gesehen war der Ausgangspunkt von Lorenz ein mechanistischer, denn »wer solche Modelle erstellte, ging von der stillschweigenden Voraussetzung aus, daß die Gesetze der Mechanik von der Gegenwart zur Zukunft eine Brücke mathematischer Sicherheit schlugen.«²⁴² Der Computer verhiess die Erfüllung des Laplaceschen Traumes; er wurde »zur Einlösung der Newtonschen Verheißung, daß die

²³⁹ Auch die anderen menschlichen Urheber der Chaosforschung verdanken dem Computer als Partner viel, wie wir noch sehen werden.

²⁴⁰ Dies versucht J. Franks in einer kritischen Rezension zu Gleicks Buch *Chaos* in: *The Mathematical Intelligencer*, Bd. 11, H. 3, 1989, S. 65 ff.

²⁴¹ J. Gleick, *Chaos - Die Ordnung des Universums*, München 1988, S. 24.

²⁴² Ebenda, S. 22.

Welt sich nach einem deterministischen Grundmuster entwickle und verhalte, gebunden durch Naturgesetze wie die Planeten durch die Gravitation und vorausberechenbar wie Sonnenfinsternisse oder Gezeiten«. ²⁴³ Lorenz selbst glaubte anfangs fest daran, daß man dem Grundgeschehen des Wetters mit Hilfe von Näherungswerten mathematisch auf die Spur kommen könne: kleine Fehler im Input würden auch nur kleine Abweichungen im Output hervorrufen, so daß sich der Wetterverlauf zumindest im Prinzip berechnen lassen müßte.

Zunächst schienen Lorenz' Erwartungen auch erfüllt zu werden: nachdem er die Wetterstruktur auf ihre reinste Grundform - seine zwölf numerischen Regeln - reduziert hatte, entdeckte er bestimmte zyklisch wiederkehrende Grundmuster seines Modellwetters. Lorenz beschloß, die Kurven seines simulierten Wetters durch graphische Darstellung optisch sichtbar zu machen. Es war diese Entscheidung, die seinen Durchbruch zu einem neuen Verständnis dynamischer Systeme vorbereiten sollte. J. Gleick hat die Ereignisse, die zu Lorenz' Entdeckung führten, sehr anschaulich so beschrieben:

»An einem Wintertag des Jahres 1961 wollte Lorenz eine seiner Sequenzen in einem längeren Ausdruck beobachten. Tatsächlich aber fand er eine Abkürzung. Statt den gesamten Umlauf in Gang zu setzen, begann er mitten im System. Um die Maschine in Ausgangsposition zu bringen, gab er die Zahlen ein, wie sie seinem letzten Ausdruck entsprachen. Danach ging er hinunter in die Halle, um dem Lärm der Maschine zu entfliehen und eine Tasse Kaffee zu trinken. Als er eine Stunde später zurückkehrte, sah er etwas Unerwartetes, etwas, das den Keim einer neuen Wissenschaft enthielt. - Die neue Verlaufskurve hätte eigentlich eine genaue Verdopplung der alten ergeben müssen. Lorenz hatte der Maschine exakt die gleichen Zahlen eingegeben. Sein Programm war unverändert. Doch während er wie gebannt auf den neuen Ausdruck starrte, machte er die Entdeckung, daß sich der neue Wetterverlauf so gründlich von dem früheren unterschied, daß innerhalb nur weniger Monate [des simulierten Wetters] alle Ähnlichkeit verschwunden war. Er sah auf die frühere Zahlenreihe und dann wieder auf die neue. Er hätte ebenso gut nach dem Zufallsprinzip zwei Wetterverläufe aus dem Hut ziehen können. Sein

²⁴³ Ebenda, S. 24.

erster Gedanke war, eine der Röhren sei kaputt. - Doch dann ging ihm plötzlich ein Licht auf.²⁴⁴ Es lag kein Funktionsfehler vor. Das Problem bestand vielmehr in den Zahlen, die er eingegeben hatte. Im Gedächtnis des Computers waren sechs Dezimalstellen gespeichert: 0.506127. Auf dem Ausdruck aber erschienen aus Platzgründen nur drei: 0.506. Lorenz hatte sich für die kürzere, abgerundete Zahlenreihe entschieden, wobei er voraussetzte, daß die Abweichung - im Verhältnis eins zu tausend - belanglos sei.«²⁴⁵

Offenbar galt das klassische Prinzip »kleine Input-Abweichungen erzeugen lediglich kleine Output-Differenzen« *nicht*. Lorenz erkannte, daß nicht nur sein simuliertes Wetter eine allenfalls grobe Parodie des realen Erdwetters verkörperte, sondern daß auch »realistischere« Wettermodelle *grundsätzlich* keine langfristigen Vorhersagen möglich machen würden.

Halten wir fest: Zwei Simulationen (zwei Wetterkurven), die von nahezu demselben Punkt ausgehen - »nahezu« deshalb, weil Rundungsfehler bei der Eingabe keine exakte Wiederholung erlauben -, divergieren in der Folge immer weiter voneinander. Das Wettersystem ist offenbar ein System, in dem geringe Inputabweichungen zu drastischen Outputdifferenzen führen können. Das bedeutet, daß die Wetterdynamik offenbar von den Anfangsbedingungen »sensitiv abhängig« ist. Diese »Sensitivität« dynamischer Systemvorgänge für geringfügige Anfangsfluktuationen hat Lorenz später als »Schmetterlingseffekt« bezeichnet: im Extremfall vermöge bereits der Flügelschlag eines einzelnen Schmetterlings eine Kette positiver Rückkopplungen auszulösen, die schließlich die Ausbildung eines räumlich weit entfernten Sturmtiefs verursachen können.²⁴⁶ Auch wenn Lorenz' Erkenntnis in einer computergestützten Zufallsentdeckung ihren Ursprung hat, so ist es doch sein intellektuelles Verdienst, dieser Entdeckung - dem Zusammenhang von Aperiodizität und Unvorhersagbarkeit - eine chaostheoretische Deutung gegeben zu haben.

²⁴⁴ Gleick verweist dabei auf Lorenz' persönliche Erinnerungen in »On the Prevalence of Aperiodicity in Simple Systems«, in: M. Mrgmela und J. Marsden (Hg.), *Global Analysis*, New York 1979, S. 55.

²⁴⁵ J. Gleick, *Chaos - Die Ordnung des Universums*, München 1988, S. 28 f.

²⁴⁶ Vergleiche J. Gleick, a. a. O., S. 35.

Er erkannte nicht nur, daß die Verlaufskurven von Systemprozessen »sensitiv abhängig« sind von kleinen Schwankungen in den Anfangsbedingungen (mathematisch von der Anzahl der in die Rechnung einbezogenen Dezimalstellen hinter dem Komma), sondern auch, daß zwar keine zwei Kurven jemals identisch sind, daß sie sich aber dennoch ähneln, daß ihnen also eine gemeinsame »geometrische Struktur« zugrundeliegt, die innerhalb der Unregelmäßigkeit gleichwohl für Ordnung sorgt. Seine weiteren Rechnungen zu nicht-linearen Systemen, wie etwa über konvektive Fließbewegungen²⁴⁷, produzierten eine Art dreidimensionaler Doppelspirale, den heute nach ihm benannten »Lorenz-Attraktor«, der in einem Bewegungsraum mit drei Koordinaten die wechselnden Beziehungen dreier verschiedener Variablen graphisch darstellt.²⁴⁸ Errechnet wird der Attraktor auf der Basis von drei gekoppelten nicht-linearen Differentialgleichungen erster Ordnung mit drei Variablen, die zusammen das sogenannte »Lorenz-System« bilden: obwohl sie für deterministische Systeme (wie z. B. Doppelpendel) gelten, beschreiben sie gleichwohl das Verhalten chaotischer Trajektorien (Bahnkurven). In der Doppelspirale des Lorenz-Attraktors wiederholt sich kein Kurvenpunkt - es gibt also keine Bahnüberschneidungen -, dennoch garantiert der Attraktor die Selbstähnlichkeit der Trajektorien: es herrscht eine Art von »geordneter Unordnung«.²⁴⁹ Publiziert hat Lorenz seine Grundgleichungen erstmals 1963 in dem Aufsatz »Deterministic Nonperiodic Flow«.²⁵⁰ Wenig später erschienen zwei

²⁴⁷ Als Beispiele dienten ihm die Konvektionsströmungen in einer Tasse heißen Kaffees und rotierende Wasserräder. Siehe die Darstellung bei Gleick, a. a. O., S. 40 ff.

²⁴⁸ Vergleiche ebenda, S. 46 f.

²⁴⁹ Entscheidend für die Ausbildung chaotischer Strukturen in dynamischen Systemen ist mithin die Nicht-Linearität der Prozeßverläufe in solchen Systemen: »Systeme, für die lineare Differentialgleichungen gelten, können rechnerisch gelöst werden. Wenn ein System durch mehrere lineare Differentialgleichungen beschrieben wird, kann man sie durch die mathematische Methode der Fourier-Transformation auflösen; sie führen nicht ins Chaos. ... Potentiell chaotische Strukturen sind immer nichtlineare, rückgekoppelte Strukturen, die ganz stark von den Ausgangsbedingungen abhängen; die im Verlauf des Prozesses entstehende Globalstruktur wird durch die Details der Ausgangssituation in nicht vorhersagbarer Weise beeinflusst. Lorenz spricht vom sogenannten »Schmetterlingseffekt«: Ein einziger Flügelschlag eines Schmetterlings kann zur völligen Umsteuerung der Großwetterlage führen (muß aber natürlich nicht).« (F. Cramer, *Chaos und Ordnung*, a. a. O., S. 160)

²⁵⁰ In: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 1963, S. 130 ff.

weitere Aufsätze zu demselben Gegenstand²⁵¹; dieser Aufsatz-Triptychon markiert den eigentlichen Beginn der modernen Chaosforschung.

In der Vor-Computer-Ära wären die Entdeckungen des Edward Lorenz kaum oder jedenfalls nicht mit dieser Überzeugungskraft möglich gewesen: indem der Computer ungeahnte Einblicke in ein mathematisches Universum immer feinerer Strukturen ermöglichte, gewann er für die Etablierung der Chaosforschung eine ähnliche Bedeutung wie weiland das Mikroskop für die Biologie, das Teleskop für die Astronomie oder der Beschleuniger für den Teilchenphysiker.

Wenden wir uns nunmehr einem weiteren bedeutenden »Gründervater« der modernen Chaosforschung zu: dem Mathematiker Benoit Mandelbrot, dessen Arbeiten mittlerweile auch weiteren Kreisen bekannt geworden sind. Zu Anfang der 1960er Jahre finden wir Mandelbrot in der Abteilung für reine Forschung der International Business Machines Corporation (IBM), wo er sich insbesondere mit mathematischen Untersuchungen zur Einkommensverteilung innerhalb moderner Volkswirtschaften befaßte.²⁵²

Als er 1960 zu einem Gastvortrag nach Harvard eingeladen wurde, entdeckte er zu seiner Verblüffung auf der Tafel im Büro des Nationalökonom H. Houthakker eben das Diagramm, das er bei seinem Vortrag vorzustellen gedachte: auf seine Nachfrage hin erklärte ihm Houthakker, das dieses Diagramm die Entwicklung des Baumwollpreises im Laufe von acht Jahre darstelle - also keineswegs Mandelbrots Darstellung der Einkommensverteilung, von der Houthakker ja noch gar nichts wisse. Diese zufällige Koinzidenz zweier Diagramme zu ganz verschiedenen Gegenständen faszinierte Mandelbrot derart, daß er ihr, zu IBM zurückgekehrt, näher nachging. In beiden Fällen - bei der Entwicklung der Einkommen und der Baumwollpreise - ließen sich große Pendelbewegungen erkennen,

²⁵¹ E. Lorenz, »The Mechanics of Vacillation«, in: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 1963, S. 448 ff; sowie ders., »The Problem of Deducing the Climate from the Governing Equations«, in: *Tellus*, 16, 1964, S. 1 ff. Gleick bemerkt dazu: »Alle drei Aufsätze zusammen bilden ein höchst elegantes Werk wissenschaftlicher Literatur, das Mathematiker und Physiker noch zwanzig Jahre später beeinflussen sollte«, a. a. O., S. 51.

²⁵² Mandelbrots Werdegang wird sehr anschaulich dargestellt bei Gleick, *Chaos*, a. a. O., S. 130 ff. Seit 1974 ist Mandelbrot »IBM Fellow« an deren Thomas-J.-Watson Forschungszentrum in Yorktown Heights im Bundesstaat New York.

die langfristige makroökonomische Entwicklungen repräsentierten, sowie ein Chaos kurzfristiger Fluktuationen.²⁵³ Nach der herkömmlichen volkswirtschaftlichen Auffassung sollten nun makroökonomische und mikroökonomische Fluktuationen - da offenbar von ganz verschiedenen sozio-ökonomischen Kräften verursacht - nichts miteinander zu tun haben; auch sollten die großen Trends im Prinzip vorhersagbar, die kleinen Schwankungen hingegen völlig unberechenbar, aber wissenschaftlich auch nicht sonderlich interessant sein.

Für Mandelbrots weitere Analysen sollte nun wiederum der Computer eine entscheidende Rolle spielen: er fütterte seinen Computer mit einer Unmenge von Daten über die Entwicklung von Baumwollpreisen während der letzten Jahrzehnte und stellte bei der Auswertung zu seiner Überraschung fest, daß die gemeinhin behauptete Dichotomie oder Asymmetrie zwischen Preisveränderungen im makro- bzw. im mikroökonomischen Maßstab nicht zutrefte. »Die Zahlenwerte, die vom Standpunkt einer normalen Distribution Abweichungen hervorriefen, erzeugten vom Standpunkt der Skalierung oder Maßstabsänderung aus betrachtet Symmetrie. Jede Preisveränderung war zufällig und unvorhersagbar. Die Sequenzen von Veränderungen aber waren unabhängig vom Maßstab: die Kurven der täglichen und der monatlichen Preisentwicklung paßten perfekt zusammen. So unglaublich es klingen mag, Mandelbrot fand heraus, daß das Ausmaß der Fluktuation über einen Zeitraum von fünfundsechzig stürmischen Jahren, in die der Zweite Weltkrieg und eine wirtschaftliche Depression fielen, konstant geblieben war.«²⁵⁴ Damit hatte er innerhalb einer scheinbar chaotischen Datenmenge eine neue Art von Ordnung, ein Muster selbstähnlicher Strukturen, entdeckt, die auf allen Skalierungsstufen wiederkehrte, ohne daß sich dafür ein Gesetz angeben ließ.

Gleich im Anschluß an seine Analyse der Baumwollpreise wurde Mandelbrot bei IBM mit dem Problem der Entstehung von Nebengeräuschen bei der Informationsübertragung in Telefonleitungen konfrontiert.²⁵⁵ Solche Übertragungsgeräusche traten zwar, wie man bereits wußte, rein zufällig, jedoch gebündelt auf. Betrachtete man diese Fehlerbündel

²⁵³ Eine detaillierte Darstellung liefert wiederum Gleick in *Chaos*, a. a. O., S. 124 ff.

²⁵⁴ Ebenda, S. 128.

²⁵⁵ Siehe ausführlich ebenda, S. 135 ff.

genauer, so zeigten sie eine komplizierte innere Struktur. Mandelbrot entwickelte nun eine Methode der Beschreibung und Voraussage derartiger Fehlerbündel, indem er immer tiefere Einschnitte zwischen Perioden fehlerfreier Übertragung und Fehlerbündeln vornahm. Dabei ergab sich ein höchst überraschendes Muster: unabhängig davon, ob er Zeitabschnitte im Tages-, Stunden-, Minuten- oder Sekundenmaßstab untersuchte, immer blieb die Proportion zwischen fehlerfreien und fehlerbehafteten Perioden konstant: offenbar war die Fehlerstreuung nahezu unendlich dünn.²⁵⁶ Was nun die IBM-Ingenieure hieraus lernen konnten, war, daß Fehler (Nebengeräusche) grundsätzlich unvermeidlich - weil innerhalb jedes Zeitmaßstabes - auftreten und allenfalls ermittelt und korrigiert werden können.

Mit Mandelbrots Entdeckungen - und das vor allem gilt es zu würdigen - gewinnen Phänomene wie unregelmäßige Muster, diskontinuierliche Verteilungen, Aufbrüche und Knäuel endlich die ihnen gebührende wissenschaftliche Aufmerksamkeit. Einmal mehr wird die klassische Sicht der Wirklichkeit von Einsichten in komplexe Strukturen und Prozesse »revolutioniert«: anstatt sich euklidisch gerade und glatt zu zeigen, kehrt die Realität nunmehr ihr bizarr gezacktes und rauhes Antlitz, das so lange Zeit über wissenschaftlichen Begrädnungs- und Glättungsversuchen ausgesetzt gewesen war, wieder unverstellt hervor. Was sich durch Mandelbrot verändert hat, ist die Auffassung von der Geometrie der realen Welt: Gebrochenheit (Fraktalität) tritt an die Stelle von Kontinuität. Entsprechend dienen die ersten größeren Arbeiten Mandelbrots der Begründung einer neuartigen Geometrie, die dem unregelmäßigen (aber nicht regellosen) Charakter räumlicher und zeitlicher Strukturen Rechnung trägt. Wir müssen uns für das Folgende auf eine Darlegung der wesentlichen Erkenntnisse Mandelbrots beschränken und im übrigen auf seine Schriften verweisen.²⁵⁷

Mehr als die traditionellen Gegenstände der Geometrie (wie Geraden und ebene Flächen) interessierten Mandelbrot die bizarren Unregelmäßigkeiten von in der Natur zu beobachtenden Gebilden wie z. B. Küstenlinien, Blitzen, Bäumen, Wasserscheiden,

²⁵⁶ Was Mandelbrot damit an einem technischen Phänomen entdeckt hatte, war ein Beispiel für die im 19. Jahrhundert von dem deutschen Mathematiker Georg Cantor beschriebene »Cantor-Menge«, auch als »Cantor-Staub« bekannt.

²⁵⁷ Besonders auf sein Hauptwerk *The Fractal Geometry of Nature*, New York 1977.

Bergketten oder Wolkenformationen; diese Unregelmäßigkeiten schienen sich in jedem Maßstab zu wiederholen, mithin maßstabsunabhängig zu sein. Bei genauerem Hinsehen (Wechsel der Skalierungsstufe) werden diese Strukturen nämlich nicht einfacher oder regelmäßiger, sie behalten vielmehr ihre komplexe Ordnung bis hinab zu atomaren Maßstäben bei. Eine Messung der wirklichen Länge etwa der Küste Großbritanniens würde daher das Ergebnis »unendlich« liefern, da die Unregelmäßigkeit einer Küstenlinie einen immer genaueren Maßstab erforderte, bei jedem Maßstab aber die alte Unregelmäßigkeit wiederkehrte. In der Natur vorkommende Strukturen besitzen also die (maßstabsübergreifende) Eigenschaft der »Selbstähnlichkeit«. Derartig »selbstähnliche« Strukturen lassen sich mit Hilfe der euklidischen Geometrie nun nicht mehr adäquat beschreiben, insbesondere deshalb nicht, weil z. B. eine in jeder Skalierung bizarre Zickzacklinie keineswegs zwei-, sondern »gebrochen«-dimensional ist. Beispielsweise läßt sich ein Schwamm nicht eindeutig als zwei- oder dreidimensionales Gebilde beschreiben. Mandelbrot schlug daher eine »fraktale Geometrie«²⁵⁸ vor, die mit unganzzahligen Dimensionen Objekte beschreibt, wobei ein und demselben Objekt je nach verwendetem Maßstab eine andere Dimension zukommen kann.

Wie schon im Falle des E. Lorenz verdankt auch Mandelbrots »Fraktalgeometrie« dem modernen Computer sehr viel: als »experimentelle Mathematik« bedurfte sie der enormen Rechenleistung und überzeugenden Darstellungsfähigkeiten dieses neuen Forschungsinstrumentes. So ist etwa die der »Mandelbrot-Menge« (als einer Teilmenge der komplexen Zahlenebene) zugrundeliegende mathematische Formel schon seit langem bekannt gewesen, in ihrer (nicht nur mathematischen) Bedeutung aber verkannt worden: die Mathematiker Pierre Fatou (1878 bis 1929) und »sein Konkurrent Gaston Julia (1893 bis 1978) hatten bereits kurz nach dem Ersten Weltkrieg mit hochabstrakten Abhandlungen die Theorie der Iteration rationaler Funktionen im Komplexen zu einer gewissen Blüte gebracht, ohne sich eine detaillierte visuelle Vorstellung von den Objekten ihres Schaffens machen zu können. Mandelbrot hat diesem Gedankengebäude keinen Stein in Form eines

²⁵⁸ Es gibt Mathematiker, die bestreiten, daß Mandelbrots »fraktale Geometrie« die Bezeichnung »mathematisch« verdient, da sie nicht wie eine ordentliche mathematische Theorie nach dem Schema »Definition-Satz-Beweis« formuliert sei (vgl. dazu die Rezension von J. Gleicks *Chaos*-Buch von J. Franks im *Mathematical Intelligencer*, a. a. O.).

mathematischen Satzes hinzugefügt (das haben erst seine Nachfolger getan), sondern mit dem Computer die Menge, die jetzt seinen Namen trägt, erstmals sichtbar und damit für einen größeren Kreis von Nicht-Spezialisten überhaupt begreiflich gemacht.«²⁵⁹ Die außerordentlichen graphischen Fähigkeiten des Computers im Verein mit Mandelbrots Fähigkeit, die Mathematik der Fraktale zu ganz heterogenen Naturphänomenen in Beziehung zu setzen, wiesen den Weg zu einer völlig neuen Sicht der Natur, in der ehemalige Randphänomene ins Zentrum theoretischer und empirischer Bemühungen rückten.

Mandelbrots fraktales Beschreibungsmodell sollte recht bald zahlreichen Physikern den Weg zum Verständnis der komplexen Strukturen und Prozesse realer dynamischer Systeme - wie z. B. der turbulenten Strömungen in Flüssigkeiten - bahnen. »Selbstähnlichkeit« bedeutete hier, Wirbel auf Wirbel, Fluktuationen auf Fluktuationen zu sehen: der Übergang von stetigem (laminarem) zu turbulentem Fließverhalten zeitigt eine Kaskade von Periodenverdopplungen (Bifurkationen), für deren Komplexität der Maßstab irrelevant ist. An dieser Verbindung von Hydrodynamik und fraktaler Geometrie wird deutlich, daß Mandelbrots Arbeit durchaus einen Beitrag zur Theorie der Selbstorganisation darstellt. Fraktalität ist auch ein wichtiges Moment für eine neue Sicht der biologischen Evolution bzw. für eine neue Auffassung von der Entstehung des Lebens, insofern sich - mit Blick etwa auf Eigens Hyperzyklus-Modell - die fraktale Organisation der Biosynthese als die beste Art der Informationsverarbeitung erweist.²⁶⁰ Alle selbstorganisierenden Systeme, die aus einem Netz wechselwirkender Untereinheiten aufgebaut sind, besitzen diesen fraktalen Charakter: auf welcher Organisationsstufe wir auch immer solche Systeme betrachten, stets zeigen sich wieder komplexe Strukturen, wenn auch mit unterschiedlichen emergenten Eigenschaften. Was demnach Forscher wie Prigogine, Haken, Eigen, Lorenz und Mandelbrot verbindet, ist die Entdeckung der irreduziblen Komplexität dynamischer Systeme und der damit verbundenen prinzipiellen Unvorhersagbarkeit ihres von »Unregelmäßigkeiten« durchsetzten Verhaltens.

²⁵⁹ Ch. Pöppe, »Hat Mandelbrot die Mandelbrot-Menge entdeckt?«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, H. 8, 1990, S. 39.

²⁶⁰ Vergleiche G. Binnig, *Aus dem Nichts*, a. a. O., S. 233 f.

Die Formierung der Chaosforschung erstreckte sich bis weit in die 1970er Jahre hinein: ihre Begründungsgeschichte weist neben den Hauptschauplätzen Lorenz und Mandelbrot zahlreiche Nebenschauplätze auf, von denen i. F. wenigstens die wichtigsten benannt seien.

Die bahnbrechenden Arbeiten des Meteorologen E. Lorenz aus den 1960er Jahren blieben jahrelang so gut wie unbeachtet; ihre relativ entlegene Publikation in meteorologischen Fachzeitschriften mag dafür der entscheidende Grund sein. Erst 1972 wurde jener Mathematiker mit Lorenz' Studie »Deterministic Nonperiodic Flow« von 1963 bekannt, der der Chaostheorie ihren Namen geben sollte: James Yorke. Dieser hatte damals an der Universität von Maryland einen Kreis von Nachwuchswissenschaftlern um sich versammelt, aus dem bald das *Institute for Physical Science* hervorging, und beschäftigte sich, im Anschluß an Stephen Smale²⁶¹, mit dynamischen Systemen. Als ein Strömungsphysiker ihn auf die besagte Arbeit von Lorenz hinwies, war Yorke sofort klar, »daß dies etwas war, worauf er die Physiker seit einiger Zeit hatte aufmerksam machen wollen«, daß sich hiermit vielleicht die traditionelle Kluft zwischen Mathematikern und Physikern überwinden ließ.

Bei Gleick liest sich der Vorgang so: »Als Yorke Lorenz' Aufsatz zu Gesicht bekam, begriff er sofort - obgleich sich der Beitrag in einer Zeitschrift für Meteorologie verbarg -, daß es sich hier um ein Beispiel handelte, das Physiker verstehen würden. Er gab Smale eine Kopie des Aufsatzes, auf die er seine Anschrift geklebt hatte, so daß Smale sie zurücksenden konnte. Smale aber war verblüfft, als er sah, daß dieser Meteorologe - *vor bereits zehn Jahren* - eine Form von Chaos entdeckt hatte, die Smale selbst früher für mathematisch undenkbar hielt. Er brachte eine Unzahl Fotokopien von »Deterministic

²⁶¹ Der Mathematiker Smale hatte Ende der 1960er Jahre entdeckt, daß nicht-lineare Oszillatoren ein chaotisches Verhalten, ein Gemisch von lokaler Unberechenbarkeit und globaler Stabilität zugleich, zeigen können. Gleick berichtet: Smale »hatte seine Freude an Beispielen folgender Art: Man nehme eine beliebige Zahl, einen Bruch zwischen eins und null, und verdoppele sie. Sodann eliminiere man alles links vom Komma. Danach wiederhole man den gesamten Vorgang. Da die meisten Zahlen im Detail irrational und unvorhersagbar sind, ist das Ergebnis des gesamten Vorgangs eine unvorhersagbare Zahlenreihe. Ein Physiker mochte darin lediglich eine banale mathematische Bizarrerie erblicken, völlig bedeutungslos, zu einfach und zu abstrakt zugleich, um irgendwelchen Nutzen zu bringen. Smale jedoch erkannte instinktiv, daß dieser mathematische Trick unzähligen physikalischen Systemen zugrundeliegen mußte.« (Gleick, *Chaos*, a. a. O., S. 102)

Nonperiodic Flow« in Umlauf. Das sollte später zu der Legende führen, Yorke habe Lorenz entdeckt: Jede Kopie dieses Aufsatzes, die irgendwo in Berkeley auftauchte, trug Yorkes Anschrift.«²⁶² Damit endlich trat Lorenz' beunruhigende Botschaft von der Existenz des Chaos inmitten scheinbarer Ordnung ihren Weg in die Wissenschaftlergemeinschaft an. Yorke arbeitete dem durch einen Aufsatz vor, den er 1975 in einer der bedeutendsten mathematischen Fachzeitschriften unterbrachte: im *American Mathematical Monthly*. In diesem Artikel wurde gezeigt, daß »jedes eindimensionale System, in dem an irgendeiner Stelle ein regulärer Zyklus der Periode drei erscheint, sowohl regelmäßige Zyklen von jeder anderen Länge aufweist als auch völlig chaotische Zyklen«.²⁶³ Die Arbeit trug den provokanten Titel »Period Three Implies Chaos«²⁶⁴, womit erstmals der Ausdruck »Chaos« als Schlüsselbegriff ins Spiel gebracht wurde.

Einer der Wissenschaftler, mit denen Yorke seinen Aufsatz diskutierte, war der mit ihm befreundete Physiker und Mathematiker Robert May, der sich seit 1971 in Princeton mit populationsbiologischen Fragestellungen befaßte. May interessierte sich insbesondere für das Verhalten von Populationen unterschiedlich hoher Fruchtbarkeit. Entscheidend für die Entwicklung (das Wachstum) einer Population ist das Verhältnis von Geburten- und Sterberate bzw. von Populationsgröße und Veränderungsrate (Wachstum oder Verringerung). Bereits 1845 hatte P. F. Verhulst eine Gleichung entwickelt, die den Einfluß aller Umweltfaktoren auf das Populationswachstum durch die Einführung eines einzigen nicht-linearen Terms berücksichtigt, der einer beliebigen Populationszunahme gewissermaßen entgegenarbeitet. Dieses nicht-lineare Glied bewirkt bei der Berechnung des Populationswachstums aufeinanderfolgender Jahre, daß das Wachstum der Population im jeweiligen Folgejahr nun nicht-linear von der Populationsgröße des jeweiligen Vorjahres abhängt. Verhulsts Gleichung ist dadurch in der Lage, sowohl das Erreichen einer konstanten Populationsgröße als auch das ständige Schwanken einer Population zwischen

²⁶² Ebenda, S. 102 f.

²⁶³ Ebenda, S. 112.

²⁶⁴ In: *American Mathematical Monthly*, 82, 1975, S. 985 ff. (der Mitverfasser war Yorkes Schüler Tien-Yien Li).

hohen und niedrigen Anzahlen, wie es sich bei vielen realen Populationen beobachten läßt, wiederzugeben.

R. May entdeckte nun, daß bei gewissen Vergrößerungen des Terms, der für die Geburtenrate (bzw. das Nahrungsangebot) steht, diese Schwankungen instabil werden, d.h. Bifurkationen durchlaufen. Er stellte fest, daß die Zeit, die das System - sein Populationsmodell - brauchte, um an seinen Ausgangspunkt zurückzukehren, sich bei gewissen kritischen Werten der Gleichung zunächst verdoppelte, um sodann - nach mehreren solchen Zyklen der Periodenverdoppelung - zufällig zu variieren, so daß sich keine vorher-sagbare Periode für die Rückkehr in den Ausgangszustand mehr beobachten ließ. May hatte damit den sogenannten »Periodenverdoppelungsweg zum Chaos« entdeckt. Spätere Untersuchungen zeigten, daß bei bestimmten nochmals erhöhten Werten für die Geburtenrate (bzw. das Nahrungsangebot) das Verhalten der Population nach Durchlaufen einer chaotischen Phase plötzlich wieder stabil und vorhersagbar wird; eine weitere Erhöhung desselben Parameters ließ das System dagegen wieder ins Chaos hineingleiten. Je nach Geburtenrate (Nahrungsangebot) also wechseln Bereiche von Stabilität und Chaos einander ab; anders ausgedrückt: das Chaos wird zeitweilig von Zonen oder »Fenstern« der Ordnung und Vorhersagbarkeit »intermittiert«. Dieses Bild läßt sich natürlich auch umkehren, so daß man sagen kann: »In den Intermittenzbereichen aber wird die alte Ordnung (oder das Chaos) für einen Augenblick wiederentdeckt, und die gleichen Iterationsschleifen, die eben das Chaos (die Ordnung) erzeugten, führen nun momentane Regelmäßigkeit (oder Chaos) herbei.«²⁶⁵

In den 1960er und 1970er Jahren gab es demnach - neben Lorenz - eine Reihe von Forschern, die, zunächst unabhängig voneinander, herauszufinden versuchten, was passiert, wenn man die Berechnung einer Gleichung - i. S. einer Rückkoppelungsschleife - bei

²⁶⁵ J. Briggs und F. D. Peat, *Die Entdeckung des Chaos - Eine Reise durch die Chaos-Theorie*, München/Wien 1990, S. 87. Auf den Seiten 74 ff. findet sich eine gute und einprägsame Darstellung der »Entdeckung des Periodenverdoppelungsweges zum Chaos«. - Die wichtigsten Arbeiten Robert Mays sind: »Biological Populations with Nonoverlapping Generations: Stable Points, Stable Cycles, and Chaos«, in: *Science*, 186, 1974, S. 645 ff.; »Simple Mathematical Models with Very Complicated Dynamics«, in: *Nature*, 261, 1976, S. 459 ff.; sowie (zusammen mit G. F. Oster), »Bifurcations and Dynamic Complexity in Simple Ecological Models«, in: *The American Naturalist*, 110, 1976, S. 573 ff.

gegebenen Parametern immer wieder durchführt. Es war aber vor allem ihre Entdeckung der Arbeiten von Lorenz, die ihnen klarmachte, daß das bei der iterierten Lösung solcher Gleichungen zutage tretende chaotische Verhalten auf universelle Eigenschaften dynamischer Systeme verweist. Der Vergleich ihrer Ansätze untereinander zeigte, daß es stets die Kombination aus Nicht-Linearität und Iteration war, die derartige Chaosphänomene produzierte. Lorenz' computersimuliertes Modellwetter führte ihnen vor Augen, daß die rekursive (iterierte) Lösung mathematischer Gleichungen den Schlüssel für ein neuartiges Verständnis der Rolle nichtlinearer Wechselwirkungen in realen Systemen bietet. Ähnlich wie Lorenz stellten Forscher wie May fest, daß Gleichungen, deren Lösung unter gegebenen Parametern wiederholt wird, bei niedrigen Parameterwerten einen stabilen Fixpunkt erreichen (in Lorenz' Wettersystem bedeutete dies unveränderliches Wetter); während sich bei höheren Parameterwerten Oszillationen zwischen zwei Punkten einstellen (Lorenz' Modellwetter konvergierte hier zu einem »Durchschnittswetter«); ab einem bestimmten Parameterwert jedoch Chaos eintritt (eine Wettervorhersage wird unmöglich).

1975 entdeckte ein junger Physiker namens Mitchell Feigenbaum vom *Los Alamos National Laboratory* mit Hilfe seines Taschenrechners eine universelle Zahlenfolge bei der Periodenverdoppelung solcher Gleichungen, wie May sie benutzt hatte. Die Gleichungen, die er untersuchte, ließen sich indes nicht nur auf Populationen, sondern auch auf so unterschiedliche Phänomene wie elektrische Schaltungen, Festkörperstrukturen und Aktienkursschwankungen anwenden. Zuvor hatte er zahlreiche Veröffentlichungen über nicht-lineare Fließbewegungen und Oszillationen gelesen und war dabei zu dem Schluß gekommen, »daß - mit Ausnahme von Poincarés nahezu vergessenem Werk - nichts vorlag, das einem vernünftigen Physiker weiterhelfen könnte«.²⁶⁶ Er beschloß, mit einer Analogie der einfachsten Gleichung von May zu experimentieren. Wie May erkannte er zunächst, daß dem Übergang des Systems von der Ordnung ins Chaos eine Kaskade von Periodenverdoppelungen vorhergeht. Feigenbaums eigentliche Leistung bestand aber in der Aufstellung einer Skala, auf der genau jene Zahlenwerte angegeben waren, bei denen ein System, das wieder und wieder auf sich selbst rückkoppelt, eine Periodenverdoppelung

²⁶⁶ Gleick, *Chaos*, a. a. O., S. 239.

(Bifurkation) erfährt. Angeregt zu seiner Suche nach diesen universellen Zahlen (fürderhin auch »Feigenbaum-Zahlen« genannt) hatte ihn ein Vortrag von Smale über einige Eigenschaften quadratischer Differentialgleichungen, den er 1975 bei einem Kongreß in Aspen (Colorado) gehört hatte. »Smale glaubte allem Anschein nach, daß es einige interessante offene Fragen hinsichtlich des exakten Punktes geben müßte, von dem an die Abbildung von periodischem in chaotisches Verhalten überwechsle.«²⁶⁷ Eben diese von Smale vermutete Regelmäßigkeit (»Universalität«) innerhalb des komplexen »Phasenübergangs« eines Systems von der Ordnung zum Chaos hatte Feigenbaum nunmehr entdeckt.

Erst um 1977 herum stieß Feigenbaum sowohl auf die Arbeiten von Lorenz als auch von Mandelbrot; und eben hier vermochte Feigenbaums »Universalität« eine Brücke zu schlagen - zwischen Lorenz' Entdeckung der Unvorhersagbarkeit des Verlaufs auf sich selbst rückkoppelter Prozesse einerseits und Mandelbrots Prinzip der skalierungsunabhängigen Selbstähnlichkeit andererseits: »Man muß nach maßstabsübergreifenden Strukturen suchen - wie verhalten sich große Details zu kleinen Details. Man schaut sich Strömungsstörungen an, komplizierte Strukturen, in denen Komplexität aus einem stetigen Prozeß hervorgeht. Ab einem bestimmten Grad kümmern sie sich kaum noch darum, wie groß der ganze Prozeß ist - egal, ob so groß wie eine Erbse oder wie ein Basketball. Der Prozeß kümmert sich nicht darum, wo er gerade steckt, und noch weniger, wie lange er schon anhält. Die einzigen Dinge, die je universal sein können, sind maßstabsübergreifende Dinge« (Feigenbaum).²⁶⁸

Hatte Lorenz den ersten »seltsamen Attraktor« entdeckt, so fanden sich bald weitere Mitglieder dieser eigentümlichen mathematischen Familie, etwa der nach seinem Entdecker benannte »Rössler-Attraktor«, der sich aus einer Folge wiederholter Streck- und Faltbewegungen (»Bäcker-Transformationen«) ergibt. Wiederum war es die wachsende Leistungsfähigkeit von Computern in der graphischen Darstellung solcher Gebilde, die der Attraktorenforschung Antrieb verschaffte. So machten sich Ruelle und Takens an die

²⁶⁷ Ebenda, S. 246 f.

²⁶⁸ Ebenda zitiert, S. 267 f. Erst nach Jahren, nach mehreren Ablehnungen durch die Herausgeber, konnte Feigenbaums grundlegende Arbeit erscheinen: »Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations«, in: *Journal of Statistical Physics*, 19, 1978, S. 25 ff.

bildliche Darstellung des Lorenz-Attraktors und verbanden damit Fragen wie: »War der LorenzAttraktor typisch? Welche weiteren Arten von Formen waren möglich?«²⁶⁹ Darüber hinaus ging es ihnen um die Frage der Übertragbarkeit seltsamer Attraktoren auf chaotische Phänomene in der Natur, die Mitte der 1970er Jahre noch keineswegs beantwortet war. Insbesondere suchten sie nach einer Möglichkeit, die ungeheure Anzahl sich überlagernder Rhythmen in Turbulenzen - also Wirbeln, die in immer kleinere Wirbel zerfallen, bis das Chaos total wird - aus einem deterministischen Gleichungssystem herzuleiten.

Die systematische mathematische Suche nach seltsamen Attraktoren, die damit ihren Anfang nahm, konnte Experimentatoren helfen, auch in der Realität solche eigenartigen Prozesse empirisch nachzuweisen. Man bedenke, daß Mitte der 1970er Jahre noch »niemand in einem Experiment einen seltsamen Attraktor wirklich gesehen (hatte), und es war keineswegs klar, wie man überhaupt nach einem Ausschau halten sollte. ... Seltsame Attraktoren schienen fraktal zu sein, was hieß, daß ihre wirkliche Dimension gebrochenzahlig war. Aber niemand wußte, wie man die Dimension messen oder eine solche Messung auf Probleme der Ingenieurwissenschaften übertragen könnte.«²⁷⁰

Um die Mitte der 1970er Jahre herum war jedenfalls das Netz von Forschern, die sich um eine theoretische Aufklärung von Chaosphänomenen bemühten, über wechselseitige Analogiewahrnehmungen und Anregungen so dicht geworden, daß zurecht von der Etablierung einer neuen Wissenschaftsdisziplin - der Chaosforschung - gesprochen werden konnte.

²⁶⁹ Gleick, a. a. O., S. 208.

²⁷⁰ Ebenda, S. 222 f.

2.5 Systemtheoretisch-kybernetische Ansätze

Wir kommen nunmehr zu einer Gruppe von Basiskonzepten der Selbstorganisationstheorie, bei denen der Ausgangspunkt primär kybernetischer und epistemologischer Natur ist - obwohl thermodynamische Aspekte durchaus hineinspielen können. Zentral sind Fragen der Entstehung von Ordnung durch rekursive Vernetzungsprozesse (»Konnektionismus«), also vor allem Rückkopplungsschleifen i. S. der Kybernetik. Dabei wird aber gegenüber der klassischen Kybernetik - der »Kybernetik 1. Ordnung« - insofern ein theoretischer Fortschritt erzielt, als zum einen Prozesse der *positiven* Rückkopplung (des »deviation amplifying«) betont werden und zum andern die epistemologische *Beobachterproblematik*²⁷¹ - das Problem der Fremd- bzw. Selbstbeobachtung - bei der je systemrelativen Konstitution von Wirklichkeit entscheidendes Gewicht erhält (im Rahmen der Erkenntnistheorie des »Radikalen Konstruktivismus«). Es wird betont, daß das Reden über Systeme und deren Eigenschaften stets aus der Perspektive bestimmter kognitiver Systeme heraus erfolgt.

Im Ganzen ergibt sich daraus die Begründung einer »Kybernetik 2. Ordnung«. Begriffe wie »organisatorische Geschlossenheit« bzw. »operationale Schließung«, »Selbstreferentialität«²⁷², »Eigenwertbildung«, »Abweichungsverstärkung« und »strukturelle Kopplung« (zwischen Systemen) werden zentral.²⁷³ Neben der Kybernetik als mathematischer Diszi-

²⁷¹ Also das Problem der »Fremd-« und »Selbstreferenz«. Darüber hinaus geht es auch um Themen wie die Beobachtung von Beobachtungen und die beobachterabhängige Festlegung von Unterscheidungen (System-Umwelt, Bewußtsein-Kommunikation, Gehirn-Bewußtsein usw.); kurzum: es wird nach der Konstitution (und dem begrifflichen Sinn) von Sinn und Information, von Einheit und Vielheit, von systemischer Identität und Autonomie, von Offenheit und Geschlossenheit etc. im kognitiven Feld eines Beobachters gefragt. - Alle diese Bemerkungen beziehen sich auch auf den nachfolgenden Abschnitt dieses Kapitels: »Autopoiese und Selbstreferentialität«.

²⁷² »Selbstbezüglichkeit« im Bereich von Informationsprozessen (Semantik) kann hier mehr als bloß »Rekursivität« (von Funktionen) meinen.

²⁷³ Damit wird nicht behauptet, daß diese Begriffe bei den vorstehend besprochenen Konzepten keine Rolle spielen würden: »organisatorische Geschlossenheit« zeigen auch Eigens Hyperzyklen und Prozesse der Eigenwertbildung treten bei allen selbstorganisierenden dynamischen Systemen auf (Attraktoren). Doch tritt die Bedeutung dieser Begriffe jetzt stärker in den Vordergrund, da sie systematisch miteinander

plin gewinnt dabei vor allem die Kognitionsbiologie an Bedeutung: entsprechend stark waren auch die Auswirkungen der hier entstandenen neuen Konzepte auf die »cognitive sciences«: etwa die Neurobiologie (Theorie des Gehirns), die (Gestalt-)Psychologie, die Psychiatrie (Familientherapie, Schizophrenieforschung) und bestimmte geistes- und sozialwissenschaftliche Disziplinen. Aus der selbstreferentiellen Struktur »autologischer« Systeme (der Zirkularkausalität »nicht-trivialer Maschinen«) schließlich ergaben sich logische Probleme i. S. logischer Paradoxa, die zu Begründungsversuchen einer nicht-aristotelischen oder »transklassischen« (mehrwertigen) Logik anreizten (z. B. G. Günther): die Beschäftigung mit beobachterabhängigen Kognitionsvorgängen, rekursiven sozialen Kommunikationsprozessen, dem selbstorganisativen Aufbau neuronaler Netzwerke, pathologischen »double-bind«-Situationen (G. Bateson, P. Watzlawick) und den informationstheoretischen Konsequenzen »semantisch geschlossener« Systemoperationen führte allmählich zu einer neuen (konstruktivistischen) Sicht der Wirklichkeit als ganzer.

Die Wegbereiter dieser neuartigen Weltsicht sind zahlreich. In diesem Abschnitt werden wir vor allem den Ansatz Heinz von Foersters behandeln, dessen Arbeiten auf dem Gebiet der Selbstorganisationstheorie zu den frühesten überhaupt zählen. Damit zusammenhängend werden wir auf die Überlegungen von Gordon Pask, eines wichtigen Weggefährten von Foersters, und auf einen bahnbrechenden Artikel Magoroh Maruyamas eingehen.

Der österreichische Physiker und Kybernetiker Heinz von Foerster, 1911 in Wien geboren, wanderte 1949 in die USA aus, wo er über Vermittlung des Psychologen und

verknüpft und selbstreferentielle Prozesse auf höherer Systemstufe oder Emergenzebene (kognitive und kommunikative Prozesse) betrachtet werden. Natürlich gibt es zahlreiche ideelle Verbindungen zwischen allen diesen Konzepten, andernfalls sie kaum unter das gemeinsame Paradigma der Selbstorganisation subsumiert werden könnten. Es gilt jedoch, die konzeptuellen Unterschiede - die nicht zuletzt aus der unterschiedlichen Spezifik der jeweils behandelten Problemlage herrühren - möglichst klar zu sehen: man kann nicht bruchlos von einem zum andern Konzept übergehen bzw. zwanglos verschiedene Begrifflichkeiten (oder auch kontextrelative Bedeutungsvarianten bei der Verwendung gleicher Ausdrücke) zusammenfügen - obgleich derzeit ein solch »hybridisierendes« Verfahren bei vielen »Anwendungen« von Selbstorganisationstheorien auf neue Forschungsfelder beobachtet (und als modischer »Theorien-Mix« beklagt) werden kann.

Neurologen W. S. McCulloch zu den berühmten »Macy-Konferenzen«²⁷⁴ eingeladen wurde, um dort seine Gedanken zu einer quantenmechanischen Untersuchung des Gedächtnisses vorzutragen. Es waren vor allem diese intensiven Kontakte mit Wissenschaftlern im Rahmen der Macy-Tagungen, die während der 1950er Jahre von Foersters bereits frühes Interesse an Prozessen der Selbstorganisation auf der Basis kreiskausaler Systemoperationen und an den damit verbundenen logischen Problemen vertieft haben. »Das hat schon immer gebrutzelt - viele von diesen kybernetischen Problemen. Was mich besonders fasziniert hat, war diese zirkulare Kausalität, the circular causality, ..., weil sie diese zwei Seiten hat: die aristotelische causa finalis und die aristotelische causa efficiens - die sind hier ja in einem Zirkel zusammen; es kommt nur darauf an, wo man hinschaut. ... So hab' ich schon früh das Gefühl gehabt, wenn man irgendwie Organisationsprozesse betrachtet, wo irgendetwas sich formiert, wenn man das kühn als Zirkularprozeß betrachtet, dann kann man sehen, wie die Funktionen an sich selbst operieren, daß sozusagen das System an sich selber operiert und daß dadurch gewisse Formen entstehen oder nicht entstehen, ... abhängig von den Umständen der Operation.«²⁷⁵

Von Foerster sollte nicht nur einer der Väter der modernen Selbstorganisationsforschung werden, sondern auch der erste sein, der für sie einen institutionellen Rahmen geschaffen hat: Am »Biological Computer Laboratory« (BCL) der University of Urbana, Illinois, scharte er seit 1957 eine interdisziplinäre Forschergruppe wechselnder Zusammensetzung um sich, die sich mit der Ausarbeitung der biologischen Systemtheorie und Kybernetik zur Theorie selbstorganisierender Systeme befaßte: zu den zeitweisen Mitgliedern (Gästen) der Gruppe gehörten etwa W. R. Ashby, G. Pask, H. Maturana, F. J. Varela, G. Günther, W. McCulloch, J. Lettvin und L. Löfgren.

²⁷⁴ Diese fanden in kurzen Abständen seit 1942 statt; nach einem Vorschlag von Foersters wurden sie ab 1949 »Conferences on Cybernetics« genannt.

²⁷⁵ H. von Foerster, Interview mit G. Küppers in Pescadero/Cal., USA, im Okt. 1985, unveröffentl. Tonbandabschrift, Universität Bielefeld.

Die Breite des am BCL bearbeiteten Themenspektrums ist beeindruckend.²⁷⁶ Diese Gruppe bildete »eigentlich ein enges Freundesnetz«. Befragt nach der Rezeption der Arbeiten des BCL in den Jahren bis zu seiner Auflösung (1975), antwortete von Foerster: »Wir sind nicht sehr publiziert worden, wir waren nicht im mainstream, sondern sind immer peripher gewesen ... vielleicht durch politische Gründe. ... Da waren Leute wie Maturana, der ja der führende Kopf in der Neuroanatomie ist, der also die ganzen neuroanatomischen Grundlagen für die Erkenntnisse der Retina und ihrer Funktion entwickelt hat. Diese Arbeiten, die schrittmachend waren, wurden vollkommen ignoriert.« Als ein weiteres Beispiel führt von Foerster den Philosophen Gotthard Günther²⁷⁷ und

²⁷⁶ Die Publikationsliste des BCL (*Author Index 1957-1976*, hg. von K. L. Wilson, Urbana/Ill. 1976) weist rund zweihundert Titel auf von Arbeiten, die größtenteils während des Gastaufenthaltes der Autoren am BCL entstanden sind. Dazu gehört u. a. der wichtige Sammelband *Some Principles of Preorganization in Self-Organizing Systems*, hg. von M. Babcock et al., Urbana/Ill. 1960. Die Liste enthält etwa Arbeiten von A. M. Andrew (z. B. über neuronale Netzwerke), von M. Babcock (u. a. zur automatischen Sprachanalyse), von M. Hoffman (ebenfalls über »speech analysis«), von A. Inselberg (zu nicht-linearen Operationen), neurophysiologische Arbeiten von K. Kokjer, von L. Löfgren u. a. eine »Theory of Uniform Switching Nets«, Arbeiten von A. A. Mullin zur Zahlen- und Gruppentheorie sowie zu stochastischen Modellen, die Überlegungen von L. Peterson zu einer »Theory of Description«, von J. K. Russell zu »visual image processors«, von I. Thomas u. a. eine Arbeit über »Speech Synthesis and Recognition«, weiterhin informationstheoretische Arbeiten von S. Umpleby, solche von C. C. Walker über programmiertes Lernen und zur Psychotherapie, schließlich von P. Westen etwa über »cognitive machines« und von G. W. Zopf u. a. eine Arbeit über »Attitude and Context«. Die Arbeiten werden ausgewiesen entweder als interne Papiere oder als veröffentlichte Zeitschriftenartikel, Sammelbandbeiträge bzw. Monographien.

²⁷⁷ So sehr auch von Foerster im persönlichen Gespräch die philosophische Bedeutung Gotthard Günthers herausstellt und so sehr dieser auch im Hintergrund (im »Freundesnetz« des BCL) gewirkt haben mag, so ist doch - wie eine zitationsanalytische Durchsicht der am BCL entstandenen Arbeiten zeigt - die Rezeption seiner zahlreichen Arbeiten innerhalb dieser Gruppe (und wohl auch darüber hinaus) recht spärlich ausgefallen: während Günther mit Hinweisen auf von Foerster, Pask, McCulloch u. a. keineswegs geizt, fällt es umgekehrt offenbar schwer, Günthers Versuche, das Problem der Selbstbezüglichkeit in der Sprache einer logischen Grammatik (»Kenogrammatik«) zu formulieren, für anderweitige theoretische Überlegungen oder gar empirische Untersuchungen fruchtbar zu machen. So weit ich sehen kann, sind diese Versuche auch nicht besonders erfolgreich verlaufen. - Wichtige am BCL entstandene Arbeiten waren etwa: »Cybernetics and the Transition from Classical to Trans-Classical Logic«, Report No. 3.0, Urbana/Ill. 1965, sowie »Formal Logic, To-

dessen Begründungsversuch einer nicht-aristotelischen Logik an: »Sagen Sie das einem Menschen - der sagt: mein Gott, die sind ja von allen guten Geistern verlassen! Jetzt gehen sie sogar gegen die aristotelische Logik an! Ich sage: mit aristotelischer Logik können Sie die Logik der Perzeption nicht verstehen. ... Man war zu früh. Was wir gesagt haben, hat nicht gepaßt. Es muß eben doch jeder selber drauf kommen. Man kann es eben nicht erzählen. Der McCulloch hat diese schöne Sache gesagt: Wenn man jung ist, hat man furchtbar Angst, daß einem die Ideen gestohlen werden; wenn man älter ist, freut man sich, daß die Ideen gestohlen werden. Denn dann sieht man, die anderen haben es auch verstanden.«

Besser dagegen sei die Aufnahme der BCL-Ideen in Europa gewesen: »wann immer ich nach Europa gekommen bin, wurde ich mit weiten Armen aufgenommen« - z. B. von K. Lorenz und I. Eibl-Eibesfeld im Max-Planck-Institut für Verhaltensforschung in Seewiesen; ebenso bei der Deutschen Gesellschaft für Kybernetik. Hier sei das wissenschaftliche Interesse an Problemen des »Selbst« und der Kommunikation weitaus größer als in den Staaten gewesen. Für das schlechte Echo in den USA macht von Foerster nicht zuletzt die politische Situation verantwortlich: »ein Rückschlag war natürlich der Vietnamkrieg.« 1975 wurde das BCL aufgelöst, als die bis dahin großzügige staatliche Unterstützung - im Zuge eines politischen Führungswechsels von den Demokraten zu den Republikanern - ausblieb.

Wenden wir uns den Ideen H. von Foerstern zu: Die Anlaufphase des von Foersterschen Selbstorganisationsdenkens bilden die späten 1950er Jahre bis ca. 1963. Seit 1959 entstehen auch die ersten Arbeiten von Foerster zu einer Kybernetik selbstorganisierender Systeme. Ausgangspunkt war die Behandlung des Problems der Organisation auf der Grundlage der Informationstheorie: »Wie kann man das Problem der Organisation formulieren? ... Kann man z. B. Informationstheorien für Organisationen verwenden? ... Ein Maß [für Organisationen], welches die Informationstheorie angeboten hat, war die Formulierung der Redundanz. So habe ich mich damals versuchsweise hingesezt und habe

ality and the Super-Additive Principle«, Report No. 3.3., Urbana/Ill. 1966. Einen guten Überblick über Günthers Ideen geben die beiden Bände von *Idee und Grundriß einer nicht-Aristotelischen Logik*, Hamburg 1978 bzw. 1979, sowie die drei Sammelbände *Beiträge zur Grundlegung einer operationsfähigen Dialektik*, Hamburg 1976 (Bd. I), 1979 (Bd. II) und 1980 (Bd. III).

gefragt, ... was passiert da bei einer Organisation.«²⁷⁸ Seine ersten Überlegungen dazu hat von Foerster auf der wohl ersten Konferenz über selbstorganisierende Systeme überhaupt vorgetragen: sie fand am 5. und 6. Mai 1959 an der Universität von Illinois statt. Der Titel des Vortrags von Foerstern lautete: »On Self-Organizing Systems And Their Environments«.²⁷⁹

Von Foerster stellte zunächst klar, daß die Rede von »selbstorganisierenden Systemen« sinnlos sei, wenn das System in engem Kontakt (»close contact«) zu einer Umwelt steht, die bereits für es verfügbare Ordnung und Energie besitzt: in diesem Falle - der bloßen Einverleibung extern vorgegebener Ordnung - würde das System auf Kosten der Umwelt »leben« (»live on the expenses of this environment«) und keineswegs Ordnung erst generieren, also »selbst organisieren«. Deshalb dürfe man sich die Selbstorganisation eines Systems nicht als Import von Ordnung vorstellen: die Umwelt liefert nicht bereits die *funktionsfertigen* Bausteine des sich selbst ordnenden Systems, sondern lediglich Energie und Baumaterial (das gleichwohl strukturiert sein mag²⁸⁰).

Als nächstes behandelt von Foerster die epistemologische Frage, wie sich zeigen läßt, »in which sense we may talk about the existence of such an environment«. Ein Problem entsteht hier, »when we, men, consider ourselves to be self-organizing systems«. Ihm geht es dabei um eine Widerlegung des solipsistischen Standpunkts: Einmal angenommen, »that I am the sole reality, while everything else appears only in my imagination«, dann müßte ich doch zugeben, daß, wenn in meiner Vorstellung mir ähnliche Personen existieren, in deren Vorstellung wiederum ich auftreten könne. Daraus ergibt sich offensichtlich ein logischer Widerspruch: »If I assume that I am the sole reality, it turns out that I am the imagination of somebody else, who in turn assumes that *he* is the sole reality. Of course,

²⁷⁸ Ebenda.

²⁷⁹ In: M. C. Yovits und S. Cameron, *Self-Organizing Systems*, Proceedings of an Interdisciplinary Conference, Oxford/London/New York/Paris 1960, S. 31 ff.

²⁸⁰ Im Falle der Nahrungsaufnahme von Lebewesen stellt die Umwelt etwa Aminosäuren (mit einer bestimmten chemischen Struktur) zur Verfügung; deren Verkettung zu genau den spezifischen Proteinen, aus denen sich die jeweiligen Organismen strukturell und funktionell aufbauen, ist dann freilich eine - selbstorganisierte - Leistung des diesen Organismen jeweils eigentümlichen (artspezifischen) Proteinsyntheseapparates.

this paradox is easily resolved, by postulating the reality of the world in which we happily thrive«.²⁸¹ Die Existenz der Außenwelt ist mithin für selbstorganisierte kognitive Systeme eine notwendige Unterstellung, die sich aus der reflexiven Verschachtelung ihrer ›innerweltlichen‹ Vorstellungsprozesse begründen läßt.

Von Foerster faßt seine bisherigen Überlegungen wie folgt zusammen:

- (1) By a self-organizing system I mean that part of a system that eats energy and order from its environment.
- (2) There is a reality of the environment in a sense suggested by the acceptance of the principle of relativity.
- (3) The environment has structure.²⁸²

Diese Argumentation - »exactly modeled after the ›Principle of Relativity‹« - entspricht einer der Grundthesen des später sogenannten »Radikalen Konstruktivismus«: einerseits gilt die Wirklichkeit - als das Ensemble bestimmter wahrgenommener Entitäten und Eigenschaften - als ein Konstrukt selbstorganisierter kognitiver Prozesse von Beobachtern, andererseits wird dennoch an der Existenz einer kognitionsunabhängigen - jedoch »objektiv« prinzipiell unerkennbaren - Realität »an sich« festgehalten. Es gibt also eine Umwelt selbstorganisierender Systeme, und diese Umwelt ist in irgendeiner Weise strukturiert.

Anschließend wendet von Foerster sich wieder dem Prozeß der Zunahme an innerer Ordnung in selbstorganisierenden Systemen zu, mit der Bemerkung, »that we have to be very cautious in applying the word ›inside‹ in this context, because, even if the position of the observer has been stated, he may have a tough time saying what he sees«.²⁸³ Als ein Maß für Ordnung schlägt von Foerster den Begriff der Redundanz (R) von Shannon vor:

$$R = 1 - H/H_m,$$

²⁸¹ Ebenda, S. 34 f.

²⁸² Ebenda, S. 36.

²⁸³ Ebenda, S. 37.

wobei H der Entropie des Systems zum Zeitpunkt t_0 und H_m dem Maximum der Entropie, das das System überhaupt annehmen kann, entspricht. Ohne hier auf mathematische Details einzugehen, wollen wir festhalten, daß das Verhältnis von H zu H_m die momentane relative Ordnung des Systems, d. h. seinen jeweiligen Ordnungszustand vor dem Hintergrund der maximal möglichen Unordnung des Systems bestimmt. »What we expect from a self-organizing system is, of course, that, given some initial value of order in the system, this order is going to increase as time goes on.«²⁸⁴ M. a. W.: die Entropie des Systems nimmt genau dann ab, wenn H_m konstant bleibt. Nur dann findet Selbstorganisation statt.

Im nächsten Schritt diskutiert von Foerster, wie die Wahrscheinlichkeitsverteilung der (Element-)Zustände des Systems dessen Entropie zu verändern vermag. Von Foerster diskutiert insbesondere die Möglichkeit, daß die Zunahme an Ordnung oder Redundanz²⁸⁵ dadurch bewirkt wird, daß - quasi durch die Tätigkeit eines »internal demon« - die Verknüpfungen zwischen den Systemelementen ständig manipuliert werden. Ferner stellt von Foerster sich vor, daß der »interne Dämon« in Kooperation mit einem »external demon« tritt, »whose business it is to admit to the system only those elements, the state of which complies with the conditions of, at least, constant internal entropy«.²⁸⁶ Der »innere Dämon« ist für die Entropie H , der »äußere Dämon« für die Entropie H_m zuständig: letzterer liefert die geeignete Energie, die ersterer für den Aufbau der internen Systemordnung benötigt.

Im letzten Schritt seiner Überlegungen übersetzt von Foerster seine »Dämonologie« in die Sprache der Systemtheorie: der »äußere Dämon« steht nunmehr für die Randbedingungen (»the boundary of our system«), unter denen das System sich selbst organisiert, der »innere Dämon« für die operationale Geschlossenheit der Systemprozesse, die sich selbst (und damit H) kontrollieren; das »entropic coupling of the two demons« schließlich bedeutet, daß auf der Basis der operationalen Geschlossenheit aus den Störungen (»noise«

²⁸⁴ Ebenda, S. 38.

²⁸⁵ »Redundanz« verstanden als die Wahrscheinlichkeit, mit der Elementzustände wechselseitig auseinander abgeleitet werden können.

²⁸⁶ Ebenda, S. 40.

= Energie>Angeboten<-) seitens der Umwelt vom System gerade diejenigen ausgewählt werden, die die Ordnung des Systems vergrößern.

Von Foerster führt zwei mögliche Prinzipien der Entstehung von Ordnung an: das Prinzip des »order from order« (des >Imports< von Ordnung in das System) und das Prinzip des »order from noise« (der selektiven Verwendung von Störungen aus der Umwelt zum selbstaktiven Aufbau systeminterner Ordnung). Es ist nun dieses zweite Prinzip, in dem von Foerster den Schlüssel (»clue«) zum Verständnis selbstorganisierender Systeme - und des Lebens - erblickt.²⁸⁷ Man kann sagen, daß von Foersterns Modell ein (selektiver) >statistischer< Mechanismus zugrundeliegt, der zur Bildung systemischer Ordnung aus Unordnung führt: energiereiche *Störungen* aus der Umwelt werden ausgewählt, wobei deren Eigenordnung allenfalls insofern ins Gewicht fällt, als sie das System - den aufnehmenden Organismus - darüber >informiert<, ob das >Energieangebot< zum Aufbau eigener Ordnung geeignet ist.

Von Foerster veranschaulicht diesen Mechanismus der Ordnungsbildung aus Unordnung an einer geschlossenen Schachtel, in der sich eine Vielzahl von kleinen Kuben befindet, deren metallische Seitenflächen auf unterschiedliche Weise magnetisiert sind: anfänglich liegen die Würfel völlig ungeordnet (strukturlos) neben- und aufeinander; schüttelt man nun die Schachtel eine Zeitlang (dieses »shaking« entspricht dann einer externen Störung: »noise«), so ordnen sich die Kuben spontan zu einer bizarren Struktur - allein aufgrund der elektromagnetischen Anziehungskräfte zwischen den verschiedenpoligen Kubenflächen: »no order was fed to the system, just cheap undirected energy; however, thanks to the little demons in the box, in the long run only those components of the noise were selected which contributed to the increase of order in the system.«²⁸⁸

Fassen wir das Ergebnis kurz zusammen, wobei wir einige Überlegungen von Foerstern aus seinen späteren Arbeiten (speziell zur Ausbildung von »Eigenwert«-Strukturen²⁸⁹) mit-

²⁸⁷ Ebenda, S. 42 f.

²⁸⁸ Ebenda, S. 45.

²⁸⁹ Siehe z. B. H. von Foerster, »Principles of Self-Organization in a Socio-Managerial Context«, in: H. Ulrich und G. J. B. Probst (Hg.), *Selforganization and Management of Social Systems. Insights, Promises, Doubts, and Questions*, Berlin u. a. 1984, S. 2 ff.; hier demonstriert von Foerster die Bildung von Eigenwerten am Beispiel rekursi-

einbeziehen, um die Grundkonturen des von Foersterschen Konzepts klarer hervortreten zu lassen: Von Foersters neuartiges Prinzip des »order from noise« bedeutet, daß sich ein selbstorganisierendes System energiereiche Materie aus seiner Umwelt einverleibt, aber nicht so, daß Ordnung strukturell unverändert von außen übernommen und bloß implantiert wird: was Einlaß findet, ist lediglich strukturiertes »Baumaterial«, das einer bereits existierenden inneren Ordnung des Systems eingepaßt wird. Selbstorganisierende Systeme verfügen gewissermaßen über einen autonomen »Rand« (eine biologische Membran oder ähnliches zur »Abgrenzung« gegenüber ihrer Umwelt), der ihnen eine selektive Verfügung über Umweltstrukturen erlaubt. Dieser »Rand« ist dabei eine Folge der operationalen Geschlossenheit des Systems, die über die Ausbildung von »Eigenwerten« alle möglichen Systemzustände selbst festlegt. Die Umwelt vermag die eigendynamische Selbststeuerung des Systems lediglich zu stören - und dadurch dessen etwaige Reorganisation anzuregen -, nicht aber zu kontrollieren (was einer »Fremdorganisation« gleichkäme). »Ordnung durch Störung« meint dann, daß die Prozeßdynamik gerade die Störungen (energetischen Impulse) aus der Umwelt auswählt und einbaut, die zu einem Zuwachs an innerer Ordnung führen. Energetisch verbirgt sich hinter diesem Prinzip die Tatsache, daß ein begrenztes System Energie nur dann unbegrenzt importieren kann, wenn es ihm gelingt, einen Teil dieser Energie in Eigenstruktur umzuwandeln, d. h. in Form von Ordnung zu speichern und dadurch zu neutralisieren; andernfalls würde das System explodieren oder sich desorganisieren. - Mit Hilfe des Shannonschen Redundanzbegriffes war von Foerster so eine zumindest phänomenologische Beschreibung der Selbstorganisation eines System in Wechselwirkung mit seiner Umwelt gelungen.

Geht man die Arbeiten von Foersters während der frühen 1960er Jahre durch, so zeigt sich, daß seine Ideen zur Entstehung von Ordnung aus Unordnung vorrangig auf die Mechanismen der Selbstorganisation kognitiver (aber auch sozialer) Prozesse - Lernen und Reflexion, Wahrnehmen und Erinnern, Konkurrenz und Kooperation - abstellen. Hierin bleibt von Foerster der Problemtradition der Kybernetik verpflichtet. An der Literatur jener Jahre - speziell im Umkreis des BCL - fällt auf, daß kybernetische Fragestellungen (auch

ver Operationen, bei denen der Output immer wieder (iterativ) zum Input wird; nach einer gewissen Anzahl von Durchläufen ergibt sich ein fester Wert: der »Fixpunkt« der jeweiligen rekursiven Operation.

wo von neuronalen Netzwerken oder sozialem Gruppenverhalten die Rede ist) dominieren: es geht häufig um die Selbstoptimierung bzw. -reparatur von Computerprogrammen bzw. um Probleme der Adaptation des Verhaltens, speziell im Hinblick auf Lern- und Gedächtnisprozesse von Automaten. Das Interesse daran, Möglichkeiten der Erzeugung »künstlicher Intelligenz« auszuloten und darüber auch die Leistungen der »natürlichen Intelligenz« (Mustererkennung, Orientierung, Entscheidungsfindung usw.) von Organismen besser zu verstehen, ist offensichtlich.²⁹⁰

Während jedoch der Mainstream der Kybernetik damals dem kognitivistischen Paradigma der »Symbolverarbeitung« nach einem vorgegebenen deduktionslogischen Regelwerk verhaftet blieb, bestand die Strategie der Kybernetiker der Selbstorganisation darin, »ein kognitives System zu bauen, indem man nicht bei Symbolen und Regeln ansetzt, sondern mit einfachen Bestandteilen beginnt, die sich in dynamischer Weise und großer Dichte miteinander verknüpfen. ... Da das System ein Netzwerk ist, >emergiert<, d. h. ergibt sich spontan ein *übergreifendes* Zusammenwirken, sobald die Zustände aller beteiligten >Neuronen< einen für alle befriedigenden Zustand erreichen. In einem solchen System bedarf es daher keiner zentralen Verarbeitungseinheit, um die Gesamtdynamik zu steuern. Dieser Übergang von lokalen Regeln zu übergreifender Kohärenz ist der Kern dessen, was in den Jahren der Kybernetik >Selbstorganisation< genannt wurde.«²⁹¹ Diesen Kybernetikern, wie eben H. von Foerster, ging es also um die selbstorganisative Erzeugung (Emergenz) neuer Eigenschaften eines netzwerkartig strukturierten Systems ohne Rückgriff auf externe Einwirkungen oder ein internes Steuerprogramm.

Besonders befördert wurden von Foersters Vorstellungen in dieser Sache offenbar durch seine Zusammenarbeit mit Gordon Pask, einem englischen Psychologen und Kybernetiker, in dessen umfangreichem Werk die Intention im Vordergrund steht, Modelle für das Lernen von Maschinen und Menschen (möglichst in Analogie zueinander) zu entwickeln; dabei gewinnt der Begriff der »organizational closure« seit Mitte der 1960er Jahre zunehmend an

²⁹⁰ Vgl. etwa die Arbeiten von W. R. Ashby, G. Pask, L. Löfgren oder A. Rapoport in dem von H. von Foerster und G. W. Zopf hrsg. Tagungsband *Principles on Self-Organization. Transactions of the University of Illinois Symposium on Self-Organization 1961*, erschienen in der Reihe *International Tracts in Computer Science and Technology and Their Application*, Vol. 9, Oxford u. a. 1962.

²⁹¹ F. Varela, *Kognitionswissenschaft - Kognitionstechnik*, a. a. O., S. 60 ff.

Bedeutung. So stellt Pask in »A Cybernetic Model for some Types of Learning and Mentation« (1968)²⁹² in formalisierter Form den Aufbau eines lernfähigen kybernetischen Modells vor, dessen Leistungsvermögen die Vorzüge der bisher vorliegenden »models for mentation« zusammenfassen und überbieten soll: als ältere Modellierungsversuche nennt er (1.) »models for cognitive structures« (hierfür steht z. B. der Linguist N. Chomsky), (2.) »maturational models, notably Piaget's«, (3.) »models in which the organism is viewed in close relation to its fellows or its environment« (etwa Batesons »homeostatic structures«) und (4.) »structural models in neurology and physiology«.²⁹³ Pasks eigenes Modell geht insofern über diese Ansätze hinaus, als es eine Lernorganisation entwirft, die eine »control of control« vorsieht: kontrolliertes Problemlösungsverhalten kann i. S. evolutionärer Lernfortschritte selbst Gegenstand kontrollierter Entwicklung sein. Hierbei komme dem »concept learning« (dem Erlernen kognitiver Schemata) ein besonderes Gewicht zu.²⁹⁴

Diesem Lerntyp hat Pask in seinen weiteren Arbeiten vornehmlich seine Aufmerksamkeit geschenkt: so etwa in seinem Aufsatz »Cognitive Systems« von 1970.²⁹⁵ Hier definiert Pask kognitive Systeme als »certain types of problem solving or control systems«, wobei ein »concept« die »elementary unit of a cognitive system« darstellt; ein kognitives System »learns concepts, communicates concepts, and it directs its attention to significant parts of its environment or its own activity«.²⁹⁶ Zunächst gibt Pask einen Überblick über die Strukturen kognitiver Systeme, um anschließend deren Organisation zu schematisieren. Er betont, »that the system learns concepts and these are procedures for computation and control«, was besonders im Hinblick auf die Entwicklung von »cognitive artificial intelligence systems« bedeutsam sei.²⁹⁷ Mit diesem Hinweis bereitet er die mehr an praktischen

²⁹² In: H. C. Oestreicher und D. R. Moore (Hg.), *Cybernetic Problems in Bionics*, London 1968, S. 531 ff.

²⁹³ Ebenda, S. 531 f.

²⁹⁴ Ebenda, S. 553 ff.

²⁹⁵ In: P. Garvin (Hg.), *Cognition - A Multiple View*, New York/Washington 1970, S. 349 ff.; dieser Band enthält auch Arbeiten von H. Maturana und H. von Foerster.

²⁹⁶ Ebenda, S. 349.

²⁹⁷ Ebenda, S. 359.

Realisationen orientierten Arbeiten seiner nachfolgenden Forschungsphase vor. - Er definiert Lernen als »a hierarchy of problem solving« und unterscheidet zwischen dem Begriffs-Repertoire eines lernfähigen Systems (»box« Nr. 1) und einer »box« Nr. 2 desselben Systems, die »contains concepts about how to learn (these are frequently referred to as »learning strategies« or, in the psychological sense, as »learning sets«)«. ²⁹⁸ Zur Evolution der erstgenannten bzw. auch beider »boxes« kommt es infolge eines »contact with other systems which have usually different concepts«, der entweder Konkurrenz oder Kooperation erzwingt. Für Pask schließt der Begriff des »concept learning« - im Unterschied zur psychologischen Tradition - sowohl »discrimination learning« als auch »abstraction learning« ein: »It seems likely that all human learning (even operant conditioning) is *concept learning*.« ²⁹⁹ Zwecks Auswahl der richtigen Problemlösung führt Pask einen lernstrategischen »attention mechanism« ein, der »overlooks a collection of goal seeking systems operating below the level of commitment and one, above threshold, which determines the prevailing mode of behavior«. Nur »attention directing systems« vermögen neue Konzepte kontrolliert zu erzeugen. ³⁰⁰ Ausschließlich solche kognitiven Systeme sind selbstorganisierend, selbstinnovativ und damit evolutionsfähig.

Auf eine andere wichtige Forscherpersönlichkeit im Bezugskreis systemtheoretisch-kybernetischer Ansätze soll an dieser Stelle zumindest hingewiesen werden: auf den gebürtigen Briten Gregory Bateson (1904-1980), einen seit 1942 regelmäßigen Teilnehmer der Macy-Konferenzen, dessen Ideen einen unschätzbaren Einfluß auf Forscher wie H. von Foerster ausgeübt haben und immer noch ausüben. Der Bogen seiner Interessen und Arbeiten spannt sich von der Ethnologie ³⁰¹, Anthropologie und Psychologie (Schizophrenieforschung) ³⁰² über die Lern- und Kommunikationsforschung (z. B. an Delphinen, zusammen

²⁹⁸ Ebenda, S. 361.

²⁹⁹ Ebenda, S. 365 f.

³⁰⁰ Ebenda, S. 370.

³⁰¹ So hat Bateson in den 1930er und 1940er Jahren Feldstudien auf Neu-Guinea und Bali getrieben - z.T. in Zusammenarbeit mit Margaret Mead, seiner zeitweiligen Ehefrau.

³⁰² Das wohl wichtigste Ergebnis seiner psychologischen Studien während der 1950er und 1960er Jahre war die Entwicklung der sogenannten »Double-bind«-Theorie, einer

mit John Lilly) und die Evolutionstheorie bis hin zur Begründung einer neuen ökosystemischen Sicht der Lebensprozesse und einer »Ökologie des Geistes«.³⁰³ Bateson war in so vielen Kontexten aktiv, daß wir ihn hier nur äußerst selektiv behandeln wollen. Während Batesons frühe systemtheoretische Arbeiten³⁰⁴ noch dem Homöostase-Ansatz verpflichtet sind, taucht in den 1960er Jahren erstmals der Begriff des »offenen Systems« auf, der zusammen mit den Begriffen des Musters und des Kontextes sowie einem neuartigen Konzept des Lernens in den 1970er Jahren zur Keimzelle seiner »cybernetics of >self<« und seiner ökologischen Epistemologie werden sollte. Da wir hier lediglich die Gründungsphase kybernetischer Selbstorganisationsansätze betrachten, wollen wir uns auf das Referat zweier wichtiger Aufsätze Batesons beschränken:

1967 erscheint Batesons Aufsatz »Cybernetic explanation«.³⁰⁵ Hier entwickelt Bateson einen kontextbezogenen Kommunikationsbegriff: Kommunikation gilt als »Erzeugung von Redundanz oder Musterung«. Kommunikative Prozesse sind rückgekoppelte, d.h. zirkular-kausale Prozesse. Da nun das Verstehen von Information im je besonderen Kontext des jeweiligen Kommunikatorsystems stattfindet, kann eine informationelle Übereinstimmung zwischen zwei kommunizierenden Systemen nicht festgestellt werden. Verstehen kann auch nicht von außen determiniert werden: »In Kommunikationssystemen ... stammt die Energie der Reaktion gewöhnlich vom reagierenden Teil«.³⁰⁶ Überhaupt ist Information nicht - wie Materie oder Energie - lokalisierbar: sie bezeichnet Kontraste, Korre-

der Säulen der modernen (systemischen) »family therapy«.

³⁰³ Einen guten Überblick über seine zahlreichen Arbeiten gibt der Sammelband: G. Bateson, *Ökologie des Geistes*, Frankfurt a.M. 1981 (der engl. Originaltitel *Steps to an Ecology of Mind. Collected Essays in Anthropology, Psychiatry, Evolution and Epistemology*, New York 1972, führt eindringlich die Spannweite der Batesonschen Forschungsinteressen vor Augen).

³⁰⁴ Siehe etwa G. Bateson, »Physical Thinking and Social Problems«, in: *Science* 103, 1946, S. 717f., wo »systems of reciprocal causation«, »feedback-systems« und »self-correcting behavior« in noch ganz traditioneller Weise behandelt werden.

³⁰⁵ In: *American Behavioral Scientist*, 10, no. 6, S. 29 ff.; dt. unter dem Titel »Kybernetische Erklärung« in G. Bateson, *Die Ökologie des Geistes*, a. a. O., S. 515 ff.

³⁰⁶ Ebenda, S. 520. Dies definiert die Autonomiebedingung selbstdeterminierter Systeme.

spondenzen, Symmetrien usw., kurzum: »Differenzen«, die ihrerseits Differenzen produzieren (»a difference, that makes a difference« lautet Batesons berühmtes Diktum). Auf diese Weise bilden sich Muster heraus, Formen oder Redundanzen, die über »Einschränkungen« (Verknüpfungsregeln) eine geistige Ordnung der wahrgenommenen Wirklichkeit erlauben. Bateson schließt mit den Worten: »Alles, was nicht Information, nicht Redundanz, nicht Form und nicht Einschränkung ist - ist Rauschen, die einzig mögliche Quelle neuer Muster.«³⁰⁷ Wohl nicht zufällig erinnert dieser Satz an von Foesters »order-from-noise«-Prinzip.

Dieser Gedankengang liegt auch dem 1968 erscheinenden Aufsatz »Redundancy and coding«³⁰⁸ zugrunde: Redundanz, ein Synonym für »Musterung«, ermöglicht Vorhersagbarkeit, indem sie zwischen Signal und Rauschen zu unterscheiden hilft.³⁰⁹ Redundanz und Bedeutung fallen zusammen, wenn beide Ausdrücke sich auf dasselbe Diskursuniversum beziehen. Dabei schränken Regeln (Codes) ein, was gelernt werden kann (Informationsentstehung bzw. Bedeutungszuweisung). Diese Regeln sind allerdings im Rahmen von Prozessen des »Meta-Lernens« veränderbar. - Das System, das Bateson (als Beobachter) betrachtet, ist der »Organismus *plus* Umgebung«: in diesem steckt »insofern Redundanz, als ein menschlicher Beobachter mit besserem als nur zufälligem Erfolg auf die Natur der Umgebung schließen kann«³¹⁰: der Organismus bezieht sich als Teil dieses Systems auf die Umwelt (das Milieu) als Ganzes, da sich aus seiner spezifischen Gestalt für einen Beobachter etwas über die Beschaffenheit seines Lebensraumes schließen läßt (der Phänotyp entspricht den Umweltbedingungen: z. B. die Form des Fischkörpers den Fließeigenschaften des Mediums Seewasser). »Teile« sind insofern »Zeichen« für das Ganze, den ökologischen Gesamtzusammenhang: dieser Zusammenhang ist das Ergebnis von Evolution. Auch die Entwicklung der verbalen Sprache beim Menschen unterliegt für Bateson

³⁰⁷ Ebenda, S. 528.

³⁰⁸ In: Th. A. Sebeok (Hg.), *Animal Communication; Techniques of Study and Results of Research* (vorgetragen im Juni 1965 auf der Wenner-Gren Conference on Animal Communication, auf Burg Wartenstein/Österreich), Bloomington/Indiana und London, S. 614 ff.; dt. in: G. Bateson, *Ökologie des Geistes*, a. a. O., S. 530 ff.

³⁰⁹ Ebenda, S. 533.

³¹⁰ Ebenda, S. 536.

einem derartigen Zusammenspiel von (humanem) Organismus und Umwelt (ausgehend von der ikonischen Nachahmung von Phänomenen der Umgebung). Mit solchen Überlegungen nimmt Bateson einige spätere Einsichten der neueren Ökosystemforschung und Ko-Evolutionstheorie vorweg. - Bateson hat auf sehr eigentümliche Weise den Prinzipien und Grundmechanismen der evolutionär selbstgesteuerten Organisation von Kognition und Kommunikation, von Blättern und Tierkörpern, von Zivilisationen und ökologischen Krisen nachgespürt und wurde so zu einem wichtigen Anreger neuer systemtheoretischer und epistemologischer Ansätze zum Verständnis der Selbstorganisation von »Geist und Natur«.³¹¹

Abschließend soll noch auf einen sehr einflußreichen Aufsatz von Magoroh Maruyama - »The Second Cybernetics: Deviation-Amplifying Mutual Causal Processes« (1963)³¹² - eingegangen werden, der den Übergang von einer Kybernetik 1. Ordnung zu einer Kybernetik 2. Ordnung in geradezu paradigmatischer Weise auf den Punkt bringt. Maruyama setzt ein mit der Unterscheidung von zwei »opposite types of systems«: obwohl beide »mutual causal systems« seien, operiere der eine - sozusagen klassische - Systemtyp nach dem »model of deviation-counteracting«, d. h. Abweichungen (Störungen) würden über »negative feedbacks« ausgeglichen, so daß alles beim alten bliebe (Prinzip der »morphostasis«), wohingegen bei dem anderen Systemtyp Prozesse des »deviation-amplifying« dafür sorgten, daß Abweichungen über »positive feedbacks« im Gegenteil eine Verstärkung erfahren, so daß neue Strukturen entstehen könnten (Prinzip der »morphogenesis«). Das Studium von Systemen des ersten Typs falle in den Bereich einer »first cybernetics«, das von Systemen des zweiten Typs gehöre in die Domäne einer »second cybernetics«.³¹³

Systeme, in denen kausale Effekte einer Abweichungsverstärkung unterliegen, stehen nach Maruyama offenbar im Widerspruch zu zwei geheiligten Gesetzen der traditionellen

³¹¹ Um den Titel von Batesons zuletzt erschienenem Werk *Mind and Nature. A Necessary Unity*, New York 1979 (dt. *Geist und Natur*, Frankfurt a.M. 1982) zu zitieren.

³¹² In: *American Scientist*, 51, 1963, S. 164 ff.; wieder abgedruckt in W. Buckley (Hg.), *Modern System Research for the Behavioral Scientist*, Chicago 1969, S. 304 ff., woraus i. F. zitiert wird.

³¹³ Ebenda, S. 304.

Physik: zum einen zum »sacred law of causality«, demzufolge »similar conditions produce similar effects«; und zwar deshalb, weil bei diesen Systemen - und das ohne Zuhilfenahme von Indeterminismus und Probabilismus - der Grundsatz gelte, daß »a small initial deviation, which is within the range of high probability, may develop into a deviation of very low probability«.³¹⁴ Zum andern gilt für derartige Systeme, daß »the second law of thermodynamics is affected by the deviation-amplifying mutual causal process«; bewirkt dieser Prozeß doch einen »gradual increase of inhomogeneity« durch die Entstehung neuer Strukturen, neuer Ordnung (während ja der Entropiesatz einen »decay of inhomogeneity« voraussagt). Was freilich Systeme, in denen Prozesse der Abweichungsverstärkung auftreten, von Systemen, für die die Voraussage des Entropiesatzes zutrifft, fundamental unterscheidet, ist der Umstand, daß erstere *offen* (d. h. »not isolated«) sind.³¹⁵

Wir können hier nicht Maruyamas luzide Diskussion einer Fülle von Beispielen für solche offenen Systeme (etwa: Entstehung städtischer Zentren) wiedergeben, sondern müssen uns mit einigen Hinweisen begnügen: ein »good example« im Bereich der Wirtschaft bildet für Maruyama die bekannte Tatsache, daß unter Bedingungen einer »Laisser-faire«-Politik »the poor become poorer and the rich become richer«: dabei bedeutet die Verschärfung der Besitzunterschiede eine Zunahme an Ordnung, mithin »morphogenesis«.³¹⁶ Als nächstes diskutiert Maruyama den Prozeß der biologischen

³¹⁴ Ebenda, S. 305 f. Maruyamas Feststellung, »that similar conditions may result in dissimilar products« (306) stimmt offenbar überein mit Lorenz' »Schmetterlingseffekt« bezüglich der Sensitivität dynamischer Systeme für geringfügige Schwankungen in den Anfangsbedingungen.

³¹⁵ Ebenda, S. 306.

³¹⁶ Ebenda, S. 305. Maruyama führt u. a. G. Myrdal an, der gezeigt habe, wie besonders in ökonomisch unterentwickelten Regionen die Einkommens- und Vermögensunterschiede zwischen Armen und Reichen beständig zunehmen. Daraus läßt sich für eine politische Wirtschaftsplanung, die an einer Veränderung - sprich Korrektur - solcher Unterschiede interessiert ist, die Notwendigkeit ableiten, einen spezifischen Anfangsimpuls zur Einleitung einer dazu alternativen (>antizyklischen<) Wirtschaftsentwicklung zu setzen und über eine gewisse Zeitspanne hinweg kontinuierlich zu verstärken, bis ein sich selbst tragender Prozeß der Annäherung der Einkommensverhältnisse in Gang kommt: »In the economically underdeveloped countries it is necessary not only to plan the economy, but also to give the initial kick and reinforce it for a while in such a direction and with such an intensity as to maximize the efficiency of development per initial investment. Once the economy is kicked in a right direction

Evolution als ein Beispiel für Abweichungsverstärkung »in several ways«: (1.) als »deviation-amplifying mutual process between the mutations and the environment«; er zeigt, daß Organismen nicht nur über geeignete Mutationen in einer veränderten Umwelt zu überleben vermögen, sondern u.U. auch - wie im Falle des Menschen - in der Lage sind, ihre Umwelt in einer für sie günstigen Weise zu verändern (»create its own environment«), was wiederum neue Spielräume für weitere überlebensfähige Mutationen eröffnet; (2.) als »interspecific deviation-amplification«: in diesem Falle kommt es zu einer sich aufschaukelnden »Ko-Evolution« zwischen verschiedenen Arten, etwa Räubern und Beutetieren: eine Mutation der Beutetiere, die diesen einen relativen Schutz vor ihren Freßfeinden einräumt (z. B. durch »Camouflage«), wird durch eine entsprechende Mutation der Räuber (etwa durch eine Verbesserung der Aufspürfähigkeiten) wieder ausgeglichen usw.; (3.) als »intraspecific selection«: z. B. werden in menschlichen Kulturen Individuen mit besonderen Fähigkeiten, die für den zivilisatorischen Bestand oder Fortschritt wertvoll sind, ausgezeichnet; deren positiver Beitrag für das Gedeihen der Kultur erhöht wiederum die Bereitschaft der Population, solche »supernormal (above-average) members« in vermehrtem Maße zu bevorzugen; (4.) als »effect of inbreeding«: »marriages between close relatives produce individuals in whom certain characteristics are extremely amplified« (so führt inzestuöses Fortpflanzungsverhalten zu einem verstärkten Auftreten bestimmter Erbkrankheiten).³¹⁷

Anschließend stellt Maruyama ein formalisiertes Modell eines zweidimensionalen Organismus vor³¹⁸, dessen verschiedenartige Zellen untereinander nach bestimmten Regeln (die im genetischen Code festgelegt sind) interagieren, und zeigt, wie aus dem Zusammenspiel weniger Interaktionsregeln (als innerer Randbedingungen) und der tatsächlichen

and with a sufficient initial push, the deviation-amplifying mutual positive feedbacks take over the process, and the resulting development will be disproportionately large as compared with the initial kick.« (305)

³¹⁷ Ebenda, S. 306 f.

³¹⁸ »Let us imagine, for the sake of simplicity, a two-dimensional organism. Let us further imagine that its cells are squares of an equal size. Let us say that the organism consists of four types of cells: green, red, yellow, and blue. Each type of cell reproduces cells of the same type to build a tissue. A tissue has at least two cells. The tissues grow in a two-dimensional array of squares.« (Ebenda, S. 308)

Interaktion selbst sich Muster (»patterns«) herausbilden, die die Gestalt des erwachsenen Organismus definieren: »The pattern is generated by the rules and by the *interaction* between the tissues. In this sense, the information to describe the adult individual was not contained in the initial tissues at the beginning but was generated by their interactions.«³¹⁹ Damit hat Maruyama einen formalen Mechanismus angegeben, der es erlaubt, die Ontogenese eines komplexen Lebewesens auf der Basis nur weniger (genetischer) Regeln im Prinzip zu beschreiben: die fertige Gestalt ist ein Ergebnis interaktiver Selbstorganisation, d.h. der zwischen den Zellen eines Organismus unter spezifischen Randbedingungen stattfindenden Interaktion. - Zum Beschluß entwirft Maruyama schematisch - mit Blick auf vereinfacht dargestellte Vorgänge aus dem Wirtschaftsbereich bzw. auf Rückkopplungsschleifen zwischen bakteriellen Erkrankungen und bestimmten gesellschaftlichen Prozessen (Migration, Modernisierung, Bevölkerungswachstum, Gesundheitsvorsorge usw.) - ein kompliziertes Netzwerk rückgekoppelt interagierender Elemente (Variablen), zwischen denen »no hierarchical causal priority« herrscht. Er führt vor, wie »under certain conditions a deviation-amplifying loop may become deviation-counteracting, and a deviation-counteracting loop may become deviation-amplifying«. Auch die Analyse derartiger wechselseitiger Übergänge oder Umschläge von Prozessen verschiedenen Typs sind Gegenstand einer Kybernetik zweiter Ordnung. Maruyamas abschließende Überlegungen berühren sogar den Bereich der Forschung zur »Künstlichen Intelligenz«: »The second cybernetics will be useful also in the technological fields such as in the design of a machine which invents. ... A deviation-amplifying inventing machine, ..., works in the direction specified by the initial kick. ... It is not built for any specific direction, because the direction is a variable which is specified by the initial kick.«³²⁰

³¹⁹ Ebenda, S. 310.

³²⁰ Ebenda, S. 312 f.

2.6 Autopoiese und Selbstreferentialität

Zu den zeitweiligen Gastwissenschaftlern am »Biological Computer Laboratory« (BCL) in Urbana/Illinois gehörten in den späten 1960er und frühen 1970er Jahren auch die chilenischen Neurowissenschaftler Humberto R. Maturana und Francisco J. Varela, die - zusammen mit R. Uribe - Anfang der 1970er Jahre die »Theorie autopoietischer Systeme« begründeten. Der führende Kopf war aber zweifellos Maturana. Im Zentrum dieses Konzepts steht die Frage nach den Prinzipien der Organisation des Lebendigen sowie der Arbeitsweise des Nervensystems. Für autopoietische Systeme ist charakteristisch, daß sie ihre Komponenten durch das Netzwerk der Operationen herstellen, das durch eben diese Komponenten definiert wird. Der Ausgangspunkt ist ein »bio-epistemologischer« oder kognitionsbiologischer: dabei wird das Verhältnis zwischen Kognition und Leben (Organismus mit oder ohne Nervensystem) auf radikal neuartige Weise bestimmt: der Prozeß des Erkennens und der Prozeß des Lebens erweisen sich als letztlich identisch.

Die Theorie autopoietischer Systeme ist, verglichen mit anderen Selbstorganisationskonzepten, erst relativ spät entwickelt worden. Obgleich es wichtige Vorarbeiten - vor allem von Maturana - bereits aus den 1960er Jahren gibt, gelang der entscheidende Durchbruch erst 1970.

Humberto R. Maturana, der »Hauptgründervater« der Autopoiesetheorie, wurde 1928 in Chile geboren. Nach einem Medizinstudium in Chile und England arbeitete er zunächst (1958-1960) als »post-doctoral fellow« am Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.). Hier entstanden mehrere wichtige Gemeinschaftsarbeiten mit J. Y. Lettvin, W. S. McCulloch und W. H. Pitts auf dem Gebiet der Sinnesphysiologie und Neuroanatomie. Nach eigener Aussage³²¹ wurde sich Maturana damals erstmals der Notwendigkeit bewußt, bei der Untersuchung biologischer Phänomene ganz scharf zwischen diesen selbst (ihrer Struktur oder ihrem systemischen Eigenkontext) und ihrer externen Beschreibung (dem deskriptiven Kontext eines Beobachters) zu unterscheiden: er gewann den Eindruck, daß diejenigen unter seinen Kollegen, die sich im Rahmen der »artificial intelligence«-F-

³²¹ In einem Interview, das G. Küppers und W. Krohn 1987 mit Maturana in Bielefeld geführt haben. Unveröffentl. Tonbandabschrift, Universität Bielefeld.

orschung um eine technische Simulation der kognitiven Leistungen biologischer Systeme bemühten, ihren Modellbildungen nicht die bio-kognitiven Phänomene selbst, sondern ihre (funktionalen, intentionalen, teleonomen usw.) *Beschreibungen* dieser Phänomene zugrundelegten.

Als Maturana 1960 als Dozent an die medizinische Fakultät der Universidad de Chile in Santiago zurückkehrte, wurde ihm bald »klar, daß meine eigentliche Arbeit darin bestehen mußte, über biologische Phänomene in einer Sprache zu sprechen, die keinerlei funktionale, zweck- oder zielorientierte, teleonome oder intentionale Begriffe enthielt«. ³²² Maturana erkannte damals, daß es darauf ankommt, die Organisation lebender Systeme in einer Sprache darzustellen, die die Beschreibung der dem Leben zugrundeliegenden »generativen Mechanismen« nicht mit dem intentionalen Vokabular eines Beobachters vermengt.

Es macht eben einen Unterschied, ob man versucht, die Konstitution biologischer Systeme im »context of relations of the systems« zu beschreiben, oder aus der Sicht eines Beobachters, der lebende Systeme von außen betrachtet und dabei dem Zusammenspiel ihrer Komponenten bzw. ihrem interaktiven Verhalten in spezifischen Umwelten einen funktionalen »Sinn«, kognitives Orientierungsvermögen, einen kommunikativen Austausch von Informationen usw. *unterlegt* oder *zuschreibt*. Natürlich darf der Beobachter solche Bedeutungszuweisungen vornehmen, nur sollte er seine so gewonnenen Erkenntnisse nicht als *objektives Wissen* ausgeben; vielmehr hat er sich bewußt zu machen, daß seine Beschreibungen nur relativ zu seinem Beobachterkontext Geltung besitzen. Diese epistemologische Relativität gilt natürlich auch für die von Maturana präferenzierte Methode des Versuchs einer mechanistischen (Re-)Konstruktion des zu erklärenden (biologischen) Phänomens aus dessen systeminternen Komponenten- und Zustandsrelationen heraus. Worauf Maturana insistiert, ist aber, daß die strikte (dabei durchaus beobachterrelative) Unterscheidung »zwischen der Kennzeichnung eines Systems als eines *Systems* einerseits, [und] der Beschreibung des Operierens eines Systems als einer Einheit

³²² H. R. Maturana, *Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie* (autorisierte deutsche Fassung von W. K. Köck in der von S. J. Schmidt und P. Finke hg. Reihe: *Wissenschaftstheorie, Wissenschaft und Philosophie*, Bd. 19), Braunschweig/Wiesbaden 1982, S. 15.

in einem *Medium* (Milieu) andererseits³²³ ein angemesseneres Verständnis des wissenschaftlichen Erklärens ermöglicht als das Festhalten am klassischen Objektivitätsideal. »Eine Sprache also, die mit ›Funktionen‹ oder ›Bedeutungen‹ oder ›Zielen‹ operiert, vereitelt alle Bemühungen um die mechanistische Erklärung eines gegebenen Phänomens, d. h. um seine Erklärung durch einen Mechanismus, der es erzeugt.«³²⁴

Angewandt auf das Problem der Kognition, dem vor allem das Augenmerk des Neuroanatomen Maturana gilt, bedeutet dies: »Angesichts dieser Sachlage mußte ich also für eine Erklärung des Phänomens der Kognition einen Mechanismus konstruieren, durch dessen Operieren ich kognitives Verhalten bzw. kognitive Prozesse erzeugen konnte«; damit stellt sich Kognition nicht mehr »als besondere Verhaltensweise« dar, sondern »als ein Verhalten, in dem ich Kognition erkennen konnte oder aus dem sich Kognition notwendig ergab«.³²⁵

Schaut man sich die frühen Arbeiten Maturanas an, so kann man rückblickend durchaus erkennen, wie sich Maturana konsequent zu diesen Anschauungen vorgearbeitet hat. Dabei bilden traditionelle Fragestellungen der Sinnesphysiologie und Neuroanatomie allemal die empirischen Ausgangspunkte; es werden zwar neue Antworten auf alte Fragen gegeben, doch sind die ›revolutionären‹ Aspekte noch keineswegs ins Auge springend, zumal theoretische Generalisierungen unterbleiben. In diesen Vorarbeiten, die sich über den Zeitraum von 1959 bis 1969 erstrecken, wird immerhin der vielleicht entscheidende Gesichtspunkt der späteren Theorie autopoietischer Systeme - wenn auch im Blick auf ganz konkrete Spezialfälle (etwa die Arbeitsweise der retinalen Farbkodierung) - bereits herausgearbeitet: nämlich die *selbstreferentielle operative Geschlossenheit* biologischer

³²³ H. Maturana, *Erkennen...*, a. a. O., S. 17 f.

³²⁴ Ebenda, S. 16. »Mechanistische Erklärung« meint hier nicht Erklärung im weltanschaulichen Sinne des klassischen Mechanismus: wenn Maturana nach biologischen Erzeugungsmechanismen sucht, dann will er nicht etwa komplexe Lebensphänomene physikalistisch auf einfache Stoß- und Zugprozesse und dergleichen, also auf ein System von Trajektorien bewegter Moleküle reduzieren. Im Gegenteil: In Maturanas Perspektive ist »eine *wissenschaftliche Erklärung* notwendigerweise eine *nichtreduktionistische mechanistische* Re-Produktion des zu erklärenden Phänomens« (ebenda) durch Angabe eines »generativen Mechanismus«.

³²⁵ Ebenda.

(bzw. neuronaler) Systeme. Schon in dem 1959 gemeinsam mit Lettvin, McCulloch und Pitts verfaßten Artikel »What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain«³²⁶ wird die Geschlossenheit und Eigensinnigkeit der neuronalen »Verarbeitung« sensorischer Daten im Froschgehirn herausgestellt: zwischen Froschauge und Froschgehirn laufen spezifische und hochkomplexe Operationen ab, deren Modalitäten keineswegs nur von der physikalischen Reizsituation abhängen; offenbar, so legen die durchgeführten Experimente nahe, »konstruiert« das Nervensystem des Frosches aus den Erregungsmustern der Froschretina eine Wirklichkeit ganz eigener Art. Überdies scheint die strukturelle Organisation des visuellen Feldes (»visual image«) des Frosches das Produkt eines Selbstorganisationsprozesses zu sein (dieser Ausdruck fällt allerdings noch nicht).

In den Jahren von 1966 bis 1968 hat Maturana zusammen mit G. Uribe und S. Frenk zahlreiche experimentelle Untersuchungen zur Farbwahrnehmung durchgeführt. Dabei zeigte es sich, »daß wir weder den Farbenbereich des Menschen noch den der Taube dadurch erzeugen konnten, daß wir *physikalisch* definierte Farben mit den Aktivitätsbereichen retinaler Ganglienzellen korrelierten. Wir entdeckten aber, daß wir durch die Korrelierung der *Farbbezeichnungen* mit den Aktivitätsbereichen retinaler Ganglienzellen im Prinzip den gesamten Farbenraum des Menschen erzeugen konnten«. Damit hatten die Forscher für einen bestimmten kognitiven Vorgang einen generativen Mechanismus gefunden.

Bereits unter dem Einfluß der am BCL entwickelten Ideen steht die letzte größere Arbeit Maturanas zur retinalen Farbkodierung, die er zusammen mit G. Uribe und S. Frenk verfaßt: »A Biological Theory of Relativistic Colour Coding in the Primate Retina«.³²⁷ Hier wird mit Experimenten belegt, »daß die Aktivitäten der Nervenzellen keine vom Lebewesen unabhängige Umwelt spiegeln und folglich auch nicht die Konstruktion einer absolut existierenden Außenwelt ermöglichen. Sie bilden lediglich einen Rahmen von Relationen, in dem das Lebewesen sich mit Bezug auf seine eigene Organisation selbst repräsentiert.« Daß alle vermeintliche »Repräsentation« von Außenwelt im Grunde immer

³²⁶ In: *Proceedings of the IRE* (Institute of Radio Engineers), Jg. 47, Nr. 11, New York 1959, S. 1940 ff.

³²⁷ In: *Archivos de Biología y Medicina Experimentales*, Suplemento No. 1, Santiago (Chile) 1968, S. 1 ff.; dt. in: H. Maturana, *Erkennen...*, a. a. O., S. 88 ff.

nur eine besondere Form der Selbstrepräsentation eines kognitiven Systems ist, ist eine der zentralen Prämissen des später sogenannten Programms des »Radikalen Konstruktivismus«.

Zwar ist noch davon die Rede, daß die Retina eines Lebewesens Informationen *aus* der Umwelt beziehe, doch wird dies sogleich relativiert durch den Hinweis, daß es die Retina sei, die den Kontext der Informationsaufnahme und -bewertung festlegt: »Da die Retina in der von uns angenommenen Weise organisiert ist, holt sie nicht nur in selektiver Weise durch ihre Interaktionen mit der Umwelt Information ein, sondern definiert auch den Kontext, mit Bezug auf welchen die verschiedenen angetroffenen physikalischen Parameter Bedeutung haben. Die Retina ist folglich nicht lediglich ein Instrument zur Schaffung visuellen Wissens, sondern definiert auch den Bereich des durch sie einholbaren möglichen Wissens.«³²⁸

Spätestens Ende der 1960er Jahre war die wohl wichtigste Voraussetzung für die Ausbildung der Autopoiesetheorie formuliert: »Meine Untersuchungen zur Farbwahrnehmung führten zu einer für mich außergewöhnlich wichtigen Entdeckung: Das Nervensystem operiert als ein geschlossenes Netzwerk von Interaktionen, in dem jede Veränderung der interaktiven Relationen zwischen bestimmten seiner Bestandteile stets zu einer Änderung der interaktiven Relationen zwischen denselben oder anderen Bestandteilen führt. Dies folgte aus der Entdeckung, daß ich durch die Korrelierung von Relationen zwischen Aktivitäten von Ganglienzellen und Farbbezeichnungen das Nervensystem in der Tat als geschlossenes Netzwerk behandelte, das ausschließlich über Relationen operierte, die von seiner Struktur festgelegt waren.«³²⁹ Aus der Geschlossenheit neuronaler Prozesse folgt somit das Prinzip der »Strukturdeterminiertheit« aller neuronalen Ereignisse. Daraus folgt weiterhin, »daß es für ein geschlossenes System kein Innen und Außen gibt, und daß ich jede Sehweise, Sprache oder Beschreibung aufzugeben hatte, die das Nervensystem so

³²⁸ Ebenda, S. 136 f. »Konstruktivistisch« formuliert bedeutet dies: »Das Lebewesen erzeugt dadurch Sinn, und durch seine Schaffung von Sinn erzeugt es Realität.« (S. 137)

³²⁹ H. Maturana, *Erkennen...*, a. a. O., S. 18 f.

darstellten, als ob es bei der Erzeugung des Verhaltens eines Organismus mit Repräsentationen einer Umwelt operierte«.³³⁰

Die Aufgabe des klassischen Repräsentationsmodells führt zu weiteren Konsequenzen: wird das Nervensystem nämlich als »strukturdeterminiertes Netzwerk« definiert, das sich über Selbstkontakte selbst organisiert und reguliert, so muß es auch in informationaler Hinsicht als geschlossen oder autonom gelten: »Das Gehirn errechnet keine Verhaltensweise aus >Information<, die durch die Sensoren aus der Umwelt >eingeholt< wird.«³³¹ Das Gehirn ist operational und *informational* geschlossen. Da es keine Außenwelt »abbildet« (repräsentiert), verarbeitet es auch keine Umweltinformationen, sondern erzeugt es immer nur (neue) netzwerkinterne Relationen bzw. Relationen von Relationen zwischen neuronalen Zuständen. An die Stelle des Repräsentationsbegriffs tritt bei Maturana deshalb der Begriff der »strukturellen Koppelung«: die Umwelt wirkt lediglich in Form von Störeinflüssen (Reizen) auf den Organismus bzw. sein Nervensystem ein, während die Selektion dieser Störeinflüsse und ihre >Interpretation< (Deutung und Bewertung) vollkommen systeminterne Vorgänge sind.³³² Das Überleben des Systems (des Organismus) wird allerdings davon abhängen, ob das neuronal instruierte Verhalten zu mit der Umwelt kompatiblen Interaktionen führt, d. h. ob es zur Struktur der Umwelt strukturell »paßt<. Angepaßtheit des Verhaltens oder biologische Fitness bedeutet folglich nicht die kontinuierliche erfolgreiche Rezeption und Verarbeitung von Umweltinformation, sondern eine systemimmanente Produktion von Information aus externen Störeinwirkungen, wobei sich die spezifische Struktur dieses Erzeugungsprozesses aus zahlreichen System-Umwelt-Interaktionen (phylo- und ontogenetisch) herauskristallisiert und so »eingespielt< hat³³³, daß sie sich als für ein Überleben des Organismus hinreichend kongruent mit der

³³⁰ Ebenda, S. 19.

³³¹ Ebenda, S. 25.

³³² Diese Formulierung erinnert stark an von Foersters »order from noise«-Prinzip.

³³³ »Die Geschichte der strukturellen Koppelung eines Organismus und seines Nervensystems an ein Medium ist daher eine Geschichte von Interaktionen, in deren Verlauf eine Struktur durch operationale Relationen moduliert wird, die einem Beobachter als Verhalten erscheinen, die jedoch ausschließlich strukturell bedingt und realisiert sind...« (Maturana, *Erkennen...*, a. a. O., S. 21).

Struktur des Mediums erweist (Kriterium dieser Kongruenz ist dabei die Überlebensfähigkeit: was überlebt, überlebt, ist also hinreichend »angepaßt« an die Lebensbedingungen der Umwelt).

Mit Maturanas neuer Sicht des Nervensystems fällt beispielsweise die herkömmliche Unterscheidung zwischen »höheren« (mental, sprachlich etc.) und »niedrigeren« nervösen Zentren bzw. Funktionen: statt dessen gibt es »nur unterschiedliche Schichten rekurrenter Korrelationen von Korrelationen neuronaler Interaktionen, die einem Organismus unterschiedliche Bereiche struktureller Koppelung eröffnen, die sich für den Beobachter in entsprechenden Verhaltensdifferenzierungen ausdrücken.« Die Vorstellung vom hierarchischen Aufbau des Gehirns wird obsolet, wenn nicht länger davon ausgegangen wird, daß das Gehirn »mit Repräsentationen operiert und folglich Zustände bewältigen muß, deren Komplexität von der Außenwelt bedingt ist«.³³⁴

Damit haben wir den Gedankenweg Maturanas im groben skizziert: einerseits aus der entschiedenen Absicht, die Suche nach »generativen Mechanismen« an die Stelle funktionaler oder teleonomer Beschreibungen biologischer Phänomene zu setzen, und andererseits aus der Idee der strikten Geschlossenheit neuronaler Prozesse (ihrer »Strukturdeterminiertheit«) resultierte

- (a) die Erkenntnis, daß die Außen-Innen-Differenzierung (des Organismus in seinem Medium) eine beobachterabhängige Beschreibung ist, und
- (b) die Notwendigkeit, anstatt von einer Anpassung des Organismus an die Umwelt (durch die adäquate Verarbeitung von Umweltinformationen) von einer »strukturellen Koppelung« zwischen einem informationell geschlossenen Lebewesen und seinem Milieu zu sprechen.

Maturana hatte jetzt (Ende der 1960er Jahre) alle wesentlichen Ideen beisammen, die er für seine Theorie der »Autopoiese« benötigte, auch wenn dieser Ausdruck erst 1974 eingeführt werden sollte.

1970 präsentierte Maturana seine neuen Vorstellungen einem breiteren Fachpublikum in Form von zwei Arbeiten - beide während seiner Zeit am BCL entstanden -, von denen wir

³³⁴ Ebenda, S. 23 f.

die zuerst verfaßte (»this was indeed the first article«³³⁵) hier kurz vorstellen möchten: Der Artikel »Neurophysiology of Cognition« erschien in einem Sammelband, in dem auch Beiträge von G. Pask und H. von Foerster enthalten sind.³³⁶ In dieser Arbeit radikalisiert Maturana zum einen den Kognitionsbegriff und dehnt er zum andern die Vorstellung von der zirkulären Geschlossenheit des Nervensystems auf den Gesamtorganismus aus, womit er im Prinzip den Grundgedanken der Autopoiese formuliert.

Nachdem er kurz die epistemologische Rolle des Beobachters - wie oben dargelegt - erörtert hat³³⁷, liefert er eine Charakterisierung lebender Systeme, die in nuce das Autopoiesekonzept formuliert: »Living systems as they exist on the earth today are characterized by exergonic metabolism, growth, and replication (and reproduction), all organized in a closed causal circular process that allows for evolutionary changes in the way the circularity is maintained, but not for loss of the circularity.«³³⁸ ... This circular organization determines that the components that specify it be those whose synthesis it secures. ... This circular organization is the living organization.« Zirkularität wird hierbei ausdrücklich als *Selbstreferentialität* verstanden: »Due to the circular nature of its organization, a living system has a self-referring domain of interactions (self-referring system)«.³³⁹ Des weiteren garantiert die kreiskausale Organisation lebender Systeme die

³³⁵ Interview mit H. Maturana, a. a. O.; »it was the first paper I wrote ... in which I accept the living system as a globe system of productions of components.«

³³⁶ In: P. Garvin (Hg.), *Cognition - A Multiple View*, New York/ Washington 1970, S. 3 ff. - Die andere wichtige Arbeit Maturanas, die 1970 als BCL-Report Nr. 9.0 erscheint, heißt *Biology of Cognition*, Urbana/Ill. (dt. unter dem Titel »Biologie der Kognition«, in: H. Maturana, *Erkennen...*, a. a. O., S. 32 ff.).

³³⁷ »Anything said is said by an observer«, was bedeutet: »Any understanding of the cognitive process must account for the observer and his role in it.« (Ebenda, S. 4)

³³⁸ Später wird dies in die terminologische Unterscheidung von »Organisation« und »Struktur« eingehen: die Identität eines Lebewesens als eines *Lebewesens* bleibt so lange erhalten, wie die Zirkularität seiner Organisation aufrechterhalten wird; was hingegen evolutionär wechseln kann, sind die jeweils spezifischen Strukturen, die den kreiskausalen Lebensprozessen ihre jeweilige (artspezifische) Form verleihen. »All the peculiar characteristics of the different kinds of organisms are superimposed on this basic circularity and are subservient to it, securing its continuance through successive interactions in an always changing environment.« (Ebenda, S. 5)

³³⁹ Ebenda, S. 5.

Kontinuität, d. h. Stabilität der Systemprozesse: »that a necessary interaction that took place once will take place again. ... This makes living systems inferential systems, and their domain of interactions a cognitive domain«.

Hieraus ergibt sich nun ein völlig neuer Kognitionsbegriff: der Vorgang der Kognition wird nicht länger an mentale Prozesse und Zustände, ja nicht einmal mehr an das Vorhandensein eines Nervensystems geknüpft, sondern mit dem Vollzug der Lebensprozesse als solcher ineins gesetzt: »Living systems are cognitive systems, and living, as a process, is a process of cognition. This statement is valid for all organisms, with and without a nervous system.«³⁴⁰ Leben bedeutet Erkennen und vice versa. Allerdings erweitert die Existenz eines Nervensystems den Spielraum der Interaktionen eines Lebewesens, indem es Veränderungen von Systemzuständen allein über Modifikationen systeminterner Zustandsrelationen gestattet. »The nervous system enlarges the domain of interactions of the organism by making the internal states of the living systems also modifiable in a relevant manner by *pure relations*, and not only by physical events. ... The nervous system expands the cognitive domain of the living system by making it possible for it to interact with *pure relations*; it does not create cognition.«³⁴¹ Das Nervensystem erlaubt einem Organismus Interaktionen mit seinen eigenen Zuständen.

Dabei ist zu beachten, daß das Nervensystem, trotz seiner operationalen Geschlossenheit als eines Netzwerks neuronaler Zustandsrelationen, der zirkulären Geschlossenheit des Gesamtorganismus als eines metabolischen Systems funktional untergeordnet ist. Auch in kognitiver Hinsicht verhält sich das Nervensystem zum Organismus als ein Sekundärsystem, das dessen kognitive Potenz steigert: Organismen mit Nervensystemen sind »generating the apparent paradox of including in their cognitive domain their cognitive domain. In us, this paradox is resolved by what we call abstract thinking (a new cognitive domain).« Dies hat zwei wichtige Konsequenzen: (1.) indem wir zu Selbstbeobachtern werden, »we recursively generate representations of our interactions«, und (2.) indem wir ein Bewußtsein unserer selbst entwickeln, »we make descriptions of ourselves (that is representations)«; diese Selbstbeschreibungen können sodann wieder Gegenstand weiterer

³⁴⁰ Ebenda, S. 8.

³⁴¹ Ebenda.

Beschreibungen werden - »in an indefinite recursive process«.³⁴² Die selbstreferentielle Geschlossenheit der neuronalen Operationen und deren rekursive Fortsetzbarkeit (Beschreibung der Beschreibung) sind die zentralen Merkmale »höherer« kognitiver Prozesse und bilden zugleich die Voraussetzung für weitere kognitive Evolution. Aber bereits die organisatorische (autopoietische) Geschlossenheit der einfachsten Lebewesen stattet diese mit »primitiven« kognitiven Fähigkeiten (z. B. Selektivität gegenüber Störungen von außen) aus.

Schließlich entwickelt Maturana seine Vorstellungen hinsichtlich der Möglichkeiten, wie »an organism can modify the behavior of another organism«: entweder geschieht dies über vorgeregelte Verhaltensmuster (»i. e. courtship«: »a chain of interlocked behavior can thus be produced between the two organisms«) oder auf dem Wege eines Orientierungsverhaltens (»by orienting the behavior of the other organism«): im zweiten Falle haben wir es mit echter Kommunikation zu tun, deren Gelingen jedoch davon abhängt, daß »the domains of interactions of the two organisms are widely coincident«.³⁴³ Diese Koinzidenzbedingung wird Maturana später unter dem Begriff des »konsensuellen Feldes« bzw. der »strukturellen Koppelung« zwischen Organismen behandeln. Daß nun eine derartige Koinzidenz in einem konkreten Fall von Kommunikation faktisch vorliegt, ist allerdings eine Aussage, die nur innerhalb der kognitiven Domäne eines *Beobachters* getroffen werden und daher auch nur für diesen Gültigkeit beanspruchen kann. An dieser Stelle müssen wir es uns versagen, auf die Details der Maturanaschen Sprach- und Kommunikationstheorie näher einzugehen.

Auch die später berühmte Unterscheidung zwischen »autopoietischen« und »allopoietischen Maschinen« wird dem Sinne nach bereits in einer Schlußbemerkung zur »artificial intelligence« eingeführt: »Machines differ from living systems not in the principles used for their function, but in their reference. The organization of machines is such that they always have an alloreferential domain of interactions, that is, the relevance of their

³⁴² Ebenda, S. 8f. Die Entstehung der systeminternen - und bewußten - Repräsentation einer Innen-Außen-Differenz (»Ich«-»Nicht-Ich«) denkt sich Maturana als Ursprung des abstrakten Denkens: »A nervous system that is capable of treating its internally generated states as it treats its externally generated states (that is, distinguishing their origin) is capable of abstract thinking.« (Ebenda, S. 15)

³⁴³ Ebenda, S. 16.

functioning is determined by how they satisfy the desires of their maker. Living systems, on the contrary, as a result of their basic circular organization, necessarily have a self-referential domain of interactions; that is, the relevance of their functioning is determined by how it permits the maintenance of their basic circularity. If we consider the ordinary machines as alloreferential machines, we can consider the living systems as self-referential machines.«³⁴⁴ - In größerer Ausführlichkeit, doch ohne substantielle Veränderungen, hat Maturana seine neuen Ideen noch in demselben Jahr (1970) in *Biology of Cognition* ausgeführt.³⁴⁵

Obgleich damit der Sache nach alle wichtigen Bestimmungsstücke der Autopoiesetheorie beisammen waren, sollte es bis 1974 dauern, bis die erste Arbeit erschien, die den Ausdruck »Autopoiesis« im Titel führt: »Autopoiesis: The Organization of Living Systems, its Characterization and a Model«.³⁴⁶ Zunächst wird die Einheit der »autopoietischen Organisation« eines Lebewesens »definiert durch ein Netzwerk der Produktion von Bestandteilen, die 1. rekursiv an demselben Netzwerk der Produktion von Bestandteilen mitwirken, das auch diese Bestandteile produziert, und die 2. das Netzwerk der Produktion als eine Einheit in dem Raum verwirklichen, in dem die Bestandteile sich befinden«.³⁴⁷ Letztlich ist es also die Rekursivität der Prozeßstruktur, über die die wechselseitige Produktion der Komponenten eines Organismus zu einer Einheit verknüpft und damit die Autonomie des Lebewesens erzeugt und gewährleistet wird.

³⁴⁴ Ebenda, S. 21.

³⁴⁵ A. a. O.

³⁴⁶ Zusammen mit F. J. Varela und R. Uribe, in: *Bio-Systems*, 5, 1974, S. 187 ff. (dt. unter dem Titel »Autopoiese: Die Organisation lebender Systeme, ihre nähere Bestimmung und ein Modell«, in: H. Maturana, *Erkennen ...*, a. a. O., S. 157 ff.).

³⁴⁷ H. Maturana et al., »Autopoiese: die Organisation lebender Systeme, ...«, a. a. O., S. 158. Die Autoren illustrieren dies am Beispiel einer Zelle: »Eine Zelle ist ein Netzwerk chemischer Reaktionen, die Moleküle derart erzeugen, daß sie 1. durch ihre Interaktionen genau das Netzwerk an Reaktionen erzeugen bzw. an ihm rekursiv mitwirken, welches sie selbst erzeugte, und 2. die Zelle als eine materielle Einheit verwirklichen.« Wohl nicht zu unrecht wird man durch diese Darstellung an M. Eigens Hyperzyklus-Modell erinnert: »autokatalytische Hyperzyklen« können als spezifische »autopoietische Maschinen« gelten.

Nicht etwa Fortpflanzungsfähigkeit, sondern Autopoiese ist das entscheidende Kennzeichen lebender Systeme. Leben unterscheidet sich von Nicht-Leben durch die Besonderheit seiner Organisation. Die besonderen Eigenschaften dieser Organisation ergeben sich dabei nicht aus den Eigenschaften seiner Bestandteile: »Die Eigenschaften der Bestandteile eines autopoietischen Systems determinieren *nicht* seine Eigenschaften als Einheit«, dessen Eigenschaften sind vielmehr »die Eigenschaften des *Netzwerks*, das durch seine Bestandteile geschaffen wird und seinerseits diese Bestandteile schafft.«³⁴⁸ Die autopoietische Verknüpfung der Bestandteile zur Einheit eines Organismus geschieht durch spontane Selbstorganisation, ist also ein Produkt der Interaktion zahlreicher Substrate, die eben dadurch zu Bestandteilen, Komponenten oder Elementen des Organismus werden: »Ein autopoietisches System entsteht spontan aus der Interaktion von ansonsten unabhängigen Elementen, sobald diese Interaktionen ein räumlich benachbartes Netzwerk von Erzeugungsprozessen konstituieren, das sich im Raum seiner Elemente als Einheit manifestiert.«³⁴⁹ Dieses selbsterzeugte Geflecht oder Netzwerk aus Element-Relationen kann sodann die für Lebewesen typischen Fähigkeiten der Selbsterhaltung, -reproduktion und -vermehrung entwickeln und die daraus resultierende Population im Gefolge von Mutationen eine wechselvolle Evolution durchlaufen. Der Strom des Lebens wird dabei so lange nicht abreißen, wie die Organisationsform der Autopoiese aufrechterhalten bleibt, mögen sich die Organismen in struktureller Hinsicht auch noch so sehr im Laufe der Evolution verändern.

Besonders in Zusammenarbeit mit F. J. Varela, seinem Schüler, hat Maturana in den Folgejahren die Theorie der Autopoiese weiterentwickelt.³⁵⁰ Der Chilene Francisco J.

³⁴⁸ Ebenda, S. 164.

³⁴⁹ Ebenda. Modellhaft wird (S. 160 ff.) die spontane Erzeugung einer autopoietischen Einheit an einer Computersimulation veranschaulicht, bei der sich zahlreiche »Substrate« mit spezifischen Eigenschaften unter der Einwirkung von »Katalysatoren« zu »Bindegliedern« interaktiv verknüpfen (je zwei Substrate zu einem »Bindeglied«): diese »Bindeglieder« bilden sodann die eigentlichen Bestandteile der zu erzeugenden autopoietischen Einheit, indem sie sich ihrerseits untereinander verketteten. Die Computerdurchläufe zeigen sehr plastisch in den verschiedenen Phasen den Aufbau, den Verfall und die Wiederherstellung solcher autopoietischer Einheiten.

³⁵⁰ Siehe etwa H. Maturana und F.J. Varela, *Autopoietic Systems. A Characterization of the Living Organization*, Urbana/Ill. 1975 (dt. unter dem Titel »Autopoietische Sys-

Varela, geboren 1946, hatte ebenfalls Medizin und Naturwissenschaften an der Universität von Chile in Santiago studiert. 1968 ermöglicht ihm ein Stipendium einen Studienaufenthalt an der Harvard-Universität, 1970 wird er in Biologie promoviert. Anschließend führt ihn seine Lehr- und Forschungstätigkeit an die Universitäten von Chile, Costa Rica und an die Medizinischen Fakultäten der Universitäten von Colorado und New York. Derzeit ist er Professor an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität von Chile und gleichzeitig an der Universität von New York. Seine zahlreichen Arbeiten beziehen sich vorwiegend auf neurobiologische, mathematisch-kybernetische und wissenschaftstheoretische Fragen; als sein bisheriges Hauptwerk kann wohl *Principles of Biological Autonomy* gelten³⁵¹, das auf der Autopoiese-Theorie aufbaut. Den Zusammenhang von Autonomie und Selbstbezüglichkeit hat er in Form eines logischen Kalküls zu beschreiben versucht.³⁵² Varela war, wie gesagt, ebenso wie Maturana eine Zeitlang Gastforscher am BCL.

Als sein hauptsächliches Forschungsinteresse betrachtet Varela es, »to look for specific mechanisms which can give us an understanding of how cognition or knowledge is possible in living systems«.³⁵³ Die Suche nach derartigen Mechanismen erfolgte zunächst - wie wir gesehen haben - auf dem Wege sinnesphysiologischer und -neurologischer Studien (»how do animals and men see colour«); »studies of neural networks« schlossen sich an, um zu einer Erklärung biologischer Kognition zu gelangen (»I mix biology with epistemology, with applied mathematics«). Varelas Arbeiten laufen zunächst parallel zu denen Maturanas, brauchen hier also nicht im einzelnen besprochen zu werden. Varelas

teme. Eine Bestimmung der lebendigen Organisation«, in: H. Maturana, *Erkennen...*, a. a. O., S. 170 ff.); die Hauptarbeit bildet wohl das Gemeinschaftswerk *Autopoiesis and Cognition: The realization of the living*, erschienen in den *Boston Studies in the philosophy of science*, Boston 1980. - Die erste gemeinsame Arbeit der beiden Forscher war noch ganz empirischer Natur: »Time courses of excitation and inhibition«, in: *Exp. Neurol.*, 26, 1970, S. 53 ff.

³⁵¹ New York 1979.

³⁵² F. J. Varela, »A calculus for self-reference«, in: *Int. J. Gen. Systems*, 2, 1975, S. 5 ff.

³⁵³ F. J. Varela, aus einem Interview, das G. Küppers und W. Krohn 1988 mit ihm in Paris geführt haben; unveröffentl. Tonbandabschrift, Universität Bielefeld. Diesem Interview entstammen alle folgenden Zitate.

Untersuchungen zur Entstehung (und Organisation) biologischer Systeme (Autopoiese) und deren emergenter Eigenschaften (»the central intuition of selforganizing systems«) münden in die Begründung eines »Konnektionismus«, der besonders von den Eigenschaften neuronaler Netzwerke inspiriert ist. Varela möchte zwar Autopoiese (eine konservative Prozeßorganisation) nicht mit Selbstorganisation (der Entstehung von Ordnung aus Ungleichgewichtsprozessen) gleichgesetzt sehen, gibt aber Zusammenhänge zwischen beiden zu.³⁵⁴ Er konzidiert einen gewissen Einfluß Heinz von Foersters auf die Formulierung des Autopoiesegedankens und parallelisiert dessen Ideen zur kybernetischen Zirkularität mit denen der autopoietischen Organisation.

Zum Beschluß seien noch einmal die wesentlichen Bestimmungstücke der autopoietischen Theorie von Maturana und Varela in den Worten von S. J. Schmidt zusammengefaßt:

- Autopoiese bezeichnet die Art der Organisation materialer und prozessualer Komponenten, die in lebenden Organismen angetroffen werden. Das hervorstechende Merkmal der Verknüpfung dieser Komponenten ist ihre Zirkularität.
- Autopoietische Systeme weisen eine Struktur auf, in der sich ihre autopoietische Organisation ausdrückt.
- Autopoietische Systeme sind organisationell geschlossen und in dieser Hinsicht autonom. Alle Informationen, die das System für die Aufrechterhaltung seiner zirkulären Organisation braucht, liegen in dieser Organisation selbst. Das System ist operational geschlossen, seine Operationen hängen von dem jeweiligen Zustand vor jeder Operation ab; in diesem Sinne sind autopoietische Systeme struktur- bzw. zustandsdeterminiert.
- Autopoietische Systeme sind selbstreferentiell, d.h. sie beziehen sich im Prozeß der Aufrechterhaltung ihrer Organisation ausschließlich auf sich selbst. Die funktionale Organisation selbst-herstellender Systeme wird erklärt als zyklische, selbstreferentielle Verknüpfung selbstorganisationeller Prozesse (...).
- Autopoietische Systeme sind mit dem Medium, in dem sie existieren, sowie mit anderen Organismen strukturell gekoppelt.
- Autopoietische Systeme operieren induktiv und konservativ.

³⁵⁴ »I can describe my activity which is completely independent on self-organization; or I can say what I do relates to self-organization in this and this way.«

- Nervensysteme, die sich im Verlauf der Evolution autopoietischer Systeme entwickelt haben, sind (z. B. auch beim Menschen) funktional geschlossen. Die einzige Aufgabe des Nervensystems liegt in der Synthese von Verhalten. (...) Daraus folgt, daß ein Organismus seine Welt aufgrund seiner physiologischen und funktionellen Beschaffenheit erzeugt. Die ihm zugängliche Welt ist mithin seine kognitive Welt, nicht eine Welt »so, wie sie ist«.³⁵⁵

Indem die Autopoiesetheorie die Organisation von Lebewesen mit deren kognitiven Fähigkeiten unauflöslich verbindet, wird sie zur Grundlage einer konstruktivistischen (neuro-)biologischen Erkenntnistheorie.

2.7 »Elastische« Ökosysteme

Eine weitere Wurzel der Selbstorganisationsforschung liefert die moderne Ökologie. Seit Mitte der 1960er Jahre dieses Jahrhunderts kommt es auch hier durch das Konzept der Koevolution (P. Ehrlich), die Theorie offener Systeme (L. v. Bertalanffy) und die Untersuchungen zur Stabilität von Ökosystemen jenseits des Gleichgewichts (C. S. Holling) zu neuen Modellvorstellungen.

Ökosysteme entstehen als weitverzweigte Verknüpfungen zahlreicher heterogener Komponenten: physikalische, geologische, meteorologische und chemische Faktoren tragen zu ihrer Konstitution ebenso bei wie die in ihnen beheimateten Lebewesen (Einzeller, Organismen, überindividuelle Lebensgemeinschaften) und nichtlebende biologische Komponenten wie etwa Abfallprodukte (im Falle von Humanökosystemen kommen noch soziale, kulturelle und psychische Determinanten hinzu); alle diese

³⁵⁵ S. J. Schmidt, »Der Radikale Konstruktivismus: Ein neues Paradigma im interdisziplinären Diskurs«, in: ders. (Hg.), *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*, a. a. O., S. 25 f. Schmidt beschließt seine Zusammenfassung mit dem prägnanten Maturana-Zitat: »Wir erzeugen daher buchstäblich die Welt, in der wir leben, indem wir sie leben« (H. Maturana, *Erkennen...*, a. a. O., S. 269).

Parameter und Elemente wechselwirken auf komplizierte Weise miteinander und erzeugen so das jeweilige Ökosystem.³⁵⁶

Bereits L. von Bertalanffy hatte Ökosysteme als thermodynamisch offene Systeme charakterisiert, die beständig Materie und Energie importieren bzw. exportieren, wobei die Sonne die wichtigste Energiequelle darstellt. Ihre Ordnung halten sie über »Fließgleichgewichte« aufrecht.³⁵⁷ Für solche offenen Ökosysteme gelten Ch. Schützes vier »Gesetze der Ökodynamik«: natürliche Systeme streben (1.) nach Strukturhaltung, (2.) nach Stabilität, (3.) versuchen sie, den Vorrang des Ganzen vor den Teilen zu bewahren und (4.) steuern sie sich selbst.³⁵⁸ Als offene Systeme sind Ökosysteme dynamische Systeme, die zu Wachstum, Gestaltung und Komplexitätszunahme befähigt sind; auf dem Wege der »ökologischen Sukzession«³⁵⁹ sind Ökosysteme in der Lage, ihre Umwelt zu gestalten und dadurch die Bedingungen ihrer Entwicklung in Grenzen selbst zu bestimmen.

R. Margalef hat 1968 diese Fähigkeit ökologischer Systeme zur Selbstdetermination als Vermögen zur »Informationsakkumulation« beschrieben: Information wird akkumuliert, indem Ökosysteme durch Spezifikation die Artenvielfalt erhöhen, die Lebensprozesse differenzieren (Bildung ökologischer Nischen) und entsprechend die Komplexität der Komponentenbeziehungen steigern; eine vermehrte Eigenkomplexität führt aber zu größerer Autonomie (Widerstandsfähigkeit) gegenüber Umwelteinflüssen.³⁶⁰ Margalefs Überlegungen bilden eine wichtige Voraussetzung für die Etablierung einer ökologischen Selbstorganisationsforschung.

³⁵⁶ »Selbst in den einfachsten ungestörten Ökosystemen sind Zahl und Vielfalt der Organismen und die komplizierten gegenseitigen Beziehungen verwirrend«, schreibt E. P. Odum in seinen *Grundlagen der Ökologie*, 2. Bde., Stuttgart 1983, S. 26.

³⁵⁷ Siehe vor allem L. von Bertalanffy, *General System Theory*, New York 1968.

³⁵⁸ Ch. Schütze, »Energie, Entropie. Das Weltgesetz vom Niedergang«, in: *Natur*, 5, 1985, S. 43 ff.

³⁵⁹ Nach E. P. Odum resultiert die »ökologische Sukzession« »aus der Veränderung der physikalischen Umwelt durch die Gemeinschaft, d. h. die Sukzession wird durch die Gemeinschaft selbst bewirkt, selbst wenn die physikalische Umwelt Muster und Veränderungsrate bestimmt und oft der Entwicklung Grenzen setzt. (*Grundlagen der Ökologie*, a. a. O., S. 405)

³⁶⁰ R. Margalef, *Perspectives in Ecological Theory*, Chicago, 1968.

Einen weiteren Schritt dorthin markiert das Konzept der Koevolution.³⁶¹ Es basiert darauf, daß Ökosysteme untereinander über Materie- und Energieflüsse sowie Kommunikation in Wechselwirkung stehen, d. h. strukturell gekoppelt sind. Benachbarte Ökosysteme und ökologische Nischen entwickeln sich in vernetzter Abhängigkeit voneinander, eben »koevolutiv«: Änderungen eines Systems stimulieren Änderungen in benachbarten Systemen (das gilt auch für mutagene Veränderungen bei solchen Arten in einem Ökosystem, die in einer Jäger-Beute-Beziehung stehen³⁶²); koevolutionäre Prozesse zeigen im ganzen ein »ultrazyklisches« Verhalten³⁶³; über koevolute Kommunikation wird die Komplexität von Ökosystemen sukzessive gesteigert und die morphogenetische Variabilität der Arten erhöht.

Anfang der 1970er Jahre entwickelten Jim E. Lovelock und Lynn Margulis ihre sogenannte »Gaia-Hypothese«³⁶⁴, derzufolge die gesamte Biosphäre der Erde zusammen mit ihrer Atmosphäre ein evolutionsfähiges System bildet, das sich selbst organisiert und

³⁶¹ Im Impressum der Zeitschrift *CoEvolution* wird der Ursprung des Ausdrucks »Koevolution« auf die amerikanischen Biologen P. Ehrlich und P. Raven zurückgeführt; s. P. R. Ehrlich und P. H. Raven, »Butterflies and plants: A study in coevolution«, in: *Evolution*, 18, 1965, S. 586 ff.

³⁶² Eine prägnante Definition von »Ko-Evolution« findet sich im Glossar zu G. Bateson, *Geist und Natur*, a. a. O., S. 274: »Ein stochastisches System der evolutionären Veränderung, in dem zwei oder mehr Spezies so aufeinander einwirken, daß Veränderungen in der Spezies A die Stufe für die natürliche Selektion von Veränderungen in der Spezies B setzen. Spätere Veränderungen in der Spezies B setzen wiederum die Stufe für die Selektion von weiteren ähnlichen Veränderungen in der Spezies A.« Der hier beschriebene Vorgang ähnelt der »Abweichungsverstärkung« bei Maruyama.

³⁶³ Siehe die Beschreibung solcher Prozesse bei Th. T. Ballmer und E. von Weizsäcker, »Biogenese und Selbstorganisation«, in: E. von Weizsäcker (Hg.), *Offene Systeme I: Beiträge zur Zeitstruktur von Information, Entropie und Evolution*, Stuttgart 1974.

³⁶⁴ Siehe J. E. Lovelock, »Gaia as seen through the atmosphere«, in: *Atmospheric Environment*, 6, 1972, S. 579 ff.; J. E. Lovelock und L. Margulis, »Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis«, in: *Tellus*, 26, 1973, S. 2 ff.; L. Margulis und J. E. Lovelock, »Biological modulation of the Earth' atmosphere«, in: *Icarus*, 21, 1974, S. 471 ff.; J. E. Lovelock und S. R. Epton, »The Quest for Gaia«, in: *New Scientist*, 6. Feb. 1975; sowie die neuere populärwissenschaftliche Darstellung in J. E. Lovelock, *Unsere Erde wird überleben. Gaia - Eine optimistische Ökologie*, München 1982.

reguliert. Die Atmosphäre werde ständig von zahlreichen biogenen Gasen (Sauerstoff, Kohlendioxid usw.) durchströmt und dadurch in einem hohen chemischen Ungleichgewicht gehalten; außerdem wirke sie wie ein Puffersystem, in dem Wärme gespeichert und die Abstrahlung so geregelt wird, daß keine extremen - und für das irdische Leben gefährlichen - Temperaturdifferenzen entstehen. Die gegenwärtigen komplexen Beziehungen zwischen Bio- und Atmosphäre seien das Resultat eines langen koevolutionären Prozesses, in dem zahllose mikro- und makroskopische Faktoren physikalischer, chemischer und biologischer Art zusammenwirken. Das Leben hat sich während seiner Evolution genau die atmosphärischen Bedingungen geschaffen, die seinen Fortbestand garantieren (z. B. ist der Sauerstoffgehalt der Luft biogenen Ursprungs); keineswegs habe sich das Leben nur einseitig an vorgefundene atmosphärische Umweltbedingungen angepaßt, wie der klassische Darwinismus postuliere, sondern zur Ausgestaltung dieser Bedingungen wesentlich beigetragen. Im ganzen ergebe sich ein Wechselspiel, das alle Merkmale eines Selbstorganisationsprozesses zeige.³⁶⁵

Gegenüber »klassischen« (homoöstatischen) Beschreibungen, in denen Ökosysteme primär unter Stabilitätsgesichtspunkten betrachtet werden, heben auch die systemtheoretischen Arbeiten des Ökologen C. S. Holling auf die Selbstorganisations-Dynamik solcher Systeme ab. 1973 führte er die wichtige Unterscheidung zwischen »stability« und »resilience« ein, um ein besseres Verständnis der dynamischen Prozesse in Ökosystemen erlangen zu können. Damit wird erstmals eine Ungleichgewichts-Ökologie systematisch begründet. Er ging von der Beobachtung aus, daß bei kritischen Störungen die Stabilität eines Ökosystems nicht mehr gewährleistet ist: »If the variability changes, the balance shifts.«³⁶⁶ Lokale Fluktuationen, die der Eigendynamik des Ökosystems entspringen, verhindern das Erreichen eines absoluten Gleichgewichtszustands, ermöglichen dem System aber zugleich eine globale Selbstregulation. Umgekehrt: je mehr sich ein Ökosys-

³⁶⁵ Nach E. Jantsch läßt sich die Gaia-Hypothese im Anschluß an Maturana auch dahingehend deuten, daß das globale Selbstregelsystem von Bio- und Atmosphäre ein riesiges autopoietisches System bildet; vgl. E. Jantsch, *Die Selbstorganisation des Universums*, München/Wien 1979, S. 168 ff.

³⁶⁶ C. S. Holling, »Resilience and Stability of Ecological Systems«, in: *Ann. Rev. Ecol. and Syst.*, 4, 1973, S. 1 ff. Mit dieser Arbeit begründet Holling gewissermaßen die ökologische Selbstorganisationsforschung.

tem dem Gleichgewichtszustand annähert, desto geringer ist seine Widerstandsfähigkeit, desto leichter kann es durch eine zufällige Fluktuation - eine dramatische Klimaschwankung oder das Auftreten einer neuen Spezies - völlig zerstört werden. Zu dieser Einsicht war Holling über seine Untersuchungen zur Populationsdynamik von Jäger- und Beutetieren³⁶⁷ sowie über ökologische Simulationsmodelle³⁶⁸ gelangt.

Gegen die herkömmliche Vorstellung, daß Ökosysteme räumlich homogen strukturiert und endogenen Fluktuationen nur in geringem Maße ausgesetzt seien, setzt Holling den »fact, the behavior of ecological systems is profoundly affected by random events«.³⁶⁹ Betrachte man das Verhalten von Ökosystemen »as a stable limit cycle with large amplitude«, dann würden gewisse Erkenntnisse über die dynamische Interaktion zwischen assoziierten Arten innerhalb eines Ökosystems nicht berücksichtigt, denen zufolge ein Ökosystem »is highly unstable in the sense that populations fluctuate widely«. Bei der Beschreibung ökologischer Systeme komme es daher sehr darauf an, von welchem Standpunkt aus man es analysiere: »It is useful to distinguish two kinds of behavior. One can be termed *stability*, which represents the ability of the system to return to an equilibrium state after a temporary disturbance; the more rapidly it returns and the less it fluctuates, the more stable

³⁶⁷ Siehe C. S. Holling, »Principles of Insect Predation«, in: *Ann. Rev. Entomol.*, 6, 1961, S. 163 ff.; ders., »The Functional Response of Predators to Prey Density and Its Role in Mimikry and Population Regulation«, in: *Mem. Entomol. Soc. Can.*, 45, 1965, S. 1 ff.; sowie ders., »The Functional Response of Invertebrate Predators to Prey Density«, in: *Mem. Entomol. Soc. Can.*, 48, 1966, S. 1 ff.

³⁶⁸ Siehe etwa C. S. Holling und S. Ewing, »Blind Man's Bluff: Exploring the Response Space Generated by Realistic Ecological Simulation Models«, in: *Proc. Intern. Symp. Stat. Ecol.*, 40, New Haven/Conn. 1971. Diese Arbeit knüpft an die frühen Überlegungen von Lotka (1956) und Volterra (1926), die zur Beschreibung von Jäger-Beute-Beziehungen ein Gleichungssystem mit zwei autokatalytischen Stufen entwickelt hatten, sowie von Nicolson und Bailey aus den 1930er Jahren an, weist aber die diesen zugrundeliegenden stabilitätsorientierten Prämissen als zu vereinfacht und mithin unrealistisch zurück; die Komplexität der ein Ökosystem kennzeichnenden Oszillationen käme hierdurch nicht angemessen in den Blick. - Siehe auch C. S. Holling, »The strategy of building models of complex systems«, in: K. E. F. Watt (Hg.), *Systems Analysis in Ecology*, London 1966, S. 195 ff.

³⁶⁹ C. S. Holling, »Resilience and Stability of Ecosystems«, in: E. Jantsch und C. Waddington (Hg.), *Evolution and Consciousness. Human Systems in Transition*, Reading/Mass. 1976, S. 80.

it would be. But there is another property, termed *resilience*, that is a measure of the persistence of systems and of their ability to absorb change and disturbance and still maintain the same relationships between populations or stable variables.« Im letzteren Falle zeigt sich ein Ökosystem als außerordentlich instabil: »instability, in the sense of large fluctuations, may introduce a resilience and a capacity to persist«.

Mögen sich gleichgewichtsorientierte Modelle auch analytisch besser handhaben lassen, so gestatten sie doch »not always ... a realistic understanding of the systems' behavior«.³⁷⁰ Die traditionelle Annahme, daß sich solche Systeme (nahezu) im Gleichgewicht befinden, sei lediglich »a simple convenience dictated by the enormous analytical difficulties of treating the behavior of nonlinear systems at some distance from equilibrium«. Ökosysteme mit hoher Variabilität und Elastizität (*resilience*) weisen nur eine geringe Homogenität auf und können stark fluktuieren; gerade dadurch aber sind sie in besonderem Maße überlebens- und evolutionsfähig. »A population responds to any environmental change by the initiation of a series of physiological, behavioral, ecological, and genetic changes that restore its ability to respond to subsequent unpredictable environmental changes. Variability over space and time results in variability in numbers, and with this variability the population can simultaneously retain genetic and behavioral types that can maintain their existence in low populations together with others that can capitalize on chance opportunities for dramatic increase.«³⁷¹

Ökosysteme mit hoher Variabilität und Elastizität (»*resilience*«) weisen nur eine geringe Homogenität auf und können stark fluktuieren; gerade dadurch aber sind sie in besonderem Maße überlebens- und evolutionsfähig. »A population responds to any environmental change by the initiation of a series of physiological, behavioral, ecological, and genetic changes that restore its ability to respond to subsequent unpredictable environmental changes. Variability over space and time results in variability in numbers, and with this variability the population can simultaneously retain genetic and behavioral types that can

³⁷⁰ Ebenda, S. 81.

³⁷¹ Ebenda, S. 83. Holling führt zwei Beispiele an: »Pest systems are highly variable in space and time; as open systems they are much affected by dispersal and therefore have a high resilience. Similarly, some Arctic ecosystems thought of as fragile may be highly resilient, although unstable« (S. 84).

maintain their existence in low populations together with others that can capitalize on chance opportunities for dramatic increase.«³⁷²

Holling geht davon aus, daß für ungleichgewichtige und flexible Ökosysteme mehrere »Stabilitätsdomänen« existieren, zwischen denen diese, im Falle veränderter Randbedingungen, wechseln können. Dabei schließt er an Überlegungen von Robert M. May zur Populationsdynamik an³⁷³, der gezeigt habe, daß komplexe Systeme mit einer hohen Anzahl von »links between species in a trophic web« stärker fluktuieren können als weniger komplexe; dies setze das Vorhandensein mehrerer Attraktionsdomänen voraus, in denen komplexe Systeme ihre Dynamik aufrechterhalten können: »But if there is more than one domain of attraction, then the increased variability could simply move the system from one domain to another.«³⁷⁴ Instabilität bedeutet also zugleich Multistabilität, d. h. die Existenz unbekannt vieler »defined stability regions are formed around each equilibrium state«; damit einher gehe die »possibility for sudden movements from one qualitative kind of behavior to another«.³⁷⁵ Sprunghafte Übergänge von einem Ordnungsregime in ein anderes - als evolutionäre Anpassungsreaktionen auf starke endogene oder umweltinduzierte Turbulenzen - sind typisch für selbstorganisierende Systeme mit einer unberechenbar fluktuierenden Eigendynamik.³⁷⁶

³⁷² Ebenda, S. 83. Holling führt zwei Beispiele an: »Pest systems are highly variable in space and time; as open systems they are much affected by dispersal and therefore have a high resilience. Similarly, some Arctic ecosystems thought of as fragile may be highly resilient, although unstable« (S. 84).

³⁷³ R. M. May, *Model Ecosystems*, Princeton/N. J. 1973.

³⁷⁴ C. S. Holling, »Resilience and Stability of Ecosystems«, a. a. O., S. 84. »It would be useful to explore the possibility that instability in numbers can result in more diversity of species and in spatial patchiness, and hence in increased resilience.«

³⁷⁵ Ebenda, S. 87 f.

³⁷⁶ In einer späteren Arbeit Hollings heißt es dazu: »Discontinuous change is an internal property of each system. For long periods change is gradual and discontinuous behavior is inhibited. Conditions are reached, however, when a jump event becomes increasingly likely and ultimately inevitable« (aus: *Terrestrial Ecosystems. Local Surprise and Global Change*, Laxenburg 1984, Ms., S. 6). - Hier findet sich auch (S. 20) eine pointierte Unterscheidung der Hollingschen Zentralbegriffe: »Stability, as here defined, emphasizes an equilibrium condition, low variability, and resistance to and

Je mehr nun eine gegebene Stabilitätsdomäne schrumpft, desto wahrscheinlicher ist ein »scharfer« Ordnungswechsel (»sharp jump in behavior«). Dies gilt es bei menschlichen Eingriffen in die Ökosystemdynamik (»ecological management«) zu berücksichtigen. Der Versuch, ein Ökosystem rigide gegen Störungen (»disturbances«) abzuschotten - die Stabilität *eines* bestimmten Gleichgewichts zu optimieren -, könnte auf Kosten seiner Fähigkeit gehen, sich plötzlich auftretenden dramatischen Störungen (etwa einem Klimawandel) »elastisch« anpassen zu können. Gerade die Aufrechterhaltung interner Fluktuationen als Folge dynamischer Komplexität (Artenvielfalt etc.) erhöht hingegen das Vermögen eines Ökosystems, sich über evolutionäre Prozesse am Leben zu erhalten.

Holling kontrastiert dementsprechend zwei extreme Strategien für das »Designen« von Ökosystemen: »The first would lead to the design of highly optimal systems in which fluctuations were minimized and explicit efforts were made to minimize the probability of failure - in short, a *fail-safe strategy*.« Diese Strategie sei immer dann angebracht, wenn wir über eine vollständige Kenntnis der Systemdynamik und ihrer Randbedingungen, d. h. der Stabilitätsgrenzen verfügen. »But rarely do we have that kind of knowledge ...«; in der Regel - wie im Falle von Gesellschafts- und Ökosystemen - »we have only the roughest idea where stability boundaries exist and their cause, and we certainly have no confidence at all that those existing stability boundaries are invariant in time«. Dann aber kann es passieren, daß der Versuch, Fluktuationen in einem System durch »cultural selection« zu reduzieren, gerade eine Verminderung der Stabilitätsregion bewirkt, mithin kontraproduktiv ausfällt. Angesichts dieser prinzipiell unabwendbaren Gefahr sei daher anstelle einer »fail-safe strategy« umgekehrt eine »*safe-fail strategy*« seitens des Systemmanagements gefordert, also ein Verhalten, das »Fehlerfreundlichkeit« statt »Fehlervermeidung« begünstigt (»that optimizes a cost of failure and even assures that there are periodic >mini-failures< to prevent evolution of inflexibility«).³⁷⁷

In Hinsicht auf reale Ökosysteme (und komplexe Sozialsysteme) empfiehlt Holling einen »mix of these two extremes«, der einerseits grobe Fehlschläge zu vermeiden trachtet

absorption of change. In sharp contrast, resilience emphasizes the boundary of a stability domain and events far from equilibrium«. Der Einfluß Prigogines ist unverkennbar.

³⁷⁷ Ebenda, S. 89 f.

(insofern »the world is partially known«) und andererseits der Tatsache Rechnung trägt, »that the probability of failure can never be reduced to zero«, wodurch aber auch evolutionäre Spielräume offengehalten würden: bei einem grundsätzlich fehlerfreundlichen Umgang mit ungleichgewichtigen Systemen können periodisch auftretende »mini-failures« als Testfälle genutzt werden, die zur Verhinderung systemischer Inflexibilitäten beitragen. »We must learn to *live with disturbance, live with variability, and live with uncertainties*. Those are the ingredients for persistence.«³⁷⁸

3 Zur »Epistemologie« der Selbstorganisation

Den modernen Konzepten der Selbstorganisation liegt ein gegenüber früheren Vorstellungen erheblich anders gefaßter Ordnungs- und Systembegriff zugrunde. Mag das Thema der Selbstorganisation auch alt sein, so gelingt es doch erst diesen neuen Konzepten, die Entstehung, Erhaltung und Höherentwicklung von Ordnung verständlich zu machen, indem sie solche Prozesse auf elementare Wechselwirkungen zwischen Systemelementen bzw. zwischen System und Umwelt zurückführen; das Verhältnis von Mikro- und Makrodimension komplex-dynamischer Systeme erscheint dadurch in einem gewandelten Licht. An die Stelle teleologischer Modelle (wie im Falle des Vitalismus) treten Mechanismen der Vernetzung, Rekursivität und Nicht-Linearität umweltoffener (gleichwohl operational geschlossener) Systemprozesse. Indem sie erstmals komplexe Strukturen und Vorgänge mit mathematischer Exaktheit beschreibt, erlaubt die moderne Selbstorganisationsforschung die Überwindung der klassischen Alternative zwischen physikalischem Reduktionismus und biologischem Holismus, in der frühere wissenschaftliche Diskussionen, besonders im 19. Jahrhundert, gefangen waren.

Vorstehend haben wir, der Absicht dieses Buches folgend, nur die Genese der Selbstorganisationsforschung dargestellt: die lange Vorgeschichte dieses neuen Forschungskonzepts (Kapitel II) sollte insbesondere die ideengeschichtlichen Voraussetzungen erhellen, unter denen die moderne Selbstorganisationsforschung sich etablieren

³⁷⁸ Ebenda, S. 90 f.

konnte; die Darstellung der neuen Konzepte selbst (Kapitel III) sollte zeigen, wie viel wissenschaftliche Phantasie und Wagemut dennoch nötig war, eine »Wissenschaft vom Komplexen« zu begründen. Wie es nun aus den verschiedenen Anfängen (bei Prigogine, Haken, Eigen, Lorenz, Maturana usw.) heraus zur Formierung eines mittlerweile fast alle Wissenschaftsdisziplinen umfassenden Forschungsprogramms kommen konnte, soll in dieser Arbeit nicht näher untersucht werden. Daher dazu nur wenige Hinweise zum weiteren Schicksal der modernen Selbstorganisationsforschung.³⁷⁹

Als die beteiligten Forscher, die »Gründerväter«, in den frühen 1970er Jahren begannen, einander wahrzunehmen und die Analogien zwischen ihren Konzepten zu erkennen, wurde ihnen sehr rasch klar, daß ihre Theorien nicht bloß bestimmte Spezialprobleme ihrer jeweiligen Disziplin (die Arbeitsweise des Lasers, die Entstehung biologischer Information, das Phänomen chemischer Oszillationen usw.) lösten, sondern offenbar in der Lage waren, Selbstorganisationsprozesse unterschiedlichster Art zu erklären. Offenbar lagen diesen neuen Ansätzen sehr viel tiefer liegende Prinzipien zugrunde, als zunächst vermutet.

Sehr bald - ab Mitte der 1970er Jahre - testeten die Forscher die Tragweite der von ihnen erzielten Durchbrüche dadurch, daß sie ihre neuen Konzepte auch auf Gegenstände außerhalb ihres eigentlichen Forschungsbereichs anwandten: auf das Verhalten von Aktienkursen, auf Verkehrsflüsse, auf Prozesse der Urbanisierung, der Wolkenbildung, der Meinungsbildung, der Wissenschaftsentwicklung u. v. m.³⁸⁰ Andere Forscher, wie etwa Erich Jantsch³⁸¹, bemühten sich - in den 1980er Jahren - um eine Synthese all dieser neuen Konzepte und um ihre Universalisierung i. S. der Begründung eines neuen »Weltbilds der

³⁷⁹ Eine eingehende Erörterung aller bisherigen Entwicklungsphasen, wobei auch die komplexen Wechselbeziehungen zwischen der wissenschaftlichen Selbstorganisationstheorie und außerwissenschaftlichen Selbstorganisationsideen (»New Age«, »Neue soziale Bewegungen« u. a.) Berücksichtigung finden, beabsichtigt der Autor in einem gesonderten Buch, das voraussichtlich 1992 erscheinen wird, vorzulegen: *Selbstorganisation in Wissenschaft und Gesellschaft - Zur Geschichte und Struktur eines neuen Paradigmas*.

³⁸⁰ Siehe dazu H. Haken, *Erfolgsgeheimnisse der Natur* (1981), a. a. O.; M. Eigen und R. Winkler, *Das Spiel - Naturgesetze steuern den Zufall*, München 1975; bzw. I. Prigogine, *Vom Sein zum Werden*, München 1979.

³⁸¹ Siehe vor allem E. Jantsch, *Die Selbstorganisation des Universums*, a. a. O.

Selbstorganisation«, das das »mechanistische Weltbild« ablösen sollte. Nicht zuletzt benutzten auch prominente Vertreter der »Neuen sozialen Bewegungen« und des »New Age« die Theorien der Selbstorganisation zur Konstruktion neuer Weltbilder und trugen so zu ihrer Popularisierung bei.³⁸² Inzwischen sind sogar Parallelen zwischen der Theorie der Selbstorganisation und diversen Konzepten einer »postmodernen« Ästhetik gezogen worden.³⁸³ Vor allem aber hat die rasche Diffusion der »Gründerkonzepte« in neue Wissenschaftsfelder und Praxisbereiche zur Etablierung und Durchsetzung der Selbstorganisation als eines neuen Paradigmas beigetragen, wofür die evolutionäre Managementlehre³⁸⁴ und die systemische Familientherapie³⁸⁵ einschlägige Beispiele bilden.³⁸⁶

³⁸² Siehe etwa F. Capra, *Wendezeit - Bausteine für ein neues Weltbild*, Bern/München 1983, sowie M. Ferguson, *Die sanfte Verschwörung*, Basel 1982. - Hinsichtlich der Neuen sozialen Bewegungen siehe R. Paslack, »Selbstorganisation und Neue Soziale Bewegungen«, in: W. Krohn und G. Küppers (Hg.), *Selbstorganisation - Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*, Braunschweig/Wiesbaden 1990, S. 279 ff.

³⁸³ Siehe etwa W. Welsch, *Unsere postmoderne Moderne*, Weinheim 1987; sowie übergreifend R. Paslack, »...da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein«. Die Karriere des Chaos zum Schlüsselbegriff«, in: *Kursbuch*, H. 11, 1989, S. 121 ff.

³⁸⁴ Hier ist vor allem die sogenannte »Sankt-Galler-Schule« der Betriebswirtschaft zu nennen: siehe etwa die systematische Darstellung in G. Probst, *Selbst-Organisation. Ordnungsprozesse in sozialen Systemen aus ganzheitlicher Sicht*, Berlin/Hamburg 1987.

³⁸⁵ Zur Einführung siehe L. Hoffman, *Grundlagen der Familientherapie*, Hamburg 1984 (dort wird auch die Bedeutung G. Batesons für die Theorie selbstorganisierter Therapieprozesse herausgestellt).

³⁸⁶ Für die Literaturwissenschaft siehe etwa S. J. Schmidt, »Vom Text zum Literatursystem - Skizze einer konstruktivistischen (empirischen) Literaturwissenschaft«, in: *Einführung in den Konstruktivismus*, Schriften der CarlFriedrich Siemens Stiftung, Bd. 10, München 1985; oder auch von H. Hauptmeier und S. J. Schmidt, *Einführung in die Empirische Literaturwissenschaft*, Braunschweig/Wiesbaden 1985 und neuerdings S. J. Schmidt, *Die Selbstorganisation des Sozialsystems Literatur im 18. Jahrhundert*, Frankfurt a. M. 1989. - Für den Bereich des Rechts siehe G. Teubner und H. Willke, »Kontext und Autonomie: Gesellschaftliche Selbststeuerung durch reflexives Recht«, in: *Zeitschrift für Rechtssoziologie*, 5/1984, S. 44 ff.; und neuerdings von G. Teubner, *Recht als autopoietisches System*, Frankfurt a. M. 1989. - Für die Soziologie siehe N. Luhmann, *Soziale Systeme*, Frankfurt a. M. 1984; oder P. M. Hejl, *Sozialwissenschaft als Theorie selbstreferentieller Systeme*, Frankfurt a. M./New York 1982. - Für den Komplex Gestaltpsychologie siehe die zahlreichen Artikel zur

Zwar hält der Kampf um die »legitime« Bezeichnung des neuen Forschungsprogramms unter den Konkurrenten (den »Gründervätern« und »Anwendern«) noch an - Neologismen wie »Autopoiese«, »Synergetik«³⁸⁷, »Theorie dissipativer Strukturen« oder »Theorie selbstreferentieller Systeme« stehen zur Diskussion³⁸⁸ -, andererseits hat der ältere, wenn auch diffusere Ausdruck »Selbstorganisation« den Vorteil, das allgemeine erklärungsbedürftige Phänomen - eben die spontane Entstehung und Evolution komplexer Ordnung - griffig zu benennen, ohne bereits auf recht spezifische Momente selbstordnender Prozesse (Strukturbildung durch energetische Dissipation, Selbstreferentialität, hyperzyklische Prozeßorganisation usw.) abzuheben.

Es ist nun keineswegs notwendig, daß sich die Forscher in so verschiedenen Disziplinen wie der Physik, der Biologie, der Psychologie oder der Ökonomie auf eine eindeutige Definition des Begriffs »Selbstorganisation« oder ähnlicher Termini einigen, um dennoch rekonstruktiv von einem transwissenschaftlichen Forschungsprogramm der Selbstorganisation sprechen zu können: bei aller Unstimmigkeit im Detail ist doch nicht zu übersehen, daß es unter den meisten beteiligten Wissenschaftler Konsens ist, mit einem gemeinsamen neuen Forschungsparadigma zu arbeiten, das freilich verschiedene disziplin- bzw. gegenstandsspezifische Ausprägungen zuläßt. Eine derartige Variantenbildung ist nur folgerichtig (und auch im Falle älterer wissenschaftlicher »Superparadigmen«, wie des Mechanismus, einschlägig) und spricht in keiner Weise gegen das Vorhandensein übergreifender epistemischer oder epistemologischer³⁸⁹ Zusammenhänge.

Selbstorganisationsthematik in der Zeitschrift *Gestalt Theory*, 1983 ff.; für den weiteren Psychiatriebereich siehe etwa G. Reiter et al. (Hg.), *Von der Familientherapie zur systemischen Perspektive*, Berlin/Heidelberg 1988. - Empfehlenswerte Sammelbände mit Beiträgen aus den verschiedensten Anwendungsgebieten der Selbstorganisationstheorie sind etwa: A. Dress, H. Hendrichs und G. Küppers (Hg.), *Selbstorganisation - Die Entstehung von Ordnung in Natur und Gesellschaft*, München 1986; W. Gerok (Hg.), *Ordnung und Chaos in der unbelebten und belebten Natur* (Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, Freiburg i. Br. 1988), Stuttgart 1989.

³⁸⁷ Ein besonders in den osteuropäischen Staaten geschätzter Ausdruck.

³⁸⁸ Derzeit hat besonders die »Chaostheorie« Konjunktur.

³⁸⁹ »Epistemologie« hier verstanden i. S. von »Erkenntnistheorie«.

Nachstehend wird daher der Versuch gewagt, aus einer Analyse der programmatischen Äußerungen der maßgeblichen Autoren, der »Gründerväter« also, ein Inventar von forschungsleitenden Grundannahmen zusammenzustellen, durch die das moderne Konzept der Selbstorganisation sich selbst kennzeichnet und seine revolutionären Ansprüche gegenüber älteren wissenschaftlichen Denktraditionen signalisiert.³⁹⁰ Einige dieser Annahmen beziehen sich stärker auf die Objektstruktur (Positionen 1 bis 3), andere auf die epistemischen Grundlagen (Positionen 4 bis 8), wobei die Trennung ihrerseits nicht immer scharf ist, bzw. gerade in Frage gestellt wird. Auch sind die Annahmen unterschiedlich radikal; nicht jeder Forscher auf dem Gebiet der Selbstorganisation wird alle Positionen akzeptieren.

³⁹⁰ Die folgenden Ausführungen stützen sich auf frühere Darstellungen in: W. Krohn, G. Küppers und R. Paslack, »Selbstorganisation - Zur Genese und Entwicklung einer wissenschaftlichen Revolution«, in: S. J. Schmidt (Hg.), *Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*, Frankfurt a. M., S. 459; sowie: G. Küppers und R. Paslack, »Die Entdeckung des Komplexen - Zur Entstehung und Entwicklung der Theorie der Selbstorganisation«, in: F. Schafstedde (Hg.), *Der ganze Mensch und die Medizin*, Hamburg 1989, S. 77 f.

Klassische Sichtweise

1. Systembegriff

Analytisch definierte, zentralistisch organisierte, geschlossene Systeme mit vorgegebener Hierarchie im statistischen u. thermodynamischen Gleichgewicht mit einfachen Elementen.

2. Umweltbegriff

Umwelt strukturiert Systeme, Regelung extern.

3. Randbedingungen

Randbedingungen sind beliebig, sie gehören zur Umwelt.

4. Dynamik

Trajektorie; thermodynamischer Gleichgewichtszustand; Reversibilität.

5. Kausalität

Linealität.

6. Zeitbegriff

Skalare, universelle Zeit.

7. Geometrie

Ganzzahlige Dimensionen.

8. Gesetzesbegriff

Ordnung als determinierte Struktur.

Selbstorganisation

Realistisch definierte, polyzentrisch organisierte, offene Systeme mit selbsterzeugter Hierarchie im dynamischen Gleichgewicht bzw. fern ab vom thermodynamischen Gleichgewicht mit komplexen Elementen.

Systeme strukturieren Umwelt, Regelung intern.

Randbedingungen sind wichtig, sie gehören zum System.

Prozeß; thermodynamisches Nicht-Gleichgewicht; Irreversibilität.

Zirkularität.

Zeitoperator, Systemzeit.

Fraktalität.

Ordnung durch Strukturierung.

ad 1: Im klassischen Fall werden die Systeme analytisch, z. B. mit Bezug auf ihre Funktionen definiert, während die Selbstorganisation von empirischen Systemdefinitionen ausgeht, d. h. in erster Linie Kriterien der Zugehörigkeit bzw. Nichtzugehörigkeit zu einem System benützt. Der zentral gesteuerten Ausdifferenzierung von Teilsystemen (Zellen, Organisationen usw.), die auf verschiedenen Ebenen unterschiedlicher Kontrollmächtigkeit angesiedelt werden, steht im Falle der Selbstorganisation die Vorstellung von einer überwiegend selbstgesteuerten Ausdifferenzierung relativ autonomer Teilsysteme gegenüber, die sich zu einem dynamischen Netzwerk ordnen und gegenüber Reorganisationen offenbleiben. Befindet sich das klassische System aufgrund seiner Geschlossenheit im thermodynamischen Gleichgewicht, so sind die Systeme der Selbstorganisation wegen ihrer Offenheit weit davon entfernt. Systemgleichgewichte sind im klassischen Fall statisch, im Falle der Selbstorganisation stationär, d. h. dynamisch. Im klassischen Fall lassen sich daher die Gleichungen in der Nähe des Gleichgewichts linearisieren, die Nicht-Linearität wird allenfalls als Störung behandelt. Gleichgewichte fern ab vom thermodynamischen Gleichgewicht lassen diese Näherung nicht mehr zu. Erst bei Berücksichtigung der Nicht-Linearität des Systems werden seine komplexen Eigenschaften sichtbar. Aus klassischer Sicht kann die interne Struktur der Systemelemente unberücksichtigt bleiben, während sie bei selbstorganisierenden Systemen eine gewisse Rolle spielt: komplexe Systeme dieser Art werden ihrerseits aus komplexen Teilsystemen aufgebaut.

ad 2: Gemäß der klassischen Konzeption entwickeln Systeme sich in durchgängiger Abhängigkeit von ihrer jeweiligen Umwelt, d. h. sie passen sich dieser an, versuchen ihr Gleichgewicht gegenüber Störungen der Umwelt zu behaupten bzw. zurückzugewinnen (die Wirkung der Umwelt auf das System ist instruktiv); dem Selbstorganisationskonzept zufolge wirkt die Umwelt rein negativ, d. h. unspezifisch auf das System; umgekehrt greift das hochentwickelte selbstorganisierende System aktiv in seine Umwelt ein und manipuliert dabei in gewissen Grenzen die Umweltbedingungen, unter denen es sich erhalten kann. Im klassischen Falle (z. B. Thermostat) wird der Sollwert dem System von außen vorgegeben (Fremdnormierung); im Falle der Selbstorganisation wird der Sollwert vom System erzeugt (Selbstnormierung).

ad 3: In klassischen Systemen wird ein klarer Schnitt zwischen den Grundgleichungen (universellen Gesetzen), die das »Verhaltensprogramm« eines Systems definieren, und den Randbedingungen, die sein situatives Verhalten beeinflussen, gezogen; die Selbstorganisationstheorie hingegen geht davon aus, daß gerade die Möglichkeiten der Verfügung über die Ränder die Systemidentität regulieren und zur Selbsterhaltung beitragen (so wird etwa die Identität eines Lebewesens durch die Existenz und Aktivität seines genetischen Codes bestimmt und garantiert).

ad 4: In klassischer Sichtweise werden »Teilchen« in »Feldern« als reversible Trajektorien oder Systeme im Gleichgewicht beschrieben, während in der Selbstorganisationstheorie der Prozeßcharakter eines Systems mit seiner Irreversibilität und Gleichgewichtsferne betont wird.

ad 5: Im klassischen Ansatz werden auch komplexe Prozesse auf eindeutige (lineale) Ursache-Wirkung-Ketten hin analysiert, d. h. auf eine sukzessive Abfolge von Kausalereignissen reduziert; für den Selbstorganisationsansatz liegt das Besondere komplexer Prozesse hingegen im Auftreten kreiskausaler Verknüpfungen, in dem Sinne, daß Systemoutputs wiederum als inputs für dasselbe System dienen können - Ursachen und Wirkungen sind zirkulär miteinander vernetzt. Zwar gibt es auch klassisch das Phänomen der Wechselwirkung, im Falle der Selbstorganisation wird die Wechselwirkung jedoch hierarchisiert (vgl. z. B. das »Versklavungsprinzip« von H. Haken). Hinzu kommt, daß die hohe »Sensibilität« selbstorganisierender Systeme für Randbedingungen der Prognostizierbarkeit ihres Verhaltens prinzipielle Grenzen setzt: an kritischen Bifurkationspunkten werden exakte Voraussagen über das künftige Verhalten solcher Systeme unmöglich. Kleine Ursachen können große Wirkungen zeitigen.

ad 6: Im klassischen Falle existiert für das gesamte Geschehen ein einheitlicher und homogener Zeitstrom (absolute Zeit); im Falle der Selbstorganisation koordiniert jedes System seine internen Prozesse gemäß einer Eigenzeit (systemischer Zeitrelativismus). Die Entwicklung solcher eigenzeitlicher Systeme nimmt dabei »historische« Züge an: sie wird abhängig von der bisherigen Systemgeschichte.

ad 7: Wie an den Zeitstrukturen so werden auch an den Raumstrukturen dynamischer Systeme die Unregelmäßigkeiten wichtiger als die Regelmäßigkeiten: dabei zeigt sich, daß

auch bei genauerem Hinsehen diese Strukturen (z. B. Küstenlinien, Bergketten oder Störungen im Telegrafennetz) keineswegs einfacher oder regelmäßiger werden - sie behalten vielmehr ihre komplexe Struktur unabhängig vom gewählten Maßstab bei («Selbstähnlichkeit»); natürliche Formen sind (nach Mandelbrot) stets nicht-euklidisch, d. h. unganzzahlig oder »fraktal« dimensioniert: je nach Maßstab kann ein Objekt eine andere Dimension, eine andere Geometrie aufweisen.

ad 8: Der klassischen Sicht einer Konstitution von Ordnung durch Ableitung aus universellen Gesetzen (Gesetzesdeterminismus) kontrastiert in der Theorie der Selbstorganisation die Vorstellung einer emergenten Selbstkonstitution von Ordnung durch synergetische Prozesse aus Fluktuationen.

Die Unterschiede zwischen klassischer und moderner Sichtweise deuten darauf hin, daß wir es zumindest in den Programmformulierungen mit einem umfassenden Umbruch in der Wissenschaft zu tun haben. Viele der Indikatoren, die von Th. S. Kuhn zur Beschreibung einer wissenschaftlichen Revolution benutzt werden³⁹¹, sind bei der Entstehung der Selbstorganisationskonzepte aufzufinden: Frühere Phänomene an den Rändern der »normalen Wissenschaft« wurden durch eine Relevanzverschiebung in den Fragestellungen zentral, bisherige Störgrößen avancierten zu Systemgrößen und werden als wesentliche Anomalien sichtbar (z. B. Dissipation, Nicht-Linearität, Instabilität, Irregularität).

Eine neue Modellierung der Wirklichkeit wurde vorgenommen, um diese Anomalien zu erwartbaren Phänomenen des Gegenstandsbereichs zu machen; diese Veränderung betrifft die Objektstruktur nicht weniger als die epistemischen Grundlagen. Auch unterhalb dieses »Gestaltwechsels« auf der Ebene der Paradigmata sind erhebliche Veränderungen im Begriffsgefüge (theoretischer Strukturwandel) erfolgt: neue Begriffe wie »Bifurkation«, »Fluktuation«, »Versklavung« spielen eine grundlegende Rolle. In anderen Fällen haben sich die Bedeutungen auch altbekannter Termini stark gewandelt (z. B. die Bedeutung von Randbedingungen für selbstorganisierende Prozesse); schließlich werden auch Grundgrößen relativiert (insbesondere der Zeitbegriff). Eine Reihe von Entdeckungen und Erfindun-

³⁹¹ Siehe Th. S. Kuhn, *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt a. M. 1973.

gen, die aufgrund der neuen Konzepte erfolgt sind, geben die empirischen Verankerungen, ohne die begriffliche Neuerungen keinen Bestand haben.

Abschließend seien besonders drei Momente hervorgehoben, die den von der Selbstorganisationstheorie gegenüber klassischen Vorstellungen eingeleiteten »Gestaltwechsel« oder »paradigmatic shift« markieren:

(1) *Irregularitäten* (etwa Ungleichgewichtsprozesse), ehemals als Randphänomene und Anomalien betrachtet, werden ins Zentrum der Forschung gerückt und zum Normalfall erklärt: umgekehrt gelten nunmehr die Gleichgewichtsprozesse, die vordem das Interesse der Forscher dominierten, als Ausnahmen von der Regel (gleichgewichtsferner Prozeßdynamik); »gesetzloses«, ungleichgewichtiges oder chaotisches Verhalten wurde als Quelle regulären Verhaltens und überhaupt jeder komplexen Ordnung erkannt.

(2) *Komplexität*, die früher als wissenschaftlich nicht behandelbar, weil nicht reduzierbar galt, wird nunmehr als genuines Phänomen ernstgenommen, da offenbar bereits einfachste Strukturen komplex sein können: augenfällig machten dies die einfachen Simulationsmodelle dynamischer Systeme, in denen einfache (nicht-lineare) Gleichungssysteme ein äußerst komplexes Verhalten lieferten.

(3) Das klassische System-Umwelt-Modell, demzufolge die Anpassung eines Systems an seine Umwelt von außen (über externe Funktionsziele/Sollvorgaben) gesteuert und beobachtet werden kann, wurde ersetzt durch ein neues Modell, das von systemischer *Selbststeuerung* und interner Selbstbeobachtung ausgeht (»Kognition« i. S. von Maturana als Selbstwahrnehmung und -abgrenzung, etwa einer Zelle gegenüber ihrem Milieu): komplexe (biologische) Systeme konstruieren ihren eigenen Rand (z. B. ein Genom) und sichern darüber ihre Selbsterhaltung und Identität eigendynamisch: Rand und Systemdynamik sind aufs engste miteinander verknüpft. Häufig strukturieren sie sogar ihre Umwelt (Meliorisierung des Milieus), um günstige externe Bedingungen für ihr Überleben zu schaffen. Der Umwelteinfluß beschränkt sich dann auf bloße Störung (Perturbation) und eine rein »negative« Auslese: was überleben *kann*, das überlebt - und das muß keines das

»bestangepaßte« System (»the fittest«) sein. Das System selbst entscheidet, ob und wie die Umweltstörungen in die Systemoperationen integriert werden. Auch sind alle Informationen eines Systems über seine Umwelt Produkt seiner operationalen Geschlossenheit, d.h. systeminterne Konstruktionen. »Fremdreferenz« (Umweltbezug) ist lediglich ein Spezialfall von »Selbstreferenz«.

Das Ergebnis ist eine neue *Wissenschaft vom Komplexen*, ein erstmaliges Ernstnehmen komplexer Phänomene und eine neue Sicht der Materie als Ensemble von mit spontaner Aktivität ausgestatteten, vielfältig vernetzten evolvierenden Systemen. Derart weitreichend, daß Nicolis und Prigogine vom Beginn eines »neuen Dialogs des Menschen mit der Natur« sprechen möchten. Ein neues »Vokabular des Komplexen« - mit Ausdrücken wie »Kohärenz«, »Komplexität« und »Ordnung« - ist im Entstehen begriffen, die Kluft zwischen »Einfachem« und »Komplexem« beginnt sich zu schließen, Zufall (stochastisches Verhalten) und Notwendigkeit (deterministisches Verhalten) ergänzen sich vielfach komplementär und verleihen der Natur eine historische Dimension.³⁹² Noch stehen sich zwar innerhalb der neuen Wissenschaft die biologischkybernetische Forschungslinie (etwa Maturana) und die physikalisch-chemische (etwa Prigogine) relativ unverbunden gegenüber, da sehr unterschiedliche Emergenzebenen behandelt werden; andererseits ist komplexes Systemverhalten nicht mehr nur ein Gegenstand der Biologie und »selbstähnliche« Strukturen zeigen sich auf allen Ordnungsebenen.

Eine abschließende Erkenntnistheorie - und vielleicht auch Ontologie - der Selbstorganisationstheorie gibt es bislang noch nicht.³⁹³ Noch ist ungewiß, ob sie zu einer Revolutionierung der Wissenschaft als ganzer führen oder auf bestimmte Anwendungsbereiche beschränkt bleiben wird. Daß sie indessen nicht nur eine bloße Modeerscheinung von kurzfristiger Konjunktur darstellt, dürfte jedoch schon jetzt feststehen: die inzwischen von der Selbstorganisationsforschung vorgelegten »harten« Ergebnisse sowie eine relativ lange Anlaufgeschichte (immerhin ca. 30 Jahre) zeugen dafür, daß mit der Theorie der

³⁹² G. Nicolis und I. Prigogine, *Die Erforschung des Komplexen*, München 1987.

³⁹³ Auch keine mathematische Explikation des »Theoriekerns« des Forschungsprogramms der Selbstorganisation im Rahmen »theoriendynamischer« Analysen à la D. Sneed, W. Stegmüller oder U. Moulines.

Selbstorganisation ein wissenschaftsgeschichtliches »Ereignis« höheren Ranges vorliegt und keineswegs bloß eine Mode hochgespielt wird.

Nicht zuletzt kann auch die sehr lange - philosophische und wissenschaftliche - »Urgeschichte« der Selbstorganisationsidee als Argument für diese Einschätzung herangezogen werden: die Suche nach Modellen der Beschreibung und Erklärung selbstorganisierter Ordnung in Natur, Gesellschaft und Kultur reicht, wie wir gesehen haben, so weit zurück, daß die moderne Selbstorganisationsforschung hier gewissermaßen einen uralten theoretischen Traum der Menschheit wahr zu machen verspricht.

Die von der modernen Selbstorganisationsforschung eingeleitete »Revolution« bedeutet aber nicht nur einen Bruch mit klassischen Vorstellungen über den Zusammenhang von Ordnung und Unordnung, zugleich wird durch sie der »Prozeß der Neuzeit« konsequent weitergeführt, insofern sie jene neuzeitliche Desillusionierung des modernen Subjekts über seine operativen Möglichkeiten³⁹⁴ ein Stück weiter vorangetreibt, die mit der »Kopernikanischen Revolution« ihren Anfang genommen hatte. Die »Kopernikanische Wende« bedeutete bekanntlich, daß der Planet Erde aus der Mitte des Kosmos entsetzt und zu einem unter anderen Planeten degradiert wurde, die nunmehr die Sonne als Zentralgestirn umkreisen; aber auch die Sonne selbst erwies sich als nur einer von zahllosen Sternen. -

Mit Darwin wurde der Mensch zu einem zufälligen Produkt der natürlichen Evolution erklärt: die Menschwerdung hätte auch unterbleiben können. - Freuds Psychoanalyse zeigte, daß unser Bewußtsein nur gleichsam wie ein schwankes Boot auf einem unermeßlichen Ozean des Unbewußten schwimmt und daß wir keineswegs sicher sein können, ob das, was wir beabsichtigen, denken und begehren, unserem freien Willen entspringt oder uns zumindest in seiner Ursächlichkeit durchschaubar ist. - Und die moderne Chaosforschung schließlich weist unseren Anspruch zurück, auf der Basis erkannter Gesetze komplexe Prozesse zweckrational planen zu können: die Folgen unseres Handelns sind im Prinzip nicht mehr absehbar, der Zeithorizont unseres Handlungsspielraums wird daurch eingeschränkt, das Risikopotential unseres Verhaltens unreduzierbar.

³⁹⁴ Vgl. zu den Wurzeln dieser »Dezentrierung des Subjekts« in der Renaissance: W. Krohn, »Die »Neue Wissenschaft« der Renaissance«, in: G. Böhme, W. van den Daele und W. Krohn, *Experimentelle Philosophie*, Frankfurt a. M. 1977, S. 13 ff.

Gleichzeitig wachsen uns mit der Einsicht in die Grenzen des Machbaren aber auch neue Handlungsmöglichkeiten zu, insofern es uns gelingt, das neue Wissen über die Eigenschaften komplexer dynamischer Systeme in ein verändertes (»reflexives«) Planungsverhalten zu übersetzen, das aus der »Elastizität« selbstorganisierender Systeme innovativen Profit zieht. Nicht nur die Interpretation der Wirklichkeit hat durch die moderne Selbstorganisationsforschung eine Wandlung erfahren, auch unsere Erwartungen und Handlungsmöglichkeiten hinsichtlich der Veränderbarkeit der Wirklichkeit beginnen, sich durch die »Wissenschaft vom Komplexen« nachhaltig zu wandeln.

Literatur

- Andronov, A.A./Chaikin, C.E. (1949), *Theory of Oscillations*, Princeton/London (russ. Original: Moskau 1937).
- Aristoteles, *Physik*, Buch II.
- Ashby, W.R. (1945), »The Physical Origin of Adaptation by Trial and Error«, in: *Journal of General Psychology*, 32, S. 13 ff.
- Ashby, W.R. (1947), »Principles of the Self-Organizing Dynamic System«, in: *Journal of General Psychology*, 37, S. 125 ff.
- Ashby, W.R. (1952), *Design for a Brain*, New York.
- Ashby, W.R. (1956), *An Introduction to Cybernetics*, New York.
- Ashby, W.R. (1958), »Requisite variety and its implications for the control of complex systems«, in: *Cybernetica*, 1, S. 83 ff.
- Ballmer, Th. T./von Weizsäcker, E. (1974), »Biogenese und Selbstorganisation«, in: E. von Weizsäcker (Hg.) (1974), *Offene Systeme I: Beiträge zur Zeitstruktur von Information, Entropie und Evolution*, Stuttgart.
- Bateson, G. (1946), »Physical Thinking and Social Problems«, in: *Science*, 103, S. 717 f.
- Bateson, G. (1967), »Cybernetic explanation«, in: *American Behavioral Scientist*, 10, S. 29 ff. (dt. unter dem Titel »Kybernetische Erklärung«, in: G. Bateson, *Die Ökologie des Geistes*, Frankfurt a.M. 1981, S. 515 ff.).
- Bateson, G. (1968), »Redundancy and coding«, in: Th.A. Sebeok (Hg.), *Animal Communications; Techniques of Study and Results of Research*, Bloomington (Indiana)/London, S. 614 ff. (dt. unter dem Titel »Redundanz und Codierung«, in: G. Bateson, *Ökologie des Geistes*, Frankfurt a.M. 1981, S. 530 ff.).
- Bateson, G. (1981), *Ökologie des Geistes*, Frankfurt a.M. (im amerik. Original: *Steps to an Ecology of Mind. Collected Essays in Anthropology, Psychiatry, Evolution and Epistemology*, New York 1972).
- Bateson, G. (1982), *Geist und Natur - Eine notwendige Einheit*, Frankfurt a.M. (im amerik. Original: *Mind and Nature. A Necessary Unity*, New York 1979).
- Bertalanffy, L. von (1928), *Kritische Theorie der Formbildung*, Berlin.
- Bertalanffy, L. von (1932), *Theoretische Biologie*, Bd 1: *Allgemeine Theorie, Physikochemie, Aufbau und Entwicklung des Organismus*, Berlin.
- Bertalanffy, L. von (1937), *Das Gefüge des Lebens*, Berlin.
- Bertalanffy, L. von (1940), »Der Organismus als physikalisches System betrachtet«, in: *Naturwissenschaften*, H. 33, S. 520 ff.
- Bertalanffy, L. von (1957), »Allgemeine Systemtheorie - Wege zu einer neuen Mathesis Universalis«, in: *Deutsche Universitätszeitung*, H. XII/5-6, S. 10 ff.
- Bertalanffy, L. von (1968), *General System Theory*, New York.
- Bertalanffy, L. von (1969), »Das Modell des offenen Systems«, in: *Nova Acta Leopoldina. Biologische Modelle*, 33, S. 75 ff.
- Binnig, G. (1989), *Aus dem Nichts*, München/Zürich.
- Böhme, H./Böhme, G. (1985), *Das Andere der Vernunft - Zur Entwicklung von Rationalitätsstrukturen am Beispiel Kants*, Frankfurt a.M.
- Boulding, K. (1955), *The Organizational Revolution*, New York.

- Brandl, H. (1987), *Oszillierende chemische Reaktionen und Strukturbildungsprozesse*, Köln.
- Breuer, R. (1985), »Chaos«, in: *GEO*, H. 7, S. 44 ff.
- Briggs, J./Peat, F.D. (1990), *Die Entdeckung des Chaos - Eine Reise durch die Chaos-Theorie*, München/Wien.
- Bühler, K. (1907), »Tatsachen und Probleme zu einer Psychologie der Denkvorgänge«, in: *Archiv der Gesellschaft für Psychologie*, Bd. 9.
- Burke, E. (1795), »Thoughts and Details on Scarcity«, in: *Works*, Bd. 5, London.
- Capra, F. (1983), *Wendezeit - Bausteine für ein neues Weltbild*, Bern/München.
- Cramer, F. (1988), *Chaos und Ordnung - Die komplexe Struktur des Lebendigen*, Stuttgart.
- Davis, M. (1958), *Computability and Unsolvability*, New York.
- Descartes, R. (1637), *Abhandlungen über die Methode des richtigen Vernunftgebrauchs und der wissenschaftlichen Wahrheitsforschung*.
- Descartes, R. (1644), *Principia philosophiae*.
- Deutsch, A. (1990), »Liesegangsche Ringe: Musterbildung bei Fällungsreaktionen«, in: L. Rensing/A. Deutsch (Hg.) (1990), *Natur und Form*, Bremen.
- Dress A./Hendrichs H./Küppers G. (Hg.) (1986), *Selbstorganisation - Die Entstehung von Ordnung in Natur und Gesellschaft*, München.
- Driesch, H. (1894), *Analytische Theorie der organischen Entwicklung*, Leipzig.
- Driesch, H. (1909), *Philosophie des Organischen*, Bd. I und II, Leipzig.
- Durkheim, E. (1973), *De la division du travail social. Etude sur l'organisation des sociétés supérieures*, 9. Aufl., Alcan (Erstausgabe 1893).
- Eddington, A. (1958), *The Nature of the Physical World*, London.
- Ehrlich, P.R./Raven, P.H. (1965), »Butterflies and plants: A study in coevolution«, in: *Evolution*, 18, S. 586 ff.
- Eigen, M. (1964), »Information, ihre Speicherung und Verarbeitung in biomolekularen Systemen«, in: *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 68, S. 889 ff. (zus. mit L de Mayer erweiterte Fassung desselben Titels in: *Naturwissenschaften*, 53, S. 50 ff.).
- Eigen, M. (1971), »Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules«, in: *Naturwissenschaften*, 58, S. 465 ff.
- Eigen, M. (1988), »Biologische Selbstorganisation: Eine Abfolge von Phasensprüngen«, in: K. Hierholzer/H.-G. Wittmann (Hg.) (1988), *Phasensprünge und Stetigkeit in der natürlichen und kulturellen Welt*, Stuttgart, S. 113 ff.
- Eigen, M./Winkler, R. (1975), *Das Spiel - Naturgesetze steuern den Zufall*, München.
- Eisenhardt, P./Kurth, D./Stiehl, H. (1988), *Du steigst nie zweimal in denselben Fluß - Die Grenzen der wissenschaftlichen Erkenntnis*, Reinbek b. Hamburg.
- Ekeland, I. (1985), *Das Vorhersehbare und das Unvorhersehbare*, München.
- Engelhardt, D. von (1990), »Philosophie der Natur und romantische Naturforschung. Wissenschaftsentwicklung zwischen Naturevolution und Kulturgeschichte«, in: W. Krohn/G. Küppers (Hg.) (1990), *Selbstorganisation - Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*, Braunschweig/Wiesbaden, S. 19 ff.
- Epstein, I.R. et al. (1983), »Oszillierende chemische Reaktionen«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, H. 5, S. 98 ff.
- Etzioni, A. (1975), *Die aktive Gesellschaft*, Opladen.

- Fechner, G.T. (1873), *Einige Ideen zur Schöpfungs- und Entwicklungsgeschichte der Organismen*, Leipzig (Nachdruck: Tübingen 1985).
- Feigenbaum, M. (1978), »Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations«, in: *Journal of Statistical Physics*, 19, S. 25 ff.
- Ferguson, M. (1982), *Die sanfte Verschwörung*, Basel.
- Foerster, H. von (1960), »On Self-Organizing Systems And Their Environments«, in: M.C. Yovits/S. Cameron (Hg.) (1960), *Self-Organizing Systems*, Proceedings of an interdisciplinary Conference, Oxford/London/New York/Paris, S. 31 ff.
- Foerster, H. von (1979), »Cybernetics of cybernetics«, in: K. Krippendorff (Hg.) (1979), *Communication and control in society*, New York, S. 5 ff.
- Foerster, H. von (1984), »Principles of Self-Organization in a Socio-Managerial Context«, in: H. Ulrich/G.J.B. Probst (Hg.) (1984), *Selforganization and Management of Social Systems. Insights, Promises, Doubts, and Questions*, Berlin, S. 2 ff.
- Foerster, H. von/Zopf, G.W. (1962) (Hg.), *Principles on Self-Organization. Transactions of the University of Illinois Symposium on Self-Organization 1961*, erschienen in der Reihe *International Tracts in Computer Science and Technology and Their Application*, Vol. 9, Oxford u.a.
- Franks, J. (1989), »J. Gleick: »Chaos - Making a New Science« (Rezension), in: *The Mathematical Intelligencer*, 11, S. 65 ff.
- Gaponov-Grekhov, A.V./Rabinovich, M.I. (1987), »Nonlinear Physics. Stochasticity and Structures«, in: Y.P. Velikhov et al. (Hg.) (1987), *Physics of the 20th Century. History and Outlook*, Moskau (russ. Original: Moskau 1987), S. 230ff.
- Gardner, H. (1989), *Dem Denken auf der Spur - Der Weg der Kognitionswissenschaft*, Stuttgart.
- Gerok, W. (Hg.) (1989), *Ordnung und Chaos in der unbelebten und belebten Natur* (Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, Freiburg i.Br. 1988), Stuttgart.
- Glaserfeld, H. von (1985), »Einführung in den radikalen Konstruktivismus«, in: P. Watzlawick (Hg.) (1985), *Die erfundene Wirklichkeit*, München/Zürich (2. Aufl.), S. 16 ff.
- Gleick, J. (1988), *Chaos - Die Ordnung des Universums*, München (im amerik. Original: *Chaos - Making a New Science*, New York 1987).
- Günther, G. (1965), *Cybernetics and the Transition from Classical to Trans-Classical Logic*, BCL-Report No. 3.0, Urbana/Ill.
- Günther, G. (1966), *Formal Logic, Totality and the Super-Additive Principle*, BCL-Report No. 3.3, Urbana/Ill.
- Günther, G. (1978/79), *Idee und Grundriß einer nicht-Aristotelischen Logik*, 2 Bde., Hamburg.
- Günther, G. (1976/79/80), *Beiträge zur Grundlegung einer operationsfähigen Dialektik*, 3 Bde., Hamburg.
- Guessous, M. (1971), »Probleme der Instabilität sozialer Systeme«, in: K.H. Tjaden (Hg.) (1971), *Soziale Systeme: Materialien zur Dokumentation und Kritik soziologischer Ideologie*, Neuwied, S. 230 ff.
- Haken, H. (1984), *Erfolgsgeheimnisse der Natur*, Frankfurt a.M./Berlin/Wien.

- Haken, H. (1988), »Entwicklungslinien der Synergetik«, In: *Naturwissenschaften*, 75, S. 163 ff. (I) und S. 225 ff. (II).
- Haken, H./Sauermann H. (1963), »Nonlinear Interaction of Laser Modes«, in: *Zeitschrift für Physik*, 173, S. 261 ff.
- Haken, H./Graham, R. (1971), »Synergetik - Die Lehre vom Zusammenwirken«, in: *Umschau in Wissenschaft und Technik*, 6, S. 191 ff.
- Hauptmeier, H./Schmidt, S.J. (1985), *Einführung in die Empirische Literaturwissenschaft*, Braunschweig/Wiesbaden.
- Hejl, P.M. (1982), *Sozialwissenschaft als Theorie selbstreferentieller Systeme*, Frankfurt a.M.
- Hegel, G.W.F. (1958), »System der Philosophie. 2. Teil: Die Naturphilosophie«, in: *Sämtliche Werke*, Bd. 9, Stuttgart.
- Hess, B./Markus M. (1986), »Chemische Uhren«, in: A. Dress/H. Hendrichs/G. Küppers (Hg.) (1986), *Selbstorganisation - Die Entstehung von Ordnung in Natur und Gesellschaft*, München, S. 61 ff.
- Heuser-Keßler, M.-L. (1986), *Die Produktivität der Natur. Schellings Naturphilosophie und das neue Paradigma der Selbstorganisation in den Naturwissenschaften*, Berlin.
- Heuser-Keßler, M.-L. (1990), »Wissenschaft und Metaphysik. Überlegungen zu einer allgemeinen Selbstorganisationstheorie«, in: W. Krohn/G. Küppers (Hg.) (1990), *Selbstorganisation - Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*, Braunschweig/ Wiesbaden, S. 39 ff.
- Hoffman, L. (1984), *Grundlagen der Familientherapie*, Hamburg.
- Holling, C.S. (1961), »Principles of Insect Predation«, in: *Annual Review of Entomology*, 6, S. 163 ff.
- Holling, C.S. (1965), »The Functional Response of Predators to Prey Density and Its Role in Mimikry and Population Regulation«, in: *Mem. Entomol. Soc. Can.*, 48, S. 1 ff.
- Holling, C.S. (1966), »The strategy of building models of complex systems«, in: K.E.F. Watt (Hg.) (1966), *Systems Analysis in Ecology*, London, S. 195 ff.
- Holling, C.S. (1973), »Resilience and Stability of Ecological Systems«, in: *Ann. Rev. Ecol. and Syst.*, 4, S. 1 ff.
- Holling, C.S. (1976), »Resilience and Stability of Ecosystems«, in: E. Jantsch/C. Waddington (Hg.), *Evolution and Consciousness. Human Systems in Transition*, Reading/Mass. 1976, S. 73 ff.
- Holling, C.S. (1984), *Terrestrial Ecosystems. Local Surprise and Global Change*, Laxenburg, Ms.
- Holling, C.S./Ewing, S. (1971), »Blind Man's Bluff: Exploring the Response Space Generated by Realistic Ecological Simulation Models«, in: *Proc. Intern. Symp. Stat. Ecol.*, 40, New Haven/Conn.
- Holz, H.H. (1958), *Leibniz*, Stuttgart.
- Homans, G.C. (1971), »Systeme beobachtbaren Verhaltens«, in: K.H. Tjaden (Hg.) (1971), *Soziale Systeme: Materialien zur Dokumentation und Kritik soziologischer Ideologie*, Neuwied, S. 138 ff.
- Homans, G.C. (1976), *Theorie der sozialen Gruppe*, Opladen (im amerik. Original: *The Human Group*, New York 1950).

- Jantsch, E. (1979), *Die Selbstorganisation des Universums - Vom Urknall zum menschlichen Geist*, München/Wien.
- Kant, I. (1755), *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels, oder Versuch von Verfassung und dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt*, Berlin.
- Kant, I. (1790), *Kritik der Urteilskraft*, Berlin.
- Köhler, W. (1920), *Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand*, Braunschweig.
- Krohn, W. (1977), »Die »Neue Wissenschaft« der Renaissance«, in: G. Böhme/W. van den Daele/W. Krohn, *Experimentelle Philosophie*, Frankfurt a.M., S. 13 ff.
- Krohn, W. (1989), »Durcheinander und Erkenntnis. Reflexionen zu Chaos und Selbstorganisation«, Bielefeld (unveröffentl. Ms.).
- Krohn, W./Küppers, G./Paslack, R. (1987), »Selbstorganisation - Zur Genese und Entwicklung einer wissenschaftlichen Revolution«, in: S.J. Schmidt (Hg.) (1987), *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*, Frankfurt a.M., S. 441 ff.
- Krohn, W./Küppers, G. (1989), »Rekursives Durcheinander. Wissenschaftsphilosophische Überlegungen«, in: *Kursbuch*, H. 98, S. 69 ff.
- Krüger, F.R. (1984), *Physik und Evolution*, Berlin/Hamburg.
- Kruse, P./Roth, G./Stadler, M. (1987), »Ordnungsbildung und psychophysische Feldtheorie«, in: *Gestalt Theory*, Vol. 9, No. 3/4, S. 150 ff.
- Küppers, B.-O. (1986), *Der Ursprung biologischer Information*, München.
- Küppers, G./Lundgreen, P./Weingart P. (1978), *Umweltforschung - die gesteuerte Wissenschaft?*, Frankfurt a.M.
- Küppers, G./Paslack, R. (1989), »Die Entdeckung des Komplexen - Zur Entstehung und Entwicklung der Theorie der Selbstorganisation«, in: F. Schafstedde (Hg.) (1989), *Der ganze Mensch und die Medizin*, Hamburg, S. 69 ff.
- Kuhn, Th.S. (1973), *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt a.M. (im amerik. Original: *The Structure of Scientific Revolution*, Chicago 1962).
- Landau, L.D./Lifshitz, E.M. (1959), *Fluid Mechanics*, Oxford.
- Leibniz, G.W. (1714), *Monadologie*, Hamburg.
- Liesegang, R.E. (1896), »Über einige Eigenschaften von Gallerten«, in: *Naturwissenschaftliche Wochenschrift*, 11, S. 353.
- Lorenz, E.N. (1963), »Deterministic Nonperiodic Flow«, in: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, S. 448 ff.
- Lorenz, E.N. (1963), »The Mechanics of Vacillation«, in: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, S. 448 ff.
- Lorenz, E.N. (1964), »The Problem of Deducing the Climate from the Governing Equations«, in: *Tellus*, 16, S. 1 ff.
- Lorenz, E.N. (1979), »On the Prevalence of Aperiodicity in Simple Systems«, in: M. Mrgmela/J. Marsden (Hg.) (1979), *Global Analysis*, New York, S. 52 ff.
- Lovelock, J.E. (1972), »Gaia as seen through the atmosphere«, in: *Atmospheric Environment*, 6, S. 579.
- Lovelock, J.E. (1982), *Unsere Erde wird überleben. Gaia - Eine optimistische Ökologie*, München.

- Lovelock, J.E./Margulis, L. (1973), »Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis«, in: *Tellus*, 26, S. 2 ff.
- Lovelock, J.E./Epton, S.R. (1975), »The Quest for Gaia«, in: *New Scientist*, 2.
- Lucretius (1956), *Welt aus Atomen* (lateinisch und deutsch), übers. von K. Büchner, Bibliothek der Alten Welt, Zürich.
- Luhmann, N. (1984), *Soziale Systeme*, Frankfurt a.M.
- Luhmann, N. (1985), »Neue Politische Ökonomie«, in: E. Boettcher/Ph. Herder-Dorneich/K.-E. Schenk (Hg.) (1985), *Jahrbuch für Neue Politische Ökonomie*, Bd. 1-3, *Soziologische Revue*, Nr. 8, Tübingen, S. 110 ff.
- Mach, E. (1910), *Populär-wissenschaftliche Vorlesungen*, Leipzig.
- Mandelbrot, B. (1977), *The Fractal Geometry of Nature*, New York.
- Margalef, R. (1968), *Perspectives in Ecological Theory*, Chicago.
- Margulis, L./Lovelock, J.E. (1974), »Biological modulation of the Earth' atmosphere«, in: *Icarus*, 21, S. 471 ff.
- Maruyama, M. (1963), »The Second Cybernetics: Deviation-Amplifying Mutual Causal Processes«, in: *American Scientist*, 51, S. 164 ff. (wieder abgedruckt in W. Buckley [Hg.] [1969], *Modern System Research for the Behavioral Scientist*, Chicago, S. 304 ff.)
- Maturana, H.R. (1970), »Neurophysiology of Cognition«, in: P. Garvin (Hg.) (1970), *Cognition - A Multiple View*, New York/Washington, S. 3 ff.
- Maturana, H.R. (1970), *Biology of Cognition*, Urbana/Ill. (dt. unter dem Titel »Biologie der Kognition« in: H.R. Maturana, *Erkennen: Die Organisation von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie*, Braunschweig/Wiesbaden 1982, S. 32 ff.).
- Maturana, H.R. (1982), *Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie* (autorisierte deutsche Fassung von W.K. Köck in der von S.J. Schmidt u. P. Finke hg. Reihe: *Wissenschaftstheorie, Wissenschaft und Philosophie*, Bd. 19), Braunschweig/Wiesbaden.
- Maturana, H.R./Lettvin, J./McCulloch, W.S./Pitts, W.H. (1959), »What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain«, in: *Proceedings of the IRE* (Institute of Radio Engineers), Jg. 47, Nr. 11, New York, S. 1940 ff.
- Maturana, H.R./Uribe, G./Frenk S. (1968), »A Biological Theory of Relativistic Colour Coding in the Primate Retina«, in: *Archivos de Biología y Medicina Experimentales*, Suplemento No. 1, Santiago (Chile), S. 1 ff. (dt. unter dem Titel »Eine biologische Theorie der relativistischen Farbkodierung in der Primatenretina«, in: H.R. Maturana, *Erkennen: Die Organisation von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie*, Braunschweig/ Wiesbaden 1982, S. 88 ff.).
- Maturana, H.R./Varela, F.J. (1970), »Time courses of excitation and inhibition«, in: *Exp. Neurol.*, 26, S. 53 ff.
- Maturana, H.R./Varela, F.J./Uribe, R. (1974), »Autopoiesis: The Organization of Living Systems, its Characterization and a Model«, in: *Bio-Systems* 5, S. 187 ff. (dt. unter dem Titel »Autopoiese: Die Organisation lebender Systeme, ihre nähere Bestimmung und ein Modell«, in: H.R. Maturana, *Erkennen: Die Organisation von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie*, Braunschweig/Wiesbaden 1982, S. 157 ff.).

- Maturana, H.R./Varela, F.J. (1975), *Autopoietic Systems. A Characterization of the Living Organization*, Urbana/Ill. (dt. unter dem Titel »Autopoietische Systeme. Eine Bestimmung der lebendigen Organisation«, in: H.R. Maturana, *Erkennen: Die Organisation von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie*, Braunschweig/Wiesbaden 1982, S. 170 ff.).
- Maturana, H.R./Varela, F.J. (1980), *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, erschienen in der Reihe *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Boston.
- May, R.M. (1973), *Model Ecosystems*, Princeton/N.J.
- May, R.M. (1974), »Biological Populations with Nonoverlapping Generations: Stable Points, Stable Cycles, and Chaos«, in: *Science*, 186, S. 645 ff.
- May, R.M. (1976), »Simple Mathematical Models with Very Complicated Dynamics«, in: *Nature*, 261, S. 459 ff.
- May, R.M./Oster, G.F. (1976), »Bifurcations and Dynamic Complexity in Simple Ecological Models«, in: *American Naturalist*, 110, S. 573 ff.
- McCulloch, W.S./Pitts, W.H. (1943), »A Logic Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity«, in: *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 5, S. 115 ff.
- McCulloch, W.S. (1945), »A Hierarchy of Values Determined by the Topology of Nervous Nets«, in: *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 7, S. 89 ff.
- Minorski, N. (1947), *Introduction to Non-Linear Mechanics*, Ann Arbor/ Mich. (Erstausgabe: 1944-46, U.S. Navy).
- Müller, J. (1834-1840), *Handbuch der Physiologie des Menschen*, Berlin.
- Neumann, J. von (1958), *The Computer and the Brain*, New Haven.
- Newton, I. (1687), *Naturalis philosophiae principia mathematica*, London.
- Nicolis, G./Prigogine, I. (1977), *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*, New York.
- Nicolis, G./Prigogine, I. (1987), *Die Erforschung des Komplexen*, München.
- Odum, E.P. (1983), *Grundlagen der Ökologie*, 2 Bde., Stuttgart.
- Parsons, T. (1949), *The Structure of Social Action*, New York.
- Parsons, T. (1951), *Toward a General Theory of Action*, New York.
- Parsons, T. (1966), *Societies*, Englewood Cliffs.
- Parsons, T. (1967), *Sociological Theory and Modern Society*, New York.
- Parsons, T./Smelser, N.J. (1956), *Economy and Society*, London/New York.
- Pask, G. (1968), »A Cybernetic Model for some Types of Learning and Mentation«, in: H.C. Oestreicher/D.R. Moore (Hg.) (1968), *Cybernetic Problems in Bionics*, London.
- Pask, G. (1970), »Cognitive Systems«, in: P. Garvin (Hg.), *Cognition - A Multiple View*, New York/Washington, S. 349 ff.
- Paslack, R. (1987), *Die staatliche hochschulfreie Forschung im Bereich Erderschließung, Umweltschutz und Raumordnung (1870-1980)*, Bielefeld (Science Studies Report, Nr. 31).
- Paslack, R. (1990), »Selbstorganisation und Neue Soziale Bewegungen«, in: W. Krohn/G. Küppers (Hg.) (1990), *Selbstorganisation - Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*, Braunschweig/Wiesbaden, S. 279 ff.
- Paslack, R. (1989), »...da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein«. Die Karriere des Chaos zum Schlüsselbegriff«, in: *Kursbuch*, H. 11, S. 121 ff.

- Paslack, R. (1991), *Selbstorganisation in Wissenschaft und Gesellschaft - Zur Geschichte und Struktur eines neuen Paradigmas*, Ms., Bielefeld.
- Paslack, R./Knost, P. (1990), *Zur Geschichte der Selbstorganisationsforschung - Ideengeschichtliche Einführung und Bibliographie (1940-1990)*, erschienen in der vom Universitätsschwerpunkt Wissenschaftsforschung der Universität Bielefeld hg. Reihe *Report Wissenschaftsforschung*, Bd. 37, Bielefeld.
- Piaget, J. (1966), *Psychologie der Intelligenz*, Stuttgart.
- Piaget, J. (1975), *Gesammelte Werke*, 10 Bde., Stuttgart.
- Platon (1950), »Timaios«, in: *Sämtliche Werke*, dt. von F. Schleiermacher u.a.
- Pöppe, Ch. (1990), »Hat Mandelbrot die Mandelbrot-Menge entdeckt?«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, H. 8, S. 38 f.
- Poincaré, H. (1973), *Wissenschaft und Methode*, Darmstadt (Original: Leipzig/ Berlin 1914).
- Pol, B. van der (1920), »A Theory of the Amplitude of Free and Forced Triode Vibration«, in: *Radio Review*, 1, S. 701 ff.
- Prigogine, I. (1947), *Etude thermodynamique des phénomènes irréversible*, Liège.
- Prigogine, I. (1955), *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, New York.
- Prigogine, I. (1962), *Non-Equilibrium Statistical Mechanics*, New York.
- Prigogine, I. (1967), »Dissipative structures in chemical systems«, in: S. Claessons (Hg.) (1967), *Fast Reactions and Primary Processes in Chemical Kinetics*, Proceedings of the A. Nobel-Symposium, Stockholm/ New York, S. 371 ff.
- Prigogine, I. (1979), *Vom Sein zum Werden*, München.
- Prigogine, I. (1989), »Die Wiederentdeckung der Zeit - Naturwissenschaft in der Welt begrenzter Vorhersagbarkeit«, in: H.-P. Dürr/W.Ch. Zimmerli (Hg.), *Geist und Natur*, Bern/München/Wien 1989, S. 47 ff.
- Prigogine, I./Glansdorff, P. (1971), *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*, London/New York/Sydney/ Toronto.
- Prigogine, I./Stengers, I. (1981), *Dialog mit der Natur*, München.
- Probst, G.J.B. (1987), *Selbst-Organisation. Ordnungsprozesse in sozialen Systemen aus ganzheitlicher Sicht*, Berlin/Hamburg.
- Reiter, G. et al. (Hg.) (1988), *Von der Familientherapie zur systemischen Perspektive*, Berlin/Heidelberg.
- Roux, W. (1880), *Über die Leistungsfähigkeit der Prinzipien der Deszendenzlehre zur Erklärung der Zweckmäßigkeiten des tierischen Organismus*, Breslau.
- Roux, W. (1891), *Der Kampf der Teile im Organismus. Ein Beitrag zur Vervollständigung der mechanischen Zweckmässigkeitslehre*, Leipzig.
- Schelling, F.W.J. (1856-1861), *Sämtliche Werke*, Bd. III, Stuttgart.
- Schmidt, S.J. (1985), »Vom Text zum Literatursystem - Skizze einer konstruktivistischen (empirischen) Literaturwissenschaft«, in: *Einführung in den Konstruktivismus*, Schriften der Carl-Friedrich Siemens Stiftung, Bd. 10, München.
- Schmidt, S.J. (1987), »Der Radikale Konstruktivismus: Ein neues Paradigma im interdisziplinären Diskurs«, in: S.J. Schmidt (Hg.), *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*, Frankfurt a.M. 1987, S. 11 ff.
- Schmidt, S.J. (Hg.) (1987), *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*, Frankfurt a.M.

- Schmidt, S.J. (1989), *Die Selbstorganisation des Sozialsystems Literatur im 18. Jahrhundert*, Frankfurt a.M.
- Schütze, Ch. (1985), »Energie, Entropie. Das Weltgesetz vom Niedergang«, in: *Natur*, 5, S. 43 ff.
- Schultz, J. (1909), *Die Maschinentheorie des Lebens*, Göttingen.
- Schurig, V. (1985), »Die Entdeckung der Systemeigenschaft ›Ganzheit‹«, in: *Gestalt-Theory*, Vol. 7, No. 4, S. 209 ff.
- Segal, L. (1988), *Das 18. Kamel oder Die Welt als Erfindung - Zum Konstruktivismus Heinz von Foersters*, München/Zürich.
- Shannon, C.E./Weaver, W. (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana/Ill.
- Sieferle, R.P. (1989), *Die Krise der menschlichen Natur. Zur Geschichte eines Konzepts*, Frankfurt a.M.
- Sloan Foundation (Hg.) (1978), *Cognitive Science*, New York.
- Smuts, J.Ch. (1925), *Holism and Evolution*, London (dt. Ausgabe: *Die holistische Welt*, Berlin 1938).
- Spemann, H. (1923), *Zur Theorie der tierischen Entwicklung. Rektoratsrede*, Stuttgart.
- Stadler, M. (1981), »Feldtheorie heute - von Wolfgang Köhler zu Karl Pribram«, in: *Gestalt Theory*, Vol. 3, No. 3/4, S. 185 ff.
- Teubner, G. (1989), *Recht als autopoietisches System*, Frankfurt a.M.
- Teubner, G./Willke, H. (1984), »Kontext und Autonomie: Gesellschaftliche Selbststeuerung durch reflexives Recht«, in: *Zeitschrift für Rechtssoziologie*, 5, S. 44 ff.
- Toulmin, S. (1972), *Human Understanding*, Princeton.
- Trepl, L. (1987), *Geschichte der Ökologie*, Frankfurt a.M.
- Turing, A.M. (1952), »The Chemical Basis of Morphogenesis«, in: *Philosophical Transactions*, B 237, S. 37 ff.
- Uexküll, J. von (1909), *Umwelt und Innenwelt der Tiere*, Berlin.
- Varela, F.J. (1975), »A calculus for self-reference«, in: *Int. J. Gen. Systems*, 2, S. 5 ff.
- Varela, F.J. (1979), *Principles of Biological Autonomy*, New York.
- Varela, F.J. (1989), »Über die Natur und die Natur des Erkennens«, in: H.-P. Dürr/W.Ch. Zimmerli (Hg.) (1989), *Geist und Natur*, Bern/München/Wien, S. 90 ff.
- Varela, F.J. (1990), *Kognitionswissenschaft, Kognitionstechnik: eine Skizze aktueller Perspektiven*, Frankfurt a.M.
- Velarde, M.G./Normand, Ch. (1980), »Konvektion«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, H. 9, S. 118 ff.
- Verworn, M. (1894), *Allgemeine Physiologie*, Jena.
- Weidlich, W. (1971), in: *Brit. J. Math. Stat. Psychol.*, 24, S. 251 ff.
- Welsch, W. (1987), *Unsere postmoderne Moderne*, Weinheim.
- Wertheimer, M. (1945), *Productive Thinking*, New York (dt. Ausgabe: *Produktives Denken*, Frankfurt a.M. 1957).
- Whitehead, A. N. (1979), *Prozeß und Realität*, Frankfurt a.M.
- Wiener, N. (1948), *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Cambridge/Mass. (dt. Ausgabe: *Kybernetik, Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und Maschine*, Reinbek b. Hamburg 1963).
- Woldeck, R. von (1989), »Formeln für das Tohuwabohu«, in: *Kursbuch*, H. 98, S. 1 ff.

- Wolschin, G. (1990), »Kometenbahnen und Chaos«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, H. 9, S. 24 f.
- Yorke, J./Li, T.-Y. (1975), »Period Three Implies Chaos«, in: *American Mathematical Monthly*, 82, S. 985 ff.