

Klaus Mainzer:

Laudatio für Hermann Haken

Sehr geehrte Familie Burkhardt,
meine sehr geehrten Damen und Herren,
lieber, sehr verehrter Herr Haken!

Der Arthur-Burkhardt-Preis wird vergeben "für hervorragende wissenschaftliche Beiträge zum Brückenschlag zwischen dem auf Natur, Technik und Medizin gerichteten Denken und jenem, das auf die Lebensbedingungen des Menschen in unserer Gesellschaft zielt". Herr Haken ist bereits Träger hoher Fachauszeichnungen. Dieser Preis aber würdigt in besonderer Weise den fachübergreifenden Aspekt seines wissenschaftlichen Werks.

Im Unterschied zu manchem bedeutenden Physiker, der - wenn ich das einmal etwas ungalant sagen darf - im Alter die Philosophie entdeckt und dann unter Titeln wie zum Beispiel "Meine Weltsicht" Erbauliches verkündet, dessen Beziehung zu den Fachleistungen nur mit Mühe und Wohlwollen herzustellen ist, im Unterschied also zu weltanschaulicher Beliebigkeit und Unverbindlichkeit bietet Hermann Haken ein Forschungsprogramm und eine Forschungsmethode von höchster Aktualität für Natur-, Wirtschafts-, Sozial- und Geisteswissenschaftler.

Gemeint sind seine Verdienste um die Begründung der Synergetik, in der tiefgreifende und verblüffende Analogien zwischen Selbstorganisationsvorgängen in Natur-, Wirtschafts-, Sozial- und Geisteswissenschaften erklärt werden. In einer Zeit, in der Entwicklungen der Natur, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft zunehmend komplexer, unübersichtlicher und unbeherrschbarer werden, zeigt Hermann Haken Problemlösungen durch fachübergreifende Forschungsorientierung auf.

Um aber sogleich Mißverständnissen vorzubeugen: Synergetik meint nicht, daß nun Geist, Gesellschaft und Kultur auf Physik zurückgeführt werden sollen. Das Gespenst des Physikalismus befürchten ja Philosophen seit Jahrhunderten, wenn Physiker ihre Fachgrenzen überschreiten. Synergetik ist auch keine neue Welt- oder Geheimwissenschaft, keine Weltformel, die uns nun endlich eröffnet, was die Welt im Innersten zusammenhält. Synergetik ist ein Modellierungskonzept, das die Entstehung von Ordnungsstrukturen in vielen

komplexen Systemen der belebten und unbelebten Natur, der Wahrnehmung und des Gehirns, der Wirtschaft und Gesellschaft erfolgreich beschreibt.

Wir bleiben also aufgefordert, selber je nach unserer Fachperspektive diese Methode kritisch zu erproben und weiterzuentwickeln, um daraus neue Erkenntnisse, technische Innovationen oder sogar praktische Orientierung für unser Handeln zu gewinnen - gemäß der Devise Kants "Sapere aude! Habe Mut, Dich Deines eigenen Verstandes zu bedienen!"

Am Anfang dieser Entwicklung, der fachübergreifenden Ausbreitung dieses Konzepts, stehen jedoch unser Laureat und seine Stuttgarter Mitarbeiter, in der Sprache der Synergetik eine lokale Fluktuation von "instabilen Moden" (in der Optik z. B. Wellen, hier: Zeitgenossen), die bei "kritischen Werten äußerer Parameter" (z. B. günstigen Forschungsbedingungen in Stuttgart) die vielen übrigen (angeblich) "stabilen Moden" (Zeitgenossen) zu analogen Aktivitäten und zu Kooperation spontan anregen. Kenner der Synergetik wissen, daß ich damit ein Grundprinzip der Synergetik angesprochen habe - das sogenannte "Versklavungsprinzip". Aber wer mag schon gerne von Stuttgart "versklavt" werden (vor allem wegen der Doppeldeutigkeit mit Stuttgart als Regierungssitz)?

Also überlegte ich mir den charmanteren Titel "Hermann Haken - oder der Stuttgarter Schmetterlingseffekt". Der Schmetterlingseffekt, wer weiß es etwa mittlerweile nicht, bezeichnet zunächst nur die Empfindlichkeit und Sensibilität eines komplexen dynamischen Systems wie z. B. einer Großwetterlage. Geringste lokale Veränderungen, ein kleiner nicht beachteter Wirbel auf der Wetterkarte, ein trudelndes Blatt, der Flügelschlag eines Schmetterlings, können globale Veränderung der Großwetterlage auslösen, die sich zwar als neue synergetische Ordnungsstrukturen, aber auch als chaotische Turbulenzen erweisen können. Aber chaotische Turbulenzen wurden ja nun gerade nicht ausgelöst. Darum ziehe ich einen Titel vor, der die Sache trifft und hier vor Ort vom Laureaten selber geprägt wurde. Der folgende Abschnitt lautet: "Hermann Haken - oder der Stuttgarter Synergieeffekt". Im Anschluß daran spreche ich mit Blick auf den gewünschten Brückenschlag des Arthur-Burkhardt-Preises über "Synergetik und die Lebensbedingungen des Menschen in der technisch-wissenschaftlichen Welt".

1. Hermann Haken - oder der Stuttgarter Synergieeffekt

Hermann Haken wurde am 12. Juli 1927 in Dresden geboren. Nach Studium in Halle und Erlangen erwarb er seinen Doktorgrad in Mathematik an der Universität zu Erlangen. 1956 wurde er Dozent für theoretische Physik an dieser Universität. Seit 1960 ist er Ordinarius für theoretische Physik an der Universität Stuttgart. Hier ist der Ort seiner intensiven Forschungsaktivitäten, die in Beiträgen zur Gruppentheorie, der Festkörperphysik, der Laserphysik und nichtlinearen Optik, der statistischen Physik zu chemischen Reaktionsmodellen und Modellen der Morphogenese zum Ausdruck kommen.

Eigene Forschung führte bei Hermann Haken zu einer bald sprichwörtlichen Buchproduktion, die für einen produktiven Naturwissenschaftler absolut ungewöhnlich ist und auch viele Geisteswissenschaftler in den Schatten stellt. Erwähnt seien zunächst die physikalischen Lehrbücher zur Lasertheorie (1970), Quantenfeldtheorie des Festkörpers (1973: engl., russ., japan. Übers.), Licht und Materie I-II (1979-1981), Atom-, und Quantenphysik, 4. Aufl. 1990 (mit H. C. Wolff, engl. Übers.), Light: Waves, Photons, Atoms (1981), Laser Light Dynamics (1985). Über 250 Fachveröffentlichungen liegen mittlerweile vor. 1976 wurde Hermann Haken mit dem Max-Born-Preis und der Max-Born-Medaille durch das British Institute of Physics und die Deutsche Physikalische Gesellschaft für seine hervorragenden Beiträge zur Theorie der angeregten Zustände in Festkörpern und in der Quantenoptik, insbesondere der Lasertheorie ausgezeichnet.

Was nun die Entstehung der Synergetik betrifft, so ist sie selber ein wissenschaftshistorisch und wissenschaftssoziologisch hoch interessanter synergetischer Prozeß. 1975 hatte Herr Haken in den Rev. Mod. Phys. einen Artikel mit dem Titel "Cooperative phenomena in systems far from thermal equilibrium and in nonphysical systems" veröffentlicht. Ein Lektor des Springer-Verlags schlug vor, daraus eine erweiterte Buchfassung zu erstellen. 1976 erschien ein vollständiges neues Manuskript unter dem Titel "Synergetics. An Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology".

Das "heilige Buch" der Synergetiker war erschienen. Der Verlag hatte den kritischen Zeitpunkt im Entwicklungsprozeß richtig erkannt. Die Zeit war reif. Das Buch trat in der Tat eine Forschungs- und Publikationslawine los: Die instabilen Moden taten ihre Wirkung. Übersetzungen erschienen in russisch,

japanisch, chinesisch und ungarisch. Mittlerweile erschien die 3. englische Auflage und von der deutschen Übersetzung 1981 die 2. Auflage.

Das Buch ermittelt nach eigener Ankündigung eine elementare Einführung in die grundlegenden Ideen und mathematischen Hilfsmittel der Synergetik mit zahlreichen Übungsaufgaben, Figuren und Beispielen. "Elementar" bedeutet hier buchstäblich wie bei Euklids bekanntem Lehrbuch, daß die Methode konstruktiv von den "Elementen", den Grundbegriffen her aufgebaut wird, also beginnend mit den Begriffen der Wahrscheinlichkeit und Information, dann der Zufall, die Notwendigkeit, schließlich das Schema der Selbstorganisation mit Anwendungsbeispielen der Physik, Chemie, Biologie, Soziologie und Wirtschaftswissenschaften.

Die Keime zur Geburt der Synergetik liegen vor der kritischen Phase von 1975, nämlich in der Beschäftigung mit Laser- und Festkörperphysik. Das Stuttgarter Hausparadigma für einen physikalischen Selbstorganisationsprozeß ist nämlich der Festkörperlaser. Hermann Haken kommt zunächst das physikalische Verdienst zu, die dramatische Änderung der statistischen Eigenschaften des Laserlichts an der Laserschwelle in einer Arbeit von 1964 zuerst abgeleitet und vorhergesagt zu haben. Die dadurch ausgelöste Grundlagenforschung hat bekanntlich zu folgenschweren technischen Innovationen geführt, die von der segensreichen Anwendung in der Chirurgie über die Informationstechnologie bis zum Krieg der Sterne reicht.

Das Grundprinzip eines Festkörperlasers läßt sich mit einfachen Worten in Erinnerung rufen. Der Festkörperlaser besteht aus einem Materialstab, in den spezifische Atome eingebettet sind. An den Endflächen des Stabes sind Spiegel angebracht. Jedes der Atome kann von außen angeregt werden, z. B. durch Lichtbestrahlung. Das Atom verhält sich dann wie eine mikroskopische Antenne und sendet Lichtwellenzüge aus. Die Spiegel sorgen für die Selektion der Wellenzüge. Solche, die sich längs der Stabachse ausbreiten, werden zwischen den Spiegeln reflektiert und halten sich länger im Laser, während andere ihn schnell verlassen.

Das Gesamtverhalten des Lasers hängt nun von der äußeren Energiezufuhr ab. Bei niedriger Energiezufuhr verhält sich der Laser wie eine normale Glühlampe. Die Atome emittieren unabhängig voneinander statistisch regellos einzelne Lichtwellenzüge. Bei einem kritischen Wert der Energiezufuhr ("Laserschwelle") emittieren die Atome plötzlich kooperativ einen einzigen gigantischen Wellenzug ungeheurer Länge.

Haken schreibt: "Ein unbekannter Dämon scheint die Atome anzuleiten, in Phase zu schwingen." Tatsächlich befehligt aber kein Dämon die einzelnen Atome. Vielmehr haben sich an der kritischen Laserschwelle einige Lichtwellen ("instabile Moden") durchgesetzt und ein kooperatives und einheitliches ("synergetisches") Gesamtverhalten herbeigeführt. Diese "Versklavung" der stabilen durch die instabilen Moden auf der Mikroebene der Atome zeigt sich makroskopisch auf der Ebene unserer Wahrnehmung als gigantischer Wellenzug eines Laserstrahls.

Zunächst scheint diese Selbstorganisation der Atome an ein anderes Verhalten eines Festkörpers zu erinnern. Ich meine den Ferromagneten. Wir können uns den Magneten aus vielen atomaren Elementarmagneten zusammengesetzt vorstellen. Bei hohen Temperaturen zeigen diese Elementarmagnete in verschiedene Richtungen. Ihre magnetischen Momente heben sich also gegenseitig auf, so daß keine makroskopische Magnetisierung auftritt. Bei einer kritischen Abkühlungsgrenze richten sich die Elementarmagnete jedoch spontan in eine Richtung aus, was sich auf der makroskopischen Ebene unserer Wahrnehmung als Magnetisierung des Gesamtstabes zeigt. Wieder führt ein geordnetes Verhalten der Systemelemente auf der Mikroebene bei kritischen Nebenbedingungen zu einem neuen makroskopischen Ordnungsphänomen. Die Physiker sprechen auch von einem Phasenübergang.

Der entscheidende Unterschied ist aber, daß der Laser seine Ordnungsstruktur durch hohe Energiezufuhr fern des thermischen Gleichgewichts, quasi wie ein Lebewesen sein Leben durch Nahrungszufuhr aufrechterhält, während die Ordnungsstruktur des Ferromagneten durch Abkühlung im thermischen Gleichgewicht entsteht, so wie die Struktur einer toten Eisblume im Winter an feuchten Fenstern.

Man unterscheidet deshalb zwischen einer konservativen Selbstorganisation im thermischen Gleichgewicht und einer dissipativen Selbstorganisation fern des thermischen Gleichgewichts. Der Festkörperlaser ist aber nur ein physikalisches Beispiel für das allgemeine Schema von Selbstorganisationsprozessen fern des thermischen Gleichgewichts, das Haken fachübergreifend in seinem Buch "Synergetik" für Physik, Chemie, Biochemie, Biologie und Wirtschaftswissenschaften modelliert.

Die anschaulichen Bezeichnungen wie z. B. "Kooperation", "Selektion", "Versklavung" und "Selbstorganisation" dürfen jedoch nicht als bloß anthropo-

morphe oder biologische Metaphern mißverstanden werden. Dahinter stehen mathematisch wohl definierte Konzepte. Da haben wir zunächst stochastische Bewegungsgleichungen (nichtlineare Differentialgleichung), mit denen das komplexe Verhalten der ungeheuer vielen Systemteile auf der Mikroebene (z. B. Atome, Photonen im Laser) beschrieben wird (z. B. Fokker-Planck-Gleichung, Mastergleichung). Das "Versklavungsprinzip" beruht auf einem Verfahren, das dem Mathematiker unter der zugegebenerweise weniger attraktiven Bezeichnung "adiabatische Elimination der schnell relaxierenden Variablen" bekannt ist.

Gemeint ist, daß bei Veränderung äußerer Parameter dieser Gleichungen (z. B. Energiezufuhr beim Laser) einige Variablen (physikalisch "Moden" wie z. B. Wellenamplituden) derart instabil werden können, daß sie makroskopische Größenordnungen erreichen (z. B. der Wellenzug des Laserstrahls). Sie bestimmen dann ("versklaven") das Gesamtsystem, so daß man die Beschreibung der ungeheuer vielen einzelnen Elemente auf der Mikroebene vernachlässigen ("eliminieren") und sie als makroskopische Ordnungsparameter (z. B. Wellenamplitude des Laserstrahls) verwenden kann.

Da die Relaxationszeiten dieser instabilen Moden sehr groß gegenüber den stabilen sind, könnte man auch in einem anschaulich-biologischen Bild sagen: Selbstorganisation ist die Versklavung kurzlebiger durch langlebige Systeme. Dieser Vorgang ist mit einer großen Reduktion von Komplexität verbunden, d. h. Reduktion der ungeheuer vielen Freiheitsgrade, die ein komplexes System auf der Mikroebene (z. B. Atome und Photonen in einem Laser) hat. Nur noch wenige Variablen bestimmen ja schließlich das Gesamtverhalten.

Ich erwähne das alles deshalb so ausführlich, um deutlich zu machen, daß hinter dem häufig unverstandenen Schlagwort der "Selbstorganisation" wenigstens im Rahmen der Synergetik keine mystischen Kräfte stehen, sondern ein wohl definiertes mathematisches Konzept. Der methodische harte Kern der Synergetik ist jedenfalls, daß man mit entsprechenden Gleichungen und Verfahren eine ziemlich ausgedehnte Klasse von physikalischen, chemischen, biologischen, soziologischen, ökonomischen Systemen modellieren kann. Darüber aber später mehr.

Um zunächst wieder auf den wissenschaftshistorischen und wissenschaftssoziologischen Aspekt bei der Entstehung der Synergetik zurückzukommen, so ist der Erfolg und die Verbreitung dieses Forschungsprogramms sicher auch dadurch zu erklären, daß Hermann Haken Kollegen, Studenten und viele Zeitge-

nossen auf allen Ausbildungsniveaus anzusprechen wußte. Bald nach dem erwähnten Springer-Band schrieb er das Buch "Advanced Synergetics" (1983), in dem die theoretischen und mathematischen Konzepte vertieft untersucht werden. Das Buch ist mittlerweile auch auf russisch und japanisch erschienen.

Eine Popularisierung der Synergetik findet sich in Hakens Buch "Erfolgsgeheimnisse der Natur". Die Sprache ist klar, sachlich und sehr anschaulich, nie aufgesetzt oder überzogen, ein Bestseller in bester populärwissenschaftlicher Tradition großer deutscher Naturwissenschaftler wie z. B. Hermann von Helmholtz, Ernst Mach oder Ludwig Boltzmann. Die deutsche Fassung liegt in 4. Auflage vor. Das Buch wurde in italienisch, englisch, spanisch, japanisch und chinesisches übersetzt.

Um nun die Verbreitung der Synergetik weiter in der Sprache der Synergetik zu beschreiben: Die Forschungs- und Kooperationsaktivität vieler Wissenschaftler unter dem Ordnungsparameter "Synergetik" zeigten sich gewissermaßen makroskopisch in entsprechenden Forschungsinstitutionen. Da ist zunächst das große Stuttgarter Institut für Theoretische Physik und Synergetik. Die VW-Stiftung förderte über 15 Jahre einen überregionalen Schwerpunkt "Synergetik" mit vielen Forschergruppen. Ihre Aktivitäten haben sich in der von Hermann Haken herausgegebenen Springer-Buchserie über Synergetik niedergeschlagen, die 1976 mit dem Einführungsband "Synergetics" eröffnet wurde und mittlerweile ca. 50 Bände umfaßt. Darunter sind viele Bände von fachübergreifenden Tagungen mit Physikern, Mathematikern, Chemikern, Biologen, Medizinern, Psychologen, Kognitions-, Informations-, Computerwissenschaftlern, Soziologen, Ökonomen u. a. Wer das Vergnügen hatte, an einer solchen Tagung teilzunehmen, schätzt ihre inspirierende Atmosphäre und weiß, mit wieviel Geschick diese Forschergruppen von Herrn Haken arrangiert wurden.

Die synergetischen Fluktuationen haben natürlich auch nicht vor der Familie Haken halt gemacht. Mit seiner Tochter Maria Haken-Krell, selber Biologin, verfaßte er 1989 den Band "Entstehung von biologischer Information und Ordnung" und 1992 das Buch "Erfolgsgeheimnisse der Wahrnehmung. Synergetik als Schlüssel zum Gehirn".

Bei so viel breitem Interesse an der Synergetik bleibt die öffentliche Anerkennung für den Vater der Synergetik nicht aus. Nach der erwähnten Max Born Medaille folgte 1981 die Albert-A.-Michelson-Medaille des Franklin-Institutes, Philadelphia, für Pionierleistungen zur Synergetik, 1990 die Max-Planck-Me-

daille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (um nur die mir bekannten Auszeichnungen zu nennen).

Hermann Haken ist korrespondierendes Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (1982), Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher (Leopoldina seit 1982), des Ordens pour le mérite (1984), der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (1988), der Heidelberger Akademie der Wissenschaften (1989), Trägere von Ehrendoktorwürden und und und ...

Worin besteht das Erfolgsgeheimnis der Synergetik? Warum ist die Zeit gewissermaßen reif für ihre Fragestellungen und Methoden? Warum werden Menschen aus unterschiedlichen Ausbildungsrichtungen von diesem Thema angesprochen? Diese Fragen, die unmittelbar mit den Zielen des Arthur-Burkhardt-Preises zusammenhängen, führen mich zu meinem zweiten Vortragsteil:

2. Synergetik und die Lebensbedingungen des Menschen in der technisch-wissenschaftlichen Welt

Die Synergetik bietet eine Methode, um mit den Problemen umzugehen, die durch die Lebensbedingungen des Menschen in der technisch-wissenschaftlichen Welt aufgeworfen werden. In Natur, Wirtschaft und Gesellschaft laufen nämlich Wachstumsprozesse ab, die zunehmend komplexer, unübersichtlicher und unbeherrschbarer werden.

Erinnert sei an das Wachstum der Weltbevölkerung, Krisen nationaler Wirtschaftssysteme, globale Völkerwanderungen, ausgelöst durch krasse Wohlstandsgefälle, Chaos des Verkehrs, Informationsflut der Medien u. a. Analog gibt es in der Natur komplexe Vorgänge wie z. B. die Evolution komplexer Organismen wie das Gehirn, aber auch von Krebstumoren, von Tier- und Pflanzenpopulationen, aber auch von ökologischen Krisen, von einer komplexen lebensspendenden Biosphäre, aber auch von dramatischen Einbrüchen wie das Ozonloch, komplexe Systeme jedenfalls, die ihre eigene Dynamik besitzen, hoch sensibel auf geringste Veränderungen ("Schmetterlingseffekt") reagieren und langfristig nicht prognostizierbar sind.

Die mathematische Chaostheorie und Theorie der Selbstorganisation ("Synergetik") untersuchen die Gesetzmäßigkeiten solcher komplexer nicht-linearer Systeme. Sie unterscheiden sich grundlegend von den linearen Gleich-

gewichtsmoellen, wie sie dem Weltbild der klassischen Physik und Wirtschaftstheorie zugrundeliegen und heute zu falschem Verhalten fñhren. Konkret stellt sich die Frage, in welchem Umfang die Beschäftigung mit komplexen nichtlinearen Systemen Grundlagen und Orientierung geben kann für ein adäquates Handeln im Umgang mit Natur, Technik, Medizin, Wirtschaft und Gesellschaft.

In der Wissenschaftsgeschichte waren Konzepte der Sozial- und Geisteswissenschaften häufig von physikalischen Theorien beeinflusst. Im Zeitalter der klassischen Mechanik beschrieb z. B. Thomas Hobbes den Staat als eine Maschine ("Leviathan") mit seinen Bürgern als Zahnräder. Für Lametrie wurde die menschliche Seele auf die Antriebsvorrichtung eines Uhrwerks reduziert. Adam Smith erklärte den Marktmechanismus durch eine "unsichtbare" Kraft analog der Newtonschen Gravitation.

In der klassischen Mechanik wurde die Natur durch deterministische (Newtonsche oder Hamiltonsche) Bewegungsgleichungen eindeutig bestimmt. Daher wurde sie als konservatives System mit im Prinzip umkehrbarer ("reversibler") Zeitrichtung und Energieerhaltung betrachtet. Die Himmelsmechanik und das Pendel (ohne Reibung) waren prominente Beispiele. Berühmt wurde die Fiktion des Laplaceschen Dämons, wonach jeder zukünftige und vergangene Zustand der Welt eindeutig berechenbar sei, wenn nur der Gegenwartszustand bekannt ist.

Ende des letzten Jahrhunderts erkannte der französische Mathematiker und Philosoph H. Poincaré, daß die Eindeutigkeit mathematischer Naturgesetze nicht gleichbedeutend mit universeller Vorausberechenbarkeit ist. Die kausale Wechselwirkung aller Himmelskörper ist nichtlinear in dem Sinne, daß ihre gegenseitige Gravitationswirkungen sich zu chaotischen Bewegungsbahnen aufschaukeln können. Fast 60 Jahre nach Poincaré's Entdeckung bewiesen Kolmogoroff (1954), Arnold (1963) und Moser ihr berühmtes (nach ihnen benanntes) KAM-Theorem, wonach die Bewegungsbahnen im Phasenraum der klassischen Mechanik weder vollständig regulär noch vollständig irregulär (chaotisch) sind, aber sensibel von den gewählten Anfangsbedingungen abhängen.

Der Himmel als Symbol vollkommener Ordnung, die supralunare Welt des Aristoteles mit ihren vollkommenen Himmelsphären und schließlich der Laplacesche Himmelscomputer erwiesen sich als Fiktionen. Nach dem KAM-Theorem geht es am Himmel zu wie auf der Erde der Menschen: fragile Ord-

nungen auf Zeit und ohne Garantie, Chaos und Symmetriebruch mit eingeschlossen.

In den 20er Jahren dieses Jahrhunderts erhielt das mechanistische Weltbild einen weiteren Stoß durch die Quantenmechanik: Sie wies nach, daß Anfangslage und Anfangsgeschwindigkeit eines Elementarteilchens überhaupt nicht gleichzeitig und beliebig genau gemessen werden können. Die zeitlichen Veränderungen eines Quantensystems sind nur noch mit Wahrscheinlichkeit voraussagbar. Auch in der Quantenwelt der Elementarteilchen dominieren komplexe nichtlineare Wechselwirkungen, kann sogar Chaos ("Quantenchaos") auftreten.

Komplexität und Nichtlinearität ermöglichen Chaos, aber eben auch neue Ordnung in Natur und Gesellschaft. Hier setzt die Synergetik an. Alle makroskopischen Systeme wie Steine oder Planeten, Wolken oder Flüssigkeiten, Pflanzen oder Tiere, Tierpopulationen oder menschliche Gesellschaften bestehen auf der Mikroebene aus Elementen wie Atome, Moleküle, Zellen, Organismen oder Menschen, die in komplexer Weise wechselwirken. Das Verhalten einzelner Elemente ist wegen der ungeheuren Zahl der Freiheitsgrade in einem komplexen System nicht vorhersehbar. Die deterministische Beschreibung einzelner Elemente wird daher durch Evolutionsgleichungen für Wahrscheinlichkeitsverteilungen ersetzt.

Wie bereits erwähnt, entstehen makroskopische Ordnungsstrukturen oder Chaos dieser Systeme durch Veränderungen äußerer Parameter. Konservative Selbstorganisationsprozesse im thermischen Gleichgewicht mit wenig Energie und bei tiefer Temperatur, in der Ordnungsstrukturen wie tote Eisblumen gewissermaßen eingefroren werden, sind in der Physik spätestens seit Boltzmanns Thermodynamik bekannt. Viele physikalische Systeme, wie z. B. der Laser, vor allem aber lebende Organismen, Pflanzen, Tiere, Populationen, Gesellschaften sind offene ("dissipative") Systeme, oder wenigstens Mischformen, die auch im Stoff-, Energie- und Informationsaustausch mit ihrer Umwelt stehen. Die Synergetik beschäftigt sich daher mit der dissipativen Selbstorganisation fern des thermischen Gleichgewichts. Selbstorganisation als traditionelles Kriterium lebender Systeme wird damit relativiert. Seit Aristoteles wurde Leben als Fähigkeit zur "Selbstbewegung" definiert (im Unterschied zum toten Stein, der angestoßen werden muß). Kant stellt mit Recht heraus, daß lebende Systeme nicht nur bewegende Kraft (im Sinne der Mechanik) sondern "organisierende" Kraft benötigen. Leben also nicht als Maschine im Sinne der

klassischen Mechanik verstanden werden könnte und daher ein "Newton des Grashalms" unmöglich wäre.

Für Maxwell und Lord Kelvin war die Entstehung von Ordnung und Leben auf dem Hintergrund einer Thermodynamik des Gleichgewichts nur durch die Annahme von Dämonen erklärbar, die sich gegen den Strom der Entropiezunahme, also gegen den ständigen Zerfall nach dem zweiten Hauptsatz stemmen. Und von Boltzmann bis Monod konnte Leben nur als eine lokale Zufallsfluktuation "am Rande des Universums" in einem global sich im thermischen Gleichgewicht befindlichen Universum verstanden werden.

Ist mit der Synergetik der "Newton des Grashalms" gefunden? Die Synergetik erklärt nicht absolut, was Leben ist. Sie zeigt aber, daß ein klassisches Lebenskriterium wie die Selbstorganisation von Ordnung keineswegs gegen die Gesetze der Physik oder lokaler Zufall sei, sondern bereits in der sogenannten "toten" Materie wie z. B. Licht, Festkörper, Flüssigkeiten, Luftströmungen anzutreffen ist und daß die Emergenz von Pflanzen und Tierformen, von Populations- und Verhaltensformen mit denselben synergetischen Prinzipien erklärt werden kann. Die miteinander ringenden stabilen und instabilen Moden sind nun z. B. inhibitorische und aktivatorische Moleküle, Beute- und Raubtierpopulationen. Die Selbstorganisation bedient sich nun z. B. autokatalytischer Prozesse von Molekülen oder Nahrungs- und Recyclingketten von Populationen. Physik, Chemie, Biologie, ja Medizin wachsen strukturell zusammen. Disziplingrenzen erweisen sich als menschliche und zeitbedingte Richtungen.

Eines der verblüffendsten Anwendungsgebiete der Synergetik betrifft die Evolution des Gehirns mit der Fähigkeit der Wahrnehmung, des Fühlens und des Denkens. Falls das Gehirn als komplexes System von Nervenzellen (Neuronen) aufgefaßt wird, dann lassen sich ihre nichtlinearen Wechselwirkungen auf der Mikroebene durch Evolutionsgleichungen für Neuronen modellieren. Mustererkennung (z. B. die Gestalt von Pflanzen, Tieren oder Menschen) wird als Phasenübergang in Analogie zur Muster- und Formentstehung in der physikalischen, chemischen und biologischen Evolution aufgefaßt. Zelluläre Wechselwirkungen erzeugen makroskopische Verschaltungsmuster von Nervenzellen, die den Gestaltwahrnehmungen entsprechen. Ihre Veränderung wird durch Gleichungen für makroskopische Ordnungsparameter beschrieben.

Nach diesem Schema lassen sich im Rahmen der Computer- und Informationstechnologie neuronale Netze bauen, die selbständig Personenbilder, Unterschriften, Sprachmuster etc. erlernen und teilweise aus Bruchstücken oder Verzerrungen wiedererkennen. Nach dem Versklavungsprinzip entsprechen Bruchstücke eines wiedererkannten Musters nämlich den versklavten Teilsystemen bei der Musterentstehung in der Evolution. Von Virchow wird die zynische Bemerkung berichtet, daß er nun schon Hunderte von Leichen seziiert, aber noch keine "Seele" gefunden habe. Analog meinte schon Leibniz, daß man im Gehirn keinen "Gedanken" finden würde, wenn man es sich wie das Laufwerk einer Mühle vergrößert vorstellt, in die man hineintreten könne, um die Wechselwirkung der Einzelteile wie Zahnräder zu beobachten. Die Synergetik gibt den Hinweis, daß "Gedanken", "Gefühle" und "Bewußtsein" als Ordnungsparameter makroskopischen Zuständen des Gesamtsystems entsprechen und daher natürlich nicht auf der Mikroebene der neuronalen Einzelteile anzutreffen sind.

Erklärt die Synergetik damit den menschlichen Geist? Natürlich ebensowenig wie sie erklärt, was Leben sei. Aber sie zeigt wieder, daß Fähigkeiten wie z. B. Lernen und Wahrnehmung, die traditionell dem menschlichen Geist zugeschrieben wurden, nach analogen Prinzipien technisch simulierbar sind, wie sie aus der physikalischen, chemischen und biologischen Evolution bekannt sind. Geistes- und Naturwissenschaften wachsen zusammen, ohne falsche Reduktionsansprüche zu stellen.

Die gleiche Bemerkung läßt sich für die Sozial- und Wirtschaftswissenschaften machen. Aus der Sicht der Synergetik wird das Verhalten menschlicher Gesellschaften durch die Evolution von (makroskopischen) Ordnungsparametern erklärt (z. B. ökonomische oder soziale Ordnungszustände), die durch nichtlineare Wechselwirkungen von Menschen oder Untergruppen (z. B. Staaten, Institutionen, Firmen) auf der Mikroebene verursacht werden.

So wurden bereits Wachstumsmodelle von Städten untersucht. Auf der Mikroebene werden regionale Populationsentwicklungen angenommen, deren nichtlineare Wechselwirkung in Abhängigkeit von z. B. Kapazitäts-, Verkehrs-, Freizeit-, Wirtschaftsfaktoren auf der Makroebene zu sich verändernden Siedlungsbildern führen. Wichtige Erkenntnis: Es entstehen systembedingte (synergetische) Effekte, die nicht allein von den guten oder schlechten Intentionen der einzelnen Individuen auf der Mikroebene abhängen.

Migrationsmodelle von nationalen und internationalen Wanderungsströmen sind besonders dramatische Beispiele der Gegenwart, um synergetische Effekte zu erkennen. Für den einzelnen Politiker reicht es daher nicht, gute Absichten zu haben, ohne die nichtlinearen Wechselwirkungen seiner Entscheidungen zu bedenken. Lineares Denken und Handeln kann globales Chaos produzieren, obwohl lokal vielleicht die besten Absichten vorlagen.

Schon Adam Smith wußte, daß die Versorgung mit preiswerten und guten Lebensmitteln nicht allein vom guten Willen der einzelnen Bäcker und Metzger abhängt. Die von ihm angenommene "unsichtbare Hand", die das Verhalten von Produzenten und Konsumenten auf das ökonomische Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage führt, ist natürlich auch kein "ökonomischer Dämon", sondern das Ergebnis eines komplexen Wechselwirkungsprozesses. Allerdings gehen die Klassiker der Ökonomie wie die Klassiker der Physik in der Regel von linearen Gleichgewichtsmodellen aus.

Mit den neuen Wachstumsindustrien z. B. der Elektronik-, Computer- und Informationstechnologien, die nicht von abnehmenden Naturressourcen wie z. B. die klassische Stahl- und Kohleindustrie abhängen, sondern von wachsendem Wissen und Know-how, ergeben sich neuartige Verstärkungs- und Rückkoppelungseffekte. Weitere Beispiele für den "ökonomischen Schmetterlingseffekt" sind kurzfristige Schwankungen von Konsumentenpräferenzen, unflexibles Reagieren im Produzentenverhalten, aber auch Spekulationen auf Rohstoff- oder Grundstücksmärkten. Daß Fluktuationen im kleinen sich einerseits zu Wachstumsschüben, im großen selber organisieren können (z. B. bei technischen Innovationen), andererseits aber zu chaotischen unkontrollierbaren Verhalten aufschaukeln können (z. B. Börsenkrach), ist unsere alltägliche Erfahrung.

Selbst auf betrieblicher Ebene hat die Synergetik, so denke ich, etwas zu sagen. Ein deterministisch-algorithmisches Konzept innerbetrieblicher Funktionen, wie es im Taylorschen System entwickelt worden war, taugt ausschließlich für die Situation des ungelerten Arbeiters, der bei der Entwicklung standardisierter Produkte genormte Einzelhandlungen fließbandmäßig durchzuführen hat. In den heute vorliegenden betrieblichen Situationen komplexer wissensbasierter Systeme wird dagegen Urteilsvermögen jedes einzelnen Mitarbeiters zu einem entscheidenden Antriebsfaktor betrieblicher Innovation. Freie Meinungsfluktuation ist soweit als möglich zuzulassen und führt im Zuge der innerbetrieblichen Selbstorganisationsmechanismen weit öfter zur Ausbildung neuer, situationsangepaßter Ordnungsstrukturen, als gemeinhin ange-

nommen wird. Aber das starre lineare Denken von Bürokratie steht hier wie überall dieser Entwicklung häufig entgegen.

Synergetik zeigt aber auch, daß ökonomische Prozesse in die ökologischen Kreisläufe der Natur eingebettet sind. Es muß daher ein Hauptziel der Politik werden, ein nichtlineares komplexes System von Ökonomie und Ökologie zu schaffen, das den labilen Gleichgewichten zwischen menschlicher Gesellschaft und Natur Rechnung trägt.

Synergetik ist also zunächst eine fachübergreifende Methode, um das Auftreten makroskopischer Phänomene bei komplexen Systemen durch die nichtlineare Wirkung ihrer Elemente zu erklären. Makroskopische Phänomene können Formen von Lichtwellen, Flüssigkeiten, Wolken, chemische Wellen, Biomoleküle, Pflanzen, Tiere, Populationen, zerebrale Schaltungsmuster, Märkte, soziale Ordnungen usw. sein, die durch Ordnungsparameter beschrieben werden. Darüber hinaus sagt uns aber diese Methode auch, daß wir unser Verhalten in einer komplexen und nichtlinearen Welt ändern müssen.

Lineares Denken ist gefährlich in Ökologie und Ökonomie. Unsere Ärzte und Psychologen müssen lernen, den Menschen als einen komplexen, sensiblen und einheitlichen Organismus mit seiner Umwelt zu betrachten, in dem sich einzelne Organe nicht isolieren lassen. Krankheit ist kein regelloses Chaos und Gesundheit keine funktionierende Pendeluhr, sondern labile Gleichgewichtszustände komplexer Systeme. In Politik und Geschichte muß bewußt werden, daß lineare Monokausalität zu Dogmatismus, Intoleranz und Fanatismus führen kann. Da die ökologischen, ökonomischen und politischen Probleme global und komplex, also durch nichtlineare Wechselwirkung der vielen bestimmt sind, wird das traditionelle Konzept individueller Verantwortung fragwürdig. Wir benötigen neue Modelle kollektiven Verhaltens, die von verschiedenen Graden individueller Fähigkeiten und Einsichten abhängen.

Hermann Haken hat einmal konkret gefordert, daß sich eine große Zahl von Experten in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik ständig bereithalten sollten, in konzertierten Aktionen auf jeweils neu eintretende Situationen sachgemäß zu reagieren. Das erfordert nicht nur Sachkenntnis, sondern auch Sensibilität und Fingerspitzengefühl, da zu starkes Eingreifen zu Überreaktionen führen kann und das System buchstäblich von einem chaotischen Zustand in den nächsten stoßen kann. An diesen Überlegungen wird deutlich, in welchem Ausmaß Hermann Hakens Synergetik den Brückenschlag zwischen dem auf Natur, Technik und Medizin gerichteten Denken und jenem, das auf die Lebensbedingungen

des Menschen in unserer Gesellschaft zielt, leistet. In diesem Sinne wird er, so denke ich, in hervorragender Weise dem Anliegen des Arthur-Burkhardt-Preises gerecht.

Literatur

- H. Haken: Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium Phase Transition and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1983.
- H. Haken: Advanced Synergetics. Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1983.
- H. Haken (Ed.): Synergetics: Buchreihe im Springer-Verlag.
- H. Haken: Erfolgsgeheimnisse der Natur. Stuttgart 1981.
- K. Mainzer: Symmetrien der Natur. Ein Handbuch zur Natur- und Wissenschaftsphilosophie. Berlin/New York 1988 (engl. Symmetries of Nature, New York 1994).
- K. Mainzer: Computer - Neue Flügel des Geistes? Berlin/New York 1993.
- K. Mainzer: Complexity and Evolution. Principles of Complex Systems in Natural and Social Sciences. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1994.
- K. Mainzer: Philosophical Foundations of Nonlinear Complex Systems. In: H. Haken/A. Mikhailov (Hrsg.), Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Complex Systems. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1993.