

Was sind komplexe Systeme?

Komplexitätsforschung als integrative Wissenschaft

Prof. Dr. Klaus Mainzer
Lehrstuhl für Philosophie und Wissenschaftstheorie
Institut für Interdisziplinäre Informatik
Universität Augsburg

Abstract: Im Zeitalter der Globalisierung werden die Lebensbedingungen der Menschen immer komplexer und unübersichtlicher. Täglich erleben wir die labilen Gleichgewichte in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Einige Länder fürchten den Verlust gewohnter Besitzstände und den Absturz ins Chaos. Andere sehen die Chancen kreativer Innovation und den Aufbruch zu neuen Märkten. Chaos, Ordnung und Selbstorganisation entstehen nach den Gesetzen komplexer dynamischer Systeme – in der Natur und der Gesellschaft. Komplexe dynamische Systeme werden bereits erfolgreich in Technik- und Naturwissenschaft untersucht – von atomaren und molekularen Systemen in Physik und Chemie über zelluläre Organismen und ökologische Systeme der Biologie bis zu neuronalen Netzen der Gehirnforschung und den Computernetzen im Internet. Mittlerweile werden auch Anwendungen in Wirtschafts- und Sozialwissenschaften diskutiert. Was können wir aus Chaos, der Entstehung von Ordnung und Selbstorganisation in der Natur lernen? Welche Konsequenzen lassen sich für das Komplexitätsmanagement in Unternehmen, Firmen, und Verwaltungen ziehen? Welche Perspektiven ergeben sich für Länder, Kulturen und Religionen in Asien und Europa? In der Diversität moderner Welt bietet die Komplexitätsforschung Integration oder – mit den Worten von Leibniz – „Einheit in der Vielheit“.

1. Was heißt Chaos, Komplexität und Nichtlinearität?

Nach I. Newton (1643-1727) sind alle physikalischen Wirkungen durch Kräfte als ihren Ursachen eindeutig determiniert. Ziel der Naturforschung („*philosophia naturalis*“) ist es, diese Kräfte durch mathematische Gesetze („*principia mathematica*“) zu bestimmen, um damit alle beobachtbaren, vergangenen und zukünftigen physikalischen Ereignisse erklären und berechnen zu können. 100 Jahre später wird daraus bei P.-S. de Laplace (1747-1827) der Glaube an eine omnipotente Berechenbarkeit der Natur, wenn im Idealfall („*Laplacescher Geist*“) alle Kraftgesetze und Anfangsbedingungen bekannt wären.

Diese Annahme gilt sicher für lineare dynamische Systeme wie einen harmonischen Oszillator. Bei einer Masse, die an einer Feder befestigt ist, führt eine kleine Auslenkung zu einer kleinen Schwingung, während eine große Auslenkung eine große Schwingung als Wirkung verursacht. Ursachen und Wirkungen sind in diesem Fall ähnlich. Mathematisch erhalten wir dann eine lineare Gleichung. Eine Lösung dieser Bewegungsgleichung lässt sich als Zeitreihe des Orts in Abhängigkeit von der Zeit darstellen. Dieser regulären Schwingung entlang der Zeitachse entspricht eine geschlossene Bahn („*Trajektorie*“) im Phasenraum, in dem alle Zustände des dynamischen Systems als Punkte dargestellt sind. Im Phasenraum erkennen wir also die Dynamik eines linearen Oszillators vollständig, wie der *Laplacesche Geist*. Eine Kausalitätsanalyse ist in diesem Fall nicht nur vollständig durchführbar, sondern auch berechenbar.

Aus der Mathematik wissen wir: Lineare Gleichungen sind leicht zu lösen. Nichtlineare Gleichungen erlauben aber nicht immer beliebig genaue Berechenbarkeit, selbst mit unsern besten Computern. Ein Beispiel sind die Mehrkörperprobleme der Himmelsmechanik, bei denen mehr als zwei Himmelskörper

gravitativ aufeinander einwirken. H. Poincaré (1892) zeigt erstmals, dass bei einem nichtlinearen Mehrkörperproblem chaotisch instabile Bahnen auftreten können, die empfindlich von ihren Anfangswerten abhängen und langfristig nicht vorausberechenbar sind. Schließlich bewiesen A. N. Kolmogorov (1954), V. I. Arnold (1963) und J. K. Moser (1962) ihr berühmtes KAM-Theorem: Trajektorien im Phasenraum der klassischen Mechanik sind weder vollständig regulär noch vollständig irregulär, sondern hängen empfindlich von den gewählten Anfangsbedingungen ab. Winzige Abweichungen von den Anfangsdaten führen zu völlig verschiedenen Entwicklungstrajektorien („Schmetterlingseffekt“). Daher können die zukünftigen Entwicklungen in einem chaotischen (Hamiltonschen) System langfristig nicht vorausberechnet werden, obwohl sie mathematisch wohl definiert und determiniert sind.

Ein anderer Weg zu dieser Komplexität wurde ebenfalls im 19. Jahrhundert gelegt. P. F. Verhulst untersuchte 1845 eine nichtlineare Differenzgleichung, um das Wachstum von Populationen in nachfolgenden Generation in Abhängigkeit von einem Wachstumsparameter zu berechnen. Die Zeitreihen der Verhulst-Dynamik zeigen für schwaches Wachstum eine S-förmige Kurve mit der Sättigung in einer Gleichgewichtspunkt, für stärkeres Wachstum eine Oszillation zwischen zwei Populationsgrößen und bei starkem Wachstum völlig irreguläre chaotische Schwankungen. Im Zustandsraum sieht man anschaulich, wie die Dynamik der Trajektorie im 1. Fall auf einen Fixpunktattraktor zielt und im 2. Fall zwischen zwei Zuständen schwankt. Im 3. Fall führen selbst eng benachbarte Anfangswerte nach wenigen Iterationsschritten zu irregulär auseinanderlaufenden Trajektorien. Im Computermodell führen dann geringste Veränderungen von digitalisierten Anfangsdaten zu einer exponentiell wachsenden Rechenzeit zukünftiger Daten, die Langzeitprognosen praktisch ausschließt. Man beachte: Dieses nichtlineare Wachstumsgesetz ist mathematisch vollständig determiniert. Es geht also um Grenzen der praktischen Berechenbarkeit von Wirkungen aus Ursachen bei nichtlinearer Dynamik.

2. Komplexität und Selbstorganisation in der Natur

Nichtlineare Dynamik führt jedoch nicht nur zu Chaos, sondern ermöglicht auch Selbstorganisation von Ordnung in komplexen Systemen. Dabei kommt es zu charakteristischen Rückkopplungen von Systemelementen, bei denen Wirkungen von Ursachen selber wieder zu Ursachen werden, um ihre Ursachen zu beeinflussen. So entstehen makroskopische Strukturen, die nicht durch die Systemelemente vorgegeben sind, aber durch ihre Wechselwirkung bei geeigneten Anfangs- und Nebenbedingungen (d.h. Einstellung von Kontrollparametern) möglich werden. Man spricht dann auch von Emergenz von Ordnung. Beispiel: In Gasen wirken gestoßene Moleküle ihrerseits wieder auf die sie stoßenden Moleküle ein und erzeugen bei veränderter Temperatur unterschiedliche Aggregatzustände. In der Chemie reproduzieren autokatalytische Stoffe sich selber und erzeugen bei geeignetem Stoff- und Energieaustausch (Metabolismus) organische Lebensfunktionen. Die Zirkelkausalität dieser vielfältigen Wechselwirkungen wird mathematisch durch gekoppelte nichtlineare Gleichungen der einzelnen Systemelemente ausgedrückt.

Allgemein besteht ein komplexes dynamisches System aus einer großen Anzahl von Elementen. Die mikroskopischen Zustände der Elemente bestimmen den makroskopischen Zustand des Systems. So ist in einem Planetensystem der Zustand eines Planeten zum einem Zeitpunkt durch seinen Ort und seine Geschwindigkeit bestimmt. Es kann sich aber auch um den Bewegungszustand eines Moleküls in einem Gas, den Erregungszustand einer Nervenzelle in einem neuronalen Netz oder den Zustand einer Population in einem ökologischen System handeln. Die Dynamik des Systems, d.h. die Änderung der Systemzustände in der Zeit, wird durch Differentialgleichungen beschrieben, wobei jeder zukünftige Zustand durch den Gegenwartszustand eindeutig bestimmt ist. Statt kontinuierlicher Prozesse lassen sich auch diskrete Prozesse als

Änderung der Systemzustände in Zeitschritten durch Differenzgleichungen untersuchen. Die gleichzeitige Wechselwirkung vieler Elemente wird durch nichtlineare Funktionen erfasst. Zufallereignisse (z.B. Brownsche Bewegung) werden durch zusätzliche Fluktuationsterme berücksichtigt. Bei stochastischen Prozessen geht es um die zeitliche Veränderung von Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen von Zuständen, die z.B. durch eine Mastergleichung beschrieben werden.

Die Thermodynamik untersucht komplexe Systeme (z.B. Flüssigkeiten, Gase) aus vielen Elementen (z.B. Atome, Moleküle) mit vielen Freiheitsgraden der Bewegung. Makroskopische Zustände des Systems (z.B. Wärme) werden auf mikroskopische Wechselwirkungen der Elemente zurückgeführt und nach den Gesetzen der statistischen Mechanik erklärt. Die Thermodynamik bietet viele Beispiele von komplexen Systemen, deren Elemente sich unter geeigneten Nebenbedingungen zu neuen Ordnungen selbstständig zusammenfügen. Ein alltägliches Beispiel ist ein Regentropfen auf einem Blatt mit seiner perfekten glatten Oberfläche. Die Wassermoleküle am Rand des Tropfens befinden sich in einem höheren Energiezustand als im Innern. Da das System nach den Gesetzen der Thermodynamik einen Zustand niedrigster Gesamtenergie einnehmen muss, minimiert der Tropfen die Ausdehnung seiner energiereichen Oberfläche und bildet so seine makroskopische Form. Bekannt sind auch die Eisblumen, zu denen sich Wassermoleküle in der Nähe des thermischen Gleichgewichts zusammenfügen.

Ein Ferromagnet lässt sich als ein komplexes System aus vielen kleinen Dipolen ('Spins') auffassen, die in zwei Richtungen 'up' (\uparrow) oder 'down' (\downarrow) zeigen können. Der Ordnungsparameter des Systems ist durch die Durchschnittsverteilung der Spinrichtungen bestimmt. Im Zustand niedrigster Energie zeigen die Spins alle in dieselbe Richtung. In diesem Fall ist das System magnetisiert. Bei sehr hoher Temperatur (jenseits des Curie-Punktes) ist die Verteilung der Spinrichtung zufällig und irregulär. In diesem Fall ist

die thermische Energie als Ursache von Fluktuationen größer als die Energie der Wechselwirkungen. Wird die Temperatur als Kontrollparameter des Systems gesenkt, dann strebt das System einem Gleichgewichtszustand kleinster Energie am Curie-Punkt zu, in dem die Dipole das reguläre Ordnungsmuster der gleich ausgerichteten Dipole bilden.

Isolierte Systeme ohne Stoff- und Energieaustausch mit ihrer Umwelt streben nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik von selbst in den Gleichgewichtszustand maximaler Entropie (z.B. strukturlose, irreguläre Verteilung der Gasmoleküle in einem isolierten Behälter). Abgeschlossene („konservative“) Systeme ohne Stoff-, aber mit Energieaustausch mit ihrer Umwelt hängen von einem Kontrollparameter (z.B. die Temperatur bei einem Ferromagneten) ab. In der Nähe des thermischen Gleichgewichts fügen sich die Systemelemente bei Absenkung auf einen kritischen Wert von selbst zu Ordnungs- bzw. Aggregatzuständen niedriger Entropie und Energie zusammen. Diese Phasenübergänge lassen sich nach L. D. Landau durch Ordnungsparameter charakterisieren wie die Verteilung von Dipolzuständen bei Ferromagneten. Phasenübergänge von abgeschlossenen Systemen in der Nähe des thermischen Gleichgewichts werden auch als konservative Selbstorganisation bezeichnet.

Dieses Prinzip der Selbstorganisation, wonach sich Atome, Moleküle und Molekülverbände selbstständig zu wohlgeordneten und funktionierenden Einheiten zusammenfügen, findet bereits technische Anwendung in der Materialforschung. Bei der Fertigung von Halbleiter-Kristallen wird davon ausgegangen, dass sich Silicium- und Dotier-Atome von selbst in der gewünschten Weise anordnen. Durch Selbstorganisation bilden sich z.B. winzige Graphittröhen von einigen Millionstel Millimeter Durchmesser (Nanoröhen), die zu den kleinsten jemals hergestellten elektrischen Drähten gehören. Im Computerbau werden mit zunehmender Miniaturisierung Chips notwendig, deren winzige Bauteile durch keine Maschine zusammengesetzt werden können. Sie müssten sich

selber nach den Gesetzen der Selbstorganisation zu größeren Funktionseinheiten zusammenlagern. Wie wir später sehen werden, gelten die Gesetze konservativer Selbstorganisation formal häufig auch, wenn die physikalischen Größen durch chemische, biologische, medizinische oder technische Größen ersetzt werden.

Fern des thermischen Gleichgewichts hängen Phasenübergänge von hochgradig nichtlinearen und dissipativen Mechanismen ab. Makroskopische Ordnungsstrukturen entstehen durch komplexe nichtlineare Wechselwirkungen mikroskopischer Elemente, wenn der Stoff- und Energieaustausch des offenen (dissipativen) Systems mit seiner Umwelt kritische Werte erreicht. In diesem Fall wird die Stabilität der Ordnungsstrukturen durch eine gewisse Balance von Nichtlinearität und Dissipation garantiert. Zu starke nichtlineare Wechselwirkung oder Dissipation würde die Ordnung zerstören. Emergenz von Ordnung ist also nichts Mystisches, sondern lässt sich mathematisch präzise durch nichtlineare Dynamik erklären: Das „Ganze“ der neuen Ordnung ist eben „mehr“ als die Summe ihrer „Teile“ bzw. Systemelemente. Bei linearer Dynamik wäre der makroskopische Zustand nur die Summe seiner Teile.

Ein bekanntes Beispiel ist das Bénard-Experiment, wobei eine Flüssigkeitsschicht von unten im Gravitationsfeld erwärmt wird. Bei geringer Temperaturdifferenz mit der Oberfläche wird die Wärme durch Wärmeleitung transportiert, die viskosen Kräfte gewinnen und die Flüssigkeit bleibt in Ruhe. Erreicht der Kontrollparameter der Temperaturdifferenz einen kritischen Wert, beginnt eine makroskopische Rollbewegung der Flüssigkeit. Dieses geordnete dynamische Muster von Konvektionsrollen wird also durch äußere Energiezufuhr jenseits des thermischen Gleichgewichts aufrechterhalten. Es kommt zu einer räumlichen Symmetriebrechung der beiden möglichen Rollrichtungen, die sich aufgrund geringster Anfangsfluktuationen aufbauen und daher nicht vorausgesagt werden können. Anschaulich lässt sich ein Bifurkationsschema angeben, in dem der thermodynamische Zweig minimaler Entropieerzeugung instabil wird und zwei mögliche

stationäre (lokale) Ordnungsmuster auftreten können - die links- oder rechtsdrehenden Konvektionsrollen. Treibt man die Erwärmung noch weiter und damit das System immer weiter fort vom thermischen Gleichgewicht, entstehen zunächst quasi-oszillierende Wirbel und schließlich völlig irreguläre und chaotische Strömungen. Die nichtlinearen Gleichungen des Bénard-Experiments wurden von E. N. Lorenz (1964) auch verwendet, um die Dynamik des Wetters und der Atmosphäre zu modellieren.

Allgemein verstehen wir unter offenen (,dissipativen') Systemen solche komplexen Systeme, die im Stoff- und Energieaustausch mit ihrer Umwelt sind. Selbstorganisation und Emergenz von Ordnung lässt sich in mathematischer Analyse auf eine nichtlineare Zirkelkausalität der Systemelemente zurückführen. Das Standardverfahren dazu ist eine lineare Stabilitätsanalyse. Man untersucht das Verhalten des Systems in der Nähe eines Instabilitätspunktes. Nach Änderung eines stationären Zustands lässt sich das Verhalten der einzelnen Systemelemente unterscheiden. Bei einer kleinen Änderung weisen die meisten Moden der Systemelemente nur geringe Abweichungen auf. Einige Moden potenzieren sich allerdings zu großen Amplituden auf, die auf das Gesamtverhalten der Systemelemente zurückwirken. Sie werden daher als Ordnungsparameter bezeichnet, die neue makroskopische Strukturen, Muster oder Trends erzeugen. Anschaulich gesprochen brechen alte Ordnungen in der Nähe von Instabilitätspunkten zusammen, und neue Ordnungen organisieren sich aufgrund der beschriebenen Zirkelkausalität zwischen Systemelementen und Ordnungsparametern selber.

Bei weiterer Veränderung des Kontrollparameters kann die Dynamik eines offenen Systems immer neue lokale Gleichgewichtszustände einnehmen, die wieder instabil werden. Man denke etwa an die verschiedenen Oberflächenmuster, die ein Fluss hinter einem Brückenpfeiler in Abhängigkeit von der steigenden Flussgeschwindigkeit als Kontrollparameter bilden kann. Sie reichen von einem homogenen (Fixpunkt-) Zustand über

oszillierende und quasi-oszillierende Wirbel bis zur chaotischen Turbulenz. Man spricht auch von den Attraktoren eines dissipativen Systems, das vom thermodynamischen Gleichgewicht immer weiter fortgetrieben wird. Die entsprechenden Phasenübergänge werden als dissipative Selbstorganisation bezeichnet.

Die Beschreibung der makroskopischen Dynamik durch Ordnungsparameter bedeutet eine erhebliche Reduktion von Komplexität gegenüber der Mikroebene. Die Anzahl der Ordnungsparameter ist nämlich wesentlich kleiner als die Anzahl der Mikrozustände (z.B. einzelner Moleküle), die den Gesamtzustand eines komplexen Systems auf der Mikroebene bestimmen. In seinem Konzept der Synergetik spricht H. Haken (1983) anschaulich von einer ‚Versklavung‘ der Mikrozustände durch die Ordnungsparameter in der Nähe von Instabilitätspunkten. Dabei unterscheidet sich die Zeitskalierung auf der Makro- und Mikroebene insofern, als Ordnungsparameter nach Störungen langsamer relaxieren als die sich rasch verändernden Mikrozustände.

In der Chemie kann wie in der Physik die Entstehung von Ordnung in komplexen Systemen in der Nähe und fern des thermischen Gleichgewichts unterschieden werden. In der Nähe des thermischen Gleichgewichts geht es z.B. um die Entstehung von Kristallen und Festkörpern. In offenen (dissipativen) chemischen Systemen können Phasenübergänge wie in der Physik zu immer komplexeren makroskopischen Mustern stattfinden, die durch nichtlineare chemische Reaktionen in Abhängigkeit von einer äußeren Zu- und Abfuhr von Stoffen („Kontrollparameter“) ausgelöst werden. So treten bei der Belousov-Zhabotinski („BZ“)-Reaktion konzentrisch pulsierende Ringe auf, wenn von außen energiereiche Substanzen bis zu einem kritischen Kontrollwert zugeführt werden. Es handelt sich um ein dissipatives dynamisches Ordnungsmuster eines offenen Systems, das bei einem kritischen Kontrollwert von außen aufrechterhalten werden muss. Der Wettbewerb der isolierten Ringe veranschaulicht die Nichtlinearität dieses Prozesses, da bei Linearität die Wellen sich wie in der Optik

überlagern („superponieren“) würden. Auch in diesem Fall kann das System durch Zufuhr von Energie immer weiter vom thermischen Gleichgewicht fortgetrieben werden, bis schließlich völlig irreguläre und chaotische Muster auftreten.

Die Komplexität chemischer Reaktionen fern des thermischen Gleichgewichts lässt sich durch Bifurkationsdiagramme veranschaulichen. In einem kritischen Abstand vom Gleichgewichtspunkt wird der thermodynamische Zweig der minimalen Energieproduktion (lineare Thermodynamik) instabil und verzweigt sich zu neuen möglichen lokal stabilen Zuständen (Symmetriebrechung). Damit beginnt, wie I. Prigogine zeigte, die nichtlineare Thermodynamik des Nichtgleichgewichts wie z.B. der Grenzyklus einer chemischen Oszillation. Treibt man die nichtlinearen Reaktionen immer weiter vom Gleichgewichtszustand, entsteht ein zunehmend komplexeres Verzweigungsschema mit neuen möglichen lokalen Gleichgewichtszuständen bis hin zum Chaos. Diese lokalen Gleichgewichtszustände sind mit der „Emergenz“ von neuen Phänomenen (z.B. Strömungsmustern, Attraktoren) verbunden. Tatsächlich handelt es sich mathematisch um nichts anderes als das Auftreten neuer Lösungen nichtlinearer Differentialgleichungen, wenn die Kontrollparameter entsprechende kritische Werte einnehmen.

Offene physikalische und chemische Systeme zeigen also Eigenschaften, die wir auch lebenden Systemen zuschreiben. Es findet ein Stoff- und Energieaustausch („Metabolismus“) mit der Umwelt statt, der das System von Tod und Erstarrung im thermischen Gleichgewicht fern und die Ordnung des Systems aufrecht erhält. Die Ordnungen entstehen durch ‚Selektion‘ und ‚Kooperation‘ der Systemteile bei geeigneten Bedingungen. Geringste Fluktuationen („Mutationen“) können zu globalen Veränderungen des Gesamtsystems führen. Im Unterschied zu den Mustern dissipativer Systeme in Physik und Chemie brechen aber z.B. lebende Zellen und Organismen nicht spontan zusammen, wenn die Stoff- und Energiezufuhr kurzfristig unterbrochen wird.

Konservative Strukturen in (teilweise) abgeschlossenen Systemen sind also für die Lebenserhaltung ebenfalls unerlässlich. Für die Emergenz von Lebensprozessen ist also keine besondere Kausalität notwendig, wie in der Tradition immer angenommen wurde. Zu dieser Annahme werden wir nur genötigt, wenn wir Kausalität linear wie die traditionelle Mechanik des 17. und 18. Jahrhunderts verstehen.

Für die Erklärung von Lebensentstehung und Lebenserhaltung reichen die Gesetze der Thermodynamik allerdings nicht aus. Bei der zellulären Selbstorganisation sind die Anweisungen für den Aufbau des Systems in den Bausteinen selbst (d.h. der molekularen DNS-Struktur der Zelle) verschlüsselt. Man spricht daher auch von einer genetisch kodierten Selbstorganisation der biologischen Evolution im Unterschied zur thermodynamischen Selbstorganisation. In der präbiotischen Evolution geht es um die spannende Frage, wie die thermodynamische Selbstorganisation physikalischer und chemischer Systeme nahe und fern des thermischen Gleichgewichts schließlich den Weg zur kodierten Selbstorganisation der biologischen Evolution fand. Die thermodynamische Selbstorganisation liefert nur die physikalischen und chemischen Rahmenbedingungen für die genetische Selbstreplikation von Nukleinsäuren und Proteinsynthesen. Sie verwendet autokatalytische Prozesse, die im (vereinfachten deterministischen) Modell des Hyperzyklus nach M. Eigen (1971) durch nichtlineare Differentialgleichungen 1. Ordnung für Konzentrationen chemischer Stoffe beschrieben werden. Das Schema des Hyperzyklus zeigt die wachsende Komplexität vom Makromolekül zur integrierten Zellstruktur. In der Sprache der Tradition könnte man auch von der „Emergenz“ neuer Phänomene sprechen, die auf hierarchischen Stufen der Evolution von der katalytischen Wechselwirkung einfacher Moleküle über die Autokatalyse von Makromolekülen (z.B. Proteine) bis zur komplexen Wechselwirkung in einer Zelle auftreten.

Typisch ist dabei wieder die Zirkelkausalität. Vom Standpunkt komplexer Systeme ist die biologische Evolution der Arten durch eine rückgekoppelte Dynamik von Genotyp, Phänotyp und Population bestimmt. Danach wäre der Genotyp ein komplexes System von Genen auf der Mikroebene, aus dem sich auf der Makroebene der Phänotyp eines Organismus mit makroskopischen Eigenschaften wie z.B. Gestalt und Größe als genetischen Ordnungsparametern entwickelt. Populationen sind komplexe Systeme von Organismen, deren Selektion wieder auf den Genpool zurückwirken kann. Viele der dabei wirkenden Mechanismen sind zwar heute noch unbekannt. Mathematische Modelle mit komplexen dynamischen Systemen könnten aber präzisiertere Konzepte liefern, die in der empirischen biologischen Forschung überprüft, weiterhelfen oder verworfen werden. Dabei handelt es sich wieder um nichtlineare Differentialgleichungen, mit denen die Dynamik auf den hierarchischen Stufen von Genotyp, Phänotyp und Population beschrieben werden. Ihren Lösungen unter geeigneten Werten ihrer Kontrollparameter entsprechen der Emergenz der neuen Lebensphänomene, die auf diesen Stufen auftreten. Die Evolution neuer Arten wird also durch Phasenübergänge des Nichtgleichgewichts modelliert. Mutationen entsprechen den ‚fluktuierenden Kräften‘, Selektionen den ‚treibenden Kräften‘. Solche Gleichungen bestimmen Klassen von möglichen Bifurkationsbäumen als Evolutionsschemata mit Fluktuationen (‚Mutationen‘) in den Verzweigungen und treibenden Kräften in den Entwicklungsästen der Arten. Wie in anderen Modellen auch, lassen sich mögliche Evolutionsszenarien mit lokalen Gleichgewichten angeben.

Auch das ökologische Zusammenleben von Populationen lässt sich mit komplexen dynamischen Systemen erfassen. Ökologische Systeme sind nämlich komplexe offene Systeme von Pflanzen oder Tieren, die in gegenseitigen (nichtlinearen) Kopplungen (Metabolismus) mit ihrer Umwelt fern des thermischen Gleichgewichts leben. So kann die Symbiose zweier Populationen mit ihrer Nahrungsquelle durch drei gekoppelte

Differentialgleichungen modelliert werden, die bereits Lorenz in der Meteorologie verwendete. Bekannt sind die nichtlinearen Wechselwirkungen einer Raubtier- und einer Beutetierpopulation, die von den italienischen Mathematikern Lotka und Volterra mit zwei gekoppelten Differentialgleichungen beschrieben wurden. Die Dynamik dieser gekoppelten Systeme hat stationäre Gleichgewichtspunkte. Ihre Attraktoren sind periodische Oszillationen bzw. Grenzzyklen. Bei dissipativen Systemen kann die nichtlineare Populationsdynamik immer weiter vom thermischen Gleichgewicht fortgetrieben werden, bis irreguläre Turbulenz und Chaos auftreten. In der Sprache der Tradition handelt es sich dabei um Beispiele der Emergenz von Turbulenz und Chaos.

Der menschliche Organismus ist ein komplexes zelluläres System, in dem beständig labile Gleichgewichte durch Stoffwechselreaktionen aufrecht erhalten werden müssen. Das Netzwerk der Stoffwechselreaktionen einer einzigen Leberzelle zeigt, wie ausbalanciert die lokalen Gleichgewichte sein müssen, um die globalen Lebensfunktionen zu garantieren. Die dabei auftretenden Rückkopplungsschleifen von Zirkelkausalitäten entsprechen genau den gekoppelten nichtlinearen Gleichungen komplexer dynamischer Systeme.

Gesundheit als medizinischer Ordnungsparameter des Organismus beschreibt eine Balance zwischen Ordnung und Chaos. Starre Regulation würde verhindern, auf Störungen flexibel zu reagieren. So funktioniert unser Herz nicht wie eine ideale Pendeluhr. Seine nichtlineare Dynamik ist ein gut untersuchtes Anwendungsgebiet komplexer Systeme in der Medizin. Dazu wird das Herz als ein komplexes zelluläres Organ aufgefasst. Elektrische Wechselwirkungen der Zellen lösen Aktionspotentiale aus, die zu oszillierenden Kontraktionen (Herzschlag) als makroskopischen Mustern (‚Ordnungsparametern‘) führen. Ein Elektrogramm ist eine Zeitreihe mit charakteristischen Mustern für die Herzschläge. Um diese Dynamik zu studieren, müssen geeignete Kontrollparameter verändert werden. Dabei kann die Herzdynamik

einen periodenverdoppelnden Kaskadenverlauf beginnen, der schließlich im Chaos als Zustand des Herzkammerflimmerns mündet. In der Sprache der Mathematik wäre Herzkammerflimmern wieder ein Beispiel für die Emergenz eines Makrozustands nichtlinearer Dynamik. Es gibt also unerwünschte und unkontrollierbare Emergenz. Sie lässt sich nur vermeiden, indem wir die kritischen Kontrollparameter, unter denen sie eintritt, kennen und vermeiden.

Eine der aufregendsten fachübergreifenden Anwendungen komplexer Systeme ist das menschliche Gehirn. Dazu wird das Gehirn als ein komplexes System von Nervenzellen (Neuronen) aufgefasst, die über Synapsen elektrisch oder neurochemisch wechselwirken und sich zu Aktivitätsmustern („cell assemblies“) verschalten können. Die Dynamik von Gehirnzuständen lässt sich dann durch Gleichungen von (makroskopischen) Ordnungsparametern modellieren, die solchen neuronalen Verschaltungsmustern entsprechen. Bei EEG-Aufnahmen misst ein komplexes System von Elektroden lokale Gehirnzustände mit elektrischen Potentialen. Der Gesamtzustand eines Patienten mit Epilepsie auf der Mikroebene lässt sich durch lokale Zeitreihen an den Elektrodenorten bestimmen. Für die makroskopische Dynamik konnte im numerischen Computermodell ein Chaosattraktor im Phasenraum nachgewiesen werden. Allerdings gilt auch für die Diagnose komplexer Gehirndynamik, dass es in der Medizin nicht nur um das Erkennen makroskopischer Ordnungsparameter geht. Erforderlich ist ebenso eine geeignete medizinische Interpretation dieser Größen als Krankheits- oder Gesundheitszustände.

Viele Neuronen sind nicht fest „verdrahtet“ wie die Schaltelemente auf einem Computerchip. Ihre synaptischen Verbindungen lassen sich durch Lernregeln neurochemisch verändern. Dadurch entstehen synaptische Korrelationen (Aktivitätsmuster) im Gehirn, die wiederum Korrelationen von Außenweltssignalen entsprechen. In PET (Positron-Emissions-Tomographie)-Aufnahmen des Gehirns lassen sich Schaltmuster bei

unterschiedlichen Wahrnehmungen, Bewegungen, Emotionen und kognitiven Leistungen (z.B. Sprechen, Lesen, Rechnen) in Echtzeit beobachten. Die Lernregeln sind also die Selbstorganisationsverfahren eines komplexen neuronalen Systems, nach denen sich die Systemteile (Neuronen) unter geeigneten Nebenbedingungen von selbst zu Ordnungsmustern verbinden. Zu ihrer Erklärung reicht allerdings weder die thermodynamische Selbstorganisation aus Physik und Chemie noch die genkodierte Selbstorganisation in der Biologie aus. Nur die Möglichkeit des Lernens ist in hochentwickelten Organismen (wie z.B. dem Menschen) mit dem Aufbau eines Nervensystems genetisch vorgegeben. Was wir lernen, wie wir Probleme lösen, wie sich unsere Gefühle, Gedanken und Einstellungen entwickeln, ist genetisch nicht im Einzelnen vorgegeben. Beim Lernen haben wir es daher mit einer neuen Form der Selbstorganisation komplexer neuronaler Systeme zu tun.

In der Sprache der nichtlinearen Dynamik könnte also das Auftreten von Gedanken, Gefühlen, Bewusstsein u.ä. als Emergenz von makroskopischen Gehirnzuständen aufgefasst werden, die nicht durch einzelne Neuronen, sondern durch ihre nichtlineare Wechselwirkung erklärbar werden. In Fortsetzung des bisherigen Forschungsprogramms würde es sich wieder um Lösungen nichtlinearer Differentialgleichungen handeln. Allerdings sind bisher nur niedrig-dimensionale Anwendungen wie das eben erwähnte Beispiel der Epilepsie in dieser Weise mathematisch untersucht. Ein Beispiel aus der Kognitionsforschung sind die Kippbilder der Gestaltpsychologie, die als Ganzheit spontan auftreten und nicht aus der Summe ihrer Pixel erklärbar sind. Jedenfalls zeichnet sich für die Theorie komplexer Systeme und nichtlinearer Dynamik ein Forschungsprogramm ab, nach dem die Emergenz von Kognition als Lösungen von Gleichungen zu verstehen ist, die komplexen Zuständen entsprechender Gehirndynamik entsprechen.

Solche kognitiven Untersuchungen zeigen bereits, dass der Mensch als komplexer Organismus mit vielen rückgekoppelten

lokalen Gleichgewichten aufzufassen ist und nicht als auseinander- und zusammensetzbare Maschine nach dem Vorbild linearer Kausalität. In der Medizin wurde daher bereits der Begriff der dynamischen Krankheiten eingeführt. Bei Patienten mit dynamischer Systemerkrankung ist der Körper nicht mehr in der Lage, physiologische Gleichgewichte selbstständig auszubalancieren und weitvernetzte Koordinationen zu übernehmen. Auf der Makroebene sind neben dem Herzschlag die lebenserhaltenden Rhythmen der Atemfrequenz, der regelmäßigen Verdauung, der Hormonzyklen oder des Menstruationszyklus zu erwähnen. Jeder von uns kennt mittlerweile den Jet-Lag als flugbedingte Zeitstörung des Wachen-Schlafen-Rhythmus. Die Ordnungsparameter dieser makroskopischen Abläufe werden auf der Mikroebene durch viele biochemische Wechselwirkungen erzeugt, deren chemische Reaktionsgeschwindigkeiten aufeinander abgestimmt sind.

Die Komplexität des menschlichen Organismus ist von der organischen bis zur zellulären Ebene durch immer kleinere Zeitkonstanten bestimmt, deren lokale Störung globale Veränderungen des Organismus zur Folge haben können. Diese Zeitkonstanten vergrößern sich von den Reaktionsgeschwindigkeiten biochemischer Prozesse über Zellteilungszeiten, physiologische Perioden und Frequenzen bis zur Lebensdauer des gesamten Organismus. Viele dynamische Krankheiten erweisen sich daher auch als Zeitstörungen auf der Komplexitätsskala des Organismus. Letztlich ist ein Organismus in die komplexen Zeitrhythmen der Natur eingebettet. Die biochemischen Reaktionsgeschwindigkeiten hängen von den Zeitkonstanten der Chemie und Quantenphysik ab. Die organischen und physiologischen Kreisläufe hängen von der natürlichen Nahrungskette, der zivilisatorischen Umwelt und schließlich den großen kosmischen Rhythmen unseres Sonnensystems ab. Dynamische Systemerkrankungen bleiben aber nicht auf den somatischen Bereich beschränkt. Die Einsicht in die nichtlineare Kausalität des Gehirns führt zu neuen Erklärungsansätzen in der Psychiatrie.

Philosophiehistorisch ist bemerkenswert, dass die Auffassung von der Natur als einer hierarchischen Skala immer komplexerer Phänomene von der „toten“ zur „belebten“ Materie auf die Antike zurückgeht. Aristoteles spricht von einer „scala naturae“ und beschreibt die „Selbstorganisation“ (Autopoiesis), die zur „Emergenz“ neuer Phänomene führt. Auf dem Hintergrund des damaligen Entwicklungsstands mathematischer Naturforschung (Euklidische Geometrie und Statik) konnte er sich allerdings nur qualitative Prozesse der Dynamik vorstellen. Heute verfügen wir über mathematische Theorien nichtlinearer Dynamik, um viele dieser qualitativen Prozesse (wenigstens im Prinzip) auch mathematisch zu verstehen. Das ist keineswegs ein Physikalismus, also die Zurückführung von Kognitionsforschung, Biologie und Chemie auf Physik. Die mathematischen Methoden sind gegenüber der jeweiligen Anwendung und Interpretation der Grundbegriffe neutral. Hinzu kommt, dass auf der Stufe der Systemelemente der neue Systemzustand nicht erklärbar ist, sondern erst durch die Dynamik ihrer Wechselwirkung. Mathematisch sind die Ordnungsparameter eben makroskopische Größen, die im Sinne nichtlinearer Dynamik mehr sind als die Summe der Systemelemente. Auf dem Hintergrund dieser mathematischen Analyse war die philosophische Rede von der Emergenz in aristotelischer Tradition also durchaus richtig und der physikalische Reduktionismus ein Irrtum.

3. Komplexität und Selbstorganisation in der Gesellschaft

Das Zentralnervensystem lässt sich als komplexe Population von Neuronen auffassen, zwischen denen Signale und Nachrichten transportiert werden. Entscheidend ist dabei, dass neuronale Systeme nicht zentralgesteuert und programmiert wie ein klassischer von-Neumann-Computer sind. Auch bei Tierpopulationen können komplexe nichtlineare Systeme zur Selbstorganisation von Ordnungszuständen führen, ohne dass sie zentral gesteuert werden.

Ein lehrreiches Beispiel sind staatenbildende Insekten wie z.B. Ameisen. Ameisenstaaten scheinen auf den ersten Blick ein deterministisches System zu bilden, in dem die Aktivitäten der einzelnen Ameisen programmgesteuert ablaufen. Bei näherer Beobachtung jedoch führen die einzelnen Insekten viele Zufallsbewegungen (Fluktuationen) aus, während die Gesamtorganisation hochgradige Ordnungsstrukturen besitzt, die sich allerdings spontan ändern können. Eine stabile Ordnungsstruktur kann z.B. ein Spurenetz sein, das Ameisen von ihrem Nest zu Nahrungsquellen ihrer Umwelt aufbauen. Diese Transportnetze sind zugleich Signalnetze, in denen die einzelnen Tiere über chemische Botenstoffe kommunizieren. Der gesamte Schwarm kann also mehr als das einzelne Tier. Man spricht daher auch von Schwarmintelligenz. Tatsächlich wird dieses Potential einerseits durch die Wechselwirkungen der Tiere erzeugt, andererseits wirkt es auf sie zurück. Wir beobachten also wieder die typische Rückkopplung zwischen Mikro- und Makroebene eines komplexen Systems, die Selbstorganisation und Emergenz von Ordnung möglich macht. Das Potential des Schwarms drückt sich konkret in der Verteilung chemischer Signalstoffkonzentrationen zwischen den einzelnen Tieren aus, analog der Verteilung von Neurotransmittern zwischen den Neuronen des Gehirns, und kann durch entsprechende Ordnungsparameter charakterisiert werden.

Eine Nahrungsquelle ist ein Beispiel für einen Attraktor der Populationsdynamik, in dem das System vorübergehend im Gleichgewicht mit seiner Umwelt ist. Wird durch zufällige Fluktuationen einzelner Tiere eine zweite Nahrungsquelle entdeckt, kann das alte Spurenetz instabil und ein neues aufgebaut werden. Das System schwankt zwischen zwei Attraktoren als zwei möglichen Zielzuständen, bis es zum Symmetriebruch kommt und sich ein Attraktor in einer Bifurkation durchsetzt.

Mit Blick auf die Kulturgeschichte ist es naheliegend, auch die Entwicklung menschlicher Gesellschaften als Dynamik komplexer Systeme zu verstehen. Jäger-, Bauern- und Industriegesellschaften

breiten sich wie Wetterfronten auf geographischen Karten aus. Schon bei der Industrialisierung des 19. Jahrhunderts bilden Straßen- und Eisenbahnnetze das Nervensystem der sich ausbreitenden Nationalstaaten. In Computermodellen lässt sich die Dynamik von Stadtentwicklungen studieren. Wir beginnen mit einer nahezu gleichmäßig bewohnten Region. Sie wird auf einem schachbrettartigen Netz von Orten simuliert, an denen die sich verändernden Bevölkerungskonzentrationen im Laufe der Zeit dargestellt sind. Die Orte sind durch Funktionen verbunden, in denen ihre industrielle Kapazität, Verkehrsverbindungen, aber auch ihr Freizeit- und Erholungswert zum Ausdruck kommen. Eine Populationsgleichung modellierte die nichtlineare Dynamik der Besiedlung, die sich in neuen Stadtzentren, Industriegebieten, Ballungszonen, Veränderungen des Verkehrsnetzes zeigte.

Hier setzt das Modellierungskonzept der Soziodynamik an. Methodisch wird dazu die Mikroebene individueller Entscheidungen einzelner Menschen von der Makroebene kollektiver Prozesse unterschieden. Die probabilistische Kollektiventwicklung wird durch eine Mastergleichung für gesellschaftliche Makrozustände („Soziokonfigurationen“) modelliert. Jede Komponente einer Soziokonfiguration bezieht sich auf eine Teilpopulation mit einem charakteristischen Verhaltensvektor. In Computergraphiken können die sich verändernden Wanderungsströme zweier Populationen wie in einer Flussdynamik als unterschiedliche Attraktoren („Ordnungsparameter“) dargestellt werden - von Ghettobildungen („PunkATTRAKTOREN“) über oszillierende bis zu chaotischen Zuständen. Wir können zwar auf der Mikroebene keine individuellen Entscheidungen voraussehen. Auf der Makroebene lassen sich aber mögliche Szenarien kollektiver Trendentwicklungen unter bestimmten Nebenbedingungen („Kontrollwerten“) simulieren.

Wiederum wird keine neuartige Kausalität zugrunde gelegt. Es handelt sich auch bei sozialen Systemen um eine nichtlineare Dynamik komplexer Systeme. Allerdings verfügen wir in der Regel

über keine Bewegungsgleichungen für das individuelle Verhalten der Systemelemente auf der Mikroebene. Menschen sind keine Moleküle oder Zellen. Dennoch erzeugen z.B. ihre politischen Präferenzen kollektive Wahlrends, die ähnlich wie Strömungsmuster auf das Wahlverhalten des Einzelnen zurückwirken. Man könnte daran denken, auf der Mikroebene Gleichungen individueller Gehirndynamik zugrunde zu legen. Allerdings wäre dieser Ansatz wegen der Komplexität solcher Gleichungen nicht praktikabel. Daher arbeiten Sozialwissenschaften auf der Makroebene mit statistischen Verteilungsfunktionen, deren Dynamik mit stochastischen Gleichungen modelliert wird.

Bereits Adam Smith (1723-1790), der Vater der Marktwirtschaft, ging vom Selbstorganisationsprozess eines komplexen Wirtschaftssystems aus, in dem Angebot und Nachfrage von Produkten zwischen Firmen und Konsumenten die wirtschaftliche Dynamik bestimmen. Dazu nahm Smith einen „natürlichen“ Preis an, der sich aus dem Arbeitswert eines Produkts ergibt. Wenn der Marktpreis größer als der natürliche Preis wird, ist die Profitrate hoch, so dass sich die Produktion ausweitet und damit zur Preissenkung führt. Die umgekehrte Bewegung tritt ein, wenn der Marktpreis kleiner als der natürliche Preis ist. Durch Gewinnchancen und Verlustrisiken steuert sich also das Marktsystem selbst und strebt einem absoluten Gleichgewichtszustand von Angebot und Nachfrage zu. Smith unterstellte also eine konservativer Selbstorganisation, durch die sich im ökonomischen Gleichgewicht der soziale Ordnungszustand einer Gesellschaft („Wealth of Nation“) von selbst wie durch eine unsichtbare Hand („invisible hand“) gelenkt einstellt.

Tatsächlich lassen sich aber ökonomische Systeme nicht mit der konservativen Selbstorganisation von Kristallen und Festkörpern nahe dem thermischen Gleichgewicht vergleichen. Als offenes System, das in ständigem Stoff-, Energie- und Informationsaustausch mit anderen Märkten und der Natur steht, kann Marktwirtschaft keinem Gleichgewichtszustand „natürlicher“

Preise zustreben. Analog wie ein biologisches Ökosystem wird sie in ständiger Veränderung begriffen sein und empfindlich auf geringste Veränderungen der Randbedingungen reagieren. Zudem sind die Agenten eines Wirtschaftssystems lernfähige Menschen. Kurzfristige Schwankungen von Konsumentenpräferenzen, unflexibles Reagieren im Produktionsverhalten, aber auch Spekulationen auf Rohstoff- und Grundstücksmärkten liefern Beispiele für sensible Reaktionen im Wirtschaftssystem. Dass Fluktuationen im kleinen sich zu Wachstumsschüben im großen selbst organisieren können (z.B. technische Innovationen wie Webstuhl und Dampfmaschine in der industriellen Revolution), andererseits aber zu chaotischem und unkontrollierbarem Verhalten aufschaukeln können (z.B. Börsenkrach, Massenverelendung, Arbeitslosigkeit), ist eine historische Erfahrung der Jahrhunderte nach Adam Smith.

Bemerkenswert ist, dass Karl Marx die Selbstorganisation einer Marktwirtschaft erkannt hatte. Seine kritische Analyse zeigt die Phasenübergänge auf, in denen sich ökonomische Systeme krisenhaft entwickeln und gesellschaftliche Strukturen verändern. Bereits Hegel hatte mit seiner dialektischen Methode historische Entwicklungsprozesse erklärt. Vom Standpunkt komplexer dynamischer Systeme ist die Analyse von historischen Phasenübergängen bei Marx realistisch. Er erkennt, dass die Selbstorganisation ökonomischer Kräfte nicht automatisch zum Wohlstand einer Gesellschaft und zur Wohlfahrt seiner Bevölkerung führt. Der Fehler vieler seiner Nachfolger besteht allerdings darin, dass man als Konsequenz die Selbstorganisation des Marktes abschaffen wollte, um sie durch eine zentralistisch gesteuerte Verteilungsmaschine zu ersetzen. Das wäre aber so, als wollte man die Evolutionsgesetze abschaffen. Marx erkennt also richtig die nichtlineare Dynamik ökonomischer Systeme, will sie aber durch eine lineare Dynamik im Sinne des Laplaceschen Geistes ersetzen. Dazu muss ein neuer Mensch angenommen werden, der nicht nach seinem eigenen Profit strebt, sondern nur die gesellschaftlichen Interessen verwirklichen will. Das ist aber eine

unrealistische Annahme der menschlichen Natur. Ebenso gehen Adam Smith und die ökonomischen Klassiker von einer idealistischen Annahme über den Menschen aus. Der „homo oeconomicus“, der mit vollständiger Information über seine Umwelt nur seinen eigenen Nutzen maximiert und in diesem Sinn nur rational handelt, ist eine mathematische Fiktion linearer Gleichgewichtsdynamik.

Ein nichtlineares Modell zeigt, wie sich der Wettbewerb zwischen zwei konkurrierenden Produkten bei positiver Rückkopplung unter der Bedingung zunehmender Erträge durch geringste Anfangsfluktuationen entscheidet. Geringste Marktvorteile in der Anfangsphase können dazu führen, dass sich eine Technologie immer leichter und deutlicher durchsetzt, ohne dass diese Entwicklung am Anfang vorausgesagt werden konnte. Selbst wenn ein technischer Standard wie z.B. ein Computerbetriebssystem nicht die beste Lösung unter fachlichem Gesichtspunkt war, kann sie sich global auf diesem Weg durchsetzen. Wissenschaftshistorisch ist bemerkenswert, dass der "Schmetterlingseffekt" in der Wirtschaft bereits 1890 von dem englischen Ökonomen A. Marshall erwähnt wurde - also etwa in der Zeit, als Poincaré die Nichtlinearität der Himmelsmechanik herausstellte. Marshall zeigte, wie ein Unternehmen, das rein zufällig früh einen hohen Marktanteil erreicht, seine Konkurrenten überflügeln kann, wenn die Produktionskosten mit zunehmenden Marktanteilen fallen.

Daraus folgt: Wir müssen frühzeitig die Ordnungsparameter erkennen, die eine Dynamik dominieren könnten. Es geht also um die Entwicklung ökonomischer Frühwarnsysteme. Das ist ähnlich wie bei Krankheiten eines Organismus oder der Wettervorhersage. In beiden Beispielen handelt es sich auch um nichtlineare Dynamik komplexer Systeme. Aus Krankheitssymptomen und Wetterdaten kann durch verschiedene mathematischen Methoden (z.B. Zeitreihenanalyse, Attraktorenbestimmung im Phasenraum, Lyapunov-Exponenten) ein zukünftiger Trend erkannt werden. Bei ökonomischen und sozialen Prozessen handelt es sich allerdings um

hochdimensionale Systeme vieler Komponenten, bei denen die Rechenkapazitäten unserer Computer heute noch unzureichend sind, um Trends genau zu bestimmen. Vom mathematischen Standpunkt sind Wirtschafts- und Gesellschaftswissenschaften schwieriger als die Naturwissenschaften, da ihre Modelle komplexer sind. Aber auch qualitative Einsichten im Umgang mit nichtlinearer Dynamik sind wertvoll und bewahren uns vor Überraschungen. Jedenfalls sollten wir sensibel für die empfindlichen Gleichgewichte in Natur und Gesellschaft werden. Krisenmanagement kommt zu spät, wenn bereits Chaosattraktoren herrschen. Wir benötigen Komplexitätsmanagement nichtlinearer Dynamik.

Management der Zukunft findet unter den Bedingungen von Komplexität statt. Komplexität erzeugt nichtlineare Dynamik. Daher werden Konsequenzen nichtlinearer Dynamik für das Komplexitätsmanagement von Unternehmen und Verwaltungen untersucht. In unsicheren und unübersichtlichen Informationsräumen entscheiden Menschen auf der Grundlage beschränkter Rationalität und nicht des „homo oeconomicus“. Beschränkte Rationalität entspringt der durch Unvollständigkeit und Ungenauigkeit bestimmten menschlichen Wahrnehmung von Problemen und Situationen, wie der Wirtschaftsnobelpreisträger und Mitbegründer der KI (Künstliche Intelligenz)-Forschung Herbert A. Simon bereits in den 1950er Jahren herausstellte. Beschränkte Rationalität steht daher im Zentrum moderner Kognitionsforschung und Philosophie. Ihre Ergebnisse müssen in das Management einfließen, um Unternehmen und Verwaltungen vor falschen Rationalitätsmodellen zu bewahren.

Komplexitätsmanagement ist dann erfolgreich, wenn wir die nichtlineare Dynamik komplexer Systeme verstehen. Für ein Unternehmen gilt daher herauszufinden, wieweit es sich in die Nähe von Instabilitäten bewegen sollte, um Innovationsschübe auszulösen und das Abgleiten ins Chaos zu vermeiden. In der Theorie komplexer dynamischer Systeme lassen sich globale Trends durch wenige statistische Verteilungsgrößen („Ordnungsparameter“)

modellieren. Wir müssen z. B. nicht das tatsächliche Mikroverhalten jedes einzelnen Autofahrers kennen, um für bestimmte Verkehrsdichten ein Makroverhalten wie Stop-and-Go-Wellen oder Verkehrsinfarkt voraussagen zu können. Intelligente Verkehrsleitsysteme müssen lernen, solche Trends rechtzeitig aus Dichtemustern zu erkennen und sich dem Verkehrsfluss anzupassen. Ebenso muss intelligentes Management lernen, mit Instabilitäten sensibel umzugehen und geeignete Rahmenbedingungen zu setzen, damit sich eine gewünschte Geschäftsdynamik selbst organisiert.

Unternehmen sind aber, so wird man einwenden, Systeme von Menschen mit Gefühlen und Bewusstsein, keine willenlosen Atome oder Moleküle. Allerdings entstehen auch in sozialen Gruppen globale Meinungstrends einerseits durch kollektive Wechselwirkung ihrer Mitglieder (z.B. Kommunikation). Andererseits wirken globale Trends auf die Gruppenmitglieder zurück, beeinflussen ihr Mikroverhalten und verstärken oder bremsen dadurch die globale Systemdynamik. Solche Rückkoppelungsschleifen (Feedback) zwischen Mikro- und Makrodynamik eines Systems ermöglichen erst Lerneffekte im Unternehmen wie z.B. antizyklisches Verhalten, um bewusst schädlichen Trends entgegenzuwirken.

Wenn Unternehmen als lernende und sich selbst organisierende komplexe dynamische Systeme verstanden werden, dann zeichnen sich erste Konturen eines Mitarbeiterprofils ab. Angesichts der nichtlinearen Dynamik von Menschen, Unternehmen und Märkten ist der Laplacesche Geist eines linearen Managements und Controllings ebenso zum Scheitern verurteilt wie die Unterstellung rationalen Verhaltens im Sinne des homo oeconomicus. Menschen handeln weder vollständig rational noch vollständig irrational. In unsicheren und unübersichtlichen Informationsräumen entscheiden sie auf der Grundlage beschränkter Rationalität. Sie filtern fuzzy Informationen mit beschränkten Sinnesorganen und kognitiven Fähigkeiten, bewerten Situationen auf der Grundlage von Motivationen und Emotionen, ergänzen und verstärken ihre

Fähigkeiten im Team. Lern- und Kommunikationsfähigkeit, Sensibilität und Sozialität zeichnen uns Menschen nach wie vor aus, auch wenn wir verstärkt auf maschinelle Unterstützung angewiesen sind.

4. Selbstorganisation und Dynamik in Computer-, Informations- und Kommunikationssystemen

Die bisherigen Beispiele zeigen bereits, dass die Untersuchung von nichtlinearer Dynamik und Chaos in komplexen Systemen wesentlich auf den Computer angewiesen ist. Die Prinzipien der mathematischen Theorie waren bereits Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt. Aber erst Visualisierung und Computereperimente mit heutiger Rechnertechnologie machen den Forschungsboom und die Popularität verständlich, die unser Forschungsgebiet heute auszeichnet. Bereits Leibniz (1714) formulierte die für die Naturforschung folgenschwere Vision, wonach die mehr oder weniger komplexen Systeme der Natur als mehr oder weniger komplexe Automaten zu verstehen seien. In seiner Monadologie (§ 64) heißt es: „So ist jeder organische Körper eines Lebewesens eine Art von göttlicher Maschine oder natürlichem Automaten, der alle künstlichen Automaten unendlich übertrifft.“ Leibniz sieht eine Hierarchie von Komplexitätsgraden für Automaten vor, die bis zu unendlichen Maschinen reichen. In moderner Lesart könnte man unter einer unendlichen Maschine eine Turing-Maschine mit unbegrenzten Speichermöglichkeiten (d.h. mit einem unendlichen Band) verstehen. Dann würde Leibnizens Zitat in das Zentrum der modernen Artificial Life-Forschungen treffen: Sind dynamische Systeme von der Komplexität lebender Organismen auf (universellen) Turing-Maschinen simulierbar?

Der Zusammenhang zwischen dynamischen Systemen, wie sie in den Natur- und Sozialwissenschaften untersucht werden, und Automaten lässt sich jedenfalls mathematisch präzisieren. Wie in den vorherigen Abschnitten gezeigt wurde, ist die Dynamik eines

komplexen Systems durch Differentialgleichungen mit kontinuierlichen Variablen und kontinuierlichem Zeitparameterbestimmt. Diskrete Vereinfachungen von atomaren, molekularen und zellulären Zuständen genügen häufig, um die hochgradige Nichtlinearität einer Systemdynamik im Computermodell zu simulieren. Ein erfolgreicher Ansatz sind die zellulären Automaten. Der zelluläre Automat simuliert nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation im diskreten Modell.

Analog zu den Phasenübergängen dynamischer Systeme und ihren Attraktoren wurden aufgrund von Computerexperimenten vier Klassen zellulärer Automaten mit verschiedenen Komplexitätsgraden unterschieden. Automaten der 1. Klasse erreichen schon nach wenigen Schritten unabhängig vom Anfangszustand einen Gleichgewichtszustand, von dem ab alle Zellen in Zukunft z.B. weiß bleiben. Es handelt sich also um einen Fixpunktattraktor. Automaten der 2. Klasse erzeugen längere periodisch-konstante Muster. Veränderungen der Anfangsbedingungen haben nur geringen Einfluss. Automaten der 3. Klasse produzieren sehr lange komplexe Muster mit lokalen Strukturen, die an organische Formen erinnern und empfindlich auf geringste Veränderungen der Anfangsbedingungen reagieren. Automaten der 4. Klasse erzeugen wieder kürzere Muster, die aber in chaotisch-irreguläre („fraktale“) Verteilung der Zellzustände übergehen. Sie entsprechen also Chaos. Abweichend von Wolframs (1984) ursprünglicher Einteilung wurden die vier Automatenklassen in einer Reihenfolge genannt, die einen Phasenübergang von immer komplexer werdenden Strukturen bis zu Chaos nahe legt.

Von komplexen dynamischen Systemen wissen wir, dass sich lebende Organismen einerseits von der Erstarrung in zuviel Ordnung im thermischen Gleichgewicht fernhalten müssen, aber andererseits auch nicht in zuviel Chaos auflösen dürfen. Das würde den Komplexitätsgraden von zellulären Automaten als Simulationen dynamischer Systeme entsprechen. Systeme fern des thermischen Gleichgewichts, aber am Rande des Chaos haben den höchsten

Komplexitätsgrad. Systeme mit hochgradiger Regularität wie z.B. Kristalle in der Nähe des thermischen Gleichgewichts oder Systeme mit chaotischer Irregularität wie Moleküle in einem Gas haben geringe Komplexität. Lebende und lernende Organismen wie das hochstrukturierte Molekülsystem der DNA oder das hochausdifferenzierte menschliche Gehirn hätten die höchsten bekannten Komplexitätsgrade fern von der Erstarrung der Systeme der 1. Klasse, jenseits auch der periodischen Oszillationen der 2. Klasse wie z.B. bei der BZ-Reaktion, aber im kritischen Phasenübergang der 3. Klasse am Rande des Chaos der 4. Klasse.

Zelluläre Automaten können aus einfachen Anfangsmustern mit eindeutig definierten Regeln völlig zufällige komplexe und irreguläre Muster erzeugen, deren Evolution im Detail durch kein endliches Programm vorausgesagt ist. Wie bei Turings Stop-Problem müssen wir dann im Computerexperiment abwarten, wie sich das System entwickelt und können nicht im Vorhinein entscheiden, wann oder ob es überhaupt hält. Diese Eigendynamik komplexer Systeme hat zentrale erkenntnistheoretische Bedeutung, denn es trifft konsequenterweise auf alle dynamischen Systeme zu, die wenigstens so komplex sind wie ein entsprechender zellulärer Automat. Insbesondere werden wir bei entsprechenden biologischen Systemen mit solchen Eigendynamiken rechnen müssen.

In der biologischen Evolution kam nach der zellulären die neuronale Selbstorganisation. Im Laufe von Millionen von Jahren wurden unterschiedliche komplexe neuronale Netzwerke und Lernverfahren entwickelt und ausgetestet. Seit einigen Jahren untersucht die Neuroinformatik diese Bau- und Lernverfahren der Natur, um sie als Blaupausen für lernfähige technische neuronale Netze zu nutzen. Bereits Anfang der achtziger Jahre konstruierte der Festkörperphysiker J. Hopfield ein einschichtiges Netz von wechselwirkenden Neuronen, das wie ein physikalisches System (z.B. Ferromagnet) mit einer konstant abnehmenden Energiemenge verstanden werden kann. Um in einem Bild die Dynamik des Netzwerks zu veranschaulichen: Die einzelnen Neuronen gleichen

einzelnen Menschen in einer Versammlung, die zunächst ‚energiegeladen‘ untereinander eine temperamentvolle Diskussion mit vielen Einzelmeinungen führen, um sich schließlich im Gleichgewichtszustand einer mehrheitlichen Entscheidung zu beruhigen, indem sich gewissermaßen die hitzigen Gemüter abgekühlt haben.

Die Dynamik des Hopfield-Systems ist dem Spinglas-Modell nachgebildet. Die energetische Wechselwirkung der magnetischen Atome mit zwei Spinzuständen (‚up‘ und ‚down‘) wird nun als Wechselwirkung binärer Neuronen mit zwei Zuständen (‚schwarz‘ und ‚weiß‘) aufgefasst. Dazu stellen wir uns ein schachbrettartiges Gitternetz aus binären Neuronen vor. Ein Muster (z.B. der Buchstabe A) wird im Gitternetz durch schwarze Punkte für alle aktiven Neuronen und weiße Punkte für inaktive Neuronen dargestellt. Die Prototypen der Buchstaben werden zunächst dem System ‚eintrainiert‘, d.h. sie werden mit den lokalen Energieminima im Potentialgebirge des neuronalen Zustandsraums verbunden. Die Neuronen sind mit Sensoren ausgestattet, mit denen ein Muster wahrgenommen wird.

Bieten wir nun dem System ein verrauschtes und teilweise gestörtes Muster des eintrainierten Prototypen an, dann kann es den Prototypen in einem Lernprozess wiedererkennen. Der Lernprozess geschieht durch lokale Wechselwirkungen der einzelnen Neuronen nach den Hebbischen Lernregeln. Sind zwei Neuronen zur gleichen Zeit entweder aktiv oder inaktiv, so wird die synaptische Kopplung verstärkt. Bei unterschiedlichen Zuständen werden die synaptischen Gewichte verkleinert. Der Lernprozess wird so lange durchgeführt, bis der gespeicherte Prototyp erzeugt („wiedererkannt“) ist. Der Lernprozess entspricht also einem Phasenübergang zu einem Punktattraktor, der wie in einem Ferromagneten nahe dem thermischen Gleichgewicht ohne Zentralsteuerung durch Selbstorganisation geschieht.

Hopfield-Systeme arbeiten zwar parallel, aber determiniert. Der Lernprozess kann daher in einem Tal des Potentialgebirges stecken bleiben, das nicht das tiefste im gesamten .Netz ist. Hat z.B. eine Kugel ein Tal erreicht, dann lautet ein naheliegender Vorschlag, das gesamte System ein wenig zu schütteln, damit die Kugel das Tal verlassen kann, um niedrigere Minima einzunehmen. Starke oder schwache Schüttelbewegungen verändern die Aufenthaltswahrscheinlichkeit einer Kugel wie bei einem Gasmolekül, dessen Kollisionen durch Druck- und Temperaturveränderungen beeinflusst werden. Bei solchen probabilistischen Netzwerken spricht man daher auch nach dem Begründer der statistischen Mechanik und Thermodynamik von Boltzmann-Maschinen. Sie haben eine größere Nähe zu biologischen neuronalen Netzen, da sie sich als fehlertolerant gegenüber kleinen Störungen wie das menschliche Gehirn z.B. bei kleineren Unfallschäden erweisen.

Neuronale Netze nach dem Spinglasmodell sind an der konservativen Selbstorganisation komplexer Systeme nahe dem thermischen Gleichgewicht orientiert. Im Vordergrund steht die technisch erfolgreiche Lösung von Problemen, nicht die Modellierung des Gehirns. Das Gehirn ist nämlich ein lebendes System fern vom thermischen Gleichgewicht. Synergetische Computer orientieren sich daher an der dissipativen Selbstorganisation fern des thermischen Gleichgewichts. An die Stelle der ‚Hidden Units‘ der Zwischenschicht treten Ordnungsparameter zur Charakterisierung makroskopischer Schaltmuster der Outputneuronen. In der nichtlinearen Wechselwirkung der Ordnungsparameter setzt sich i.a. einer durch und dominiert die makroskopische Dynamik. Solche Systeme erbringen teilweise Leistungen von Gehirnsystemen wie z.B. dem visuellen Cortex bei der Mustererkennung oder dem assoziativen Gedächtnis.

Bis in die 90er Jahre galten neuronale Netze und zelluläre Automaten nur als Modelle, die letztlich auf die Simulation mit

konventionellen Computern angewiesen sind. Die technische Revolution in der Entwicklung von Mikroprozessoren und Sensoren macht es möglich, sie zu bauen. Offenbar arbeiten menschliche und tierische Gehirne nicht nur auf der digitalen Basis feuerner und nicht-feuerner Neuronen, sondern auch aufgrund analoger Signalverarbeitung von Sensorzellen. Wahrnehmungsorgane nehmen kontinuierliche Tast-, Wärme-, Schall- oder Lichtreize wahr, die technisch analoger Signalverarbeitung mit Sensoren entsprechen. Analoge zelluläre Computer verbinden analoge und digitale Informationsverarbeitung. Auf Chipgröße miniaturisiert erreichen sie heute bereits die Leistung von Supercomputern. Wenn wir berücksichtigen, dass Chips überall in unserer Umwelt verteilt sind (und sein werden), ahnen wir die zentrale Rolle, die analoge zelluläre Computer sich anschicken, in unserer Lebenswelt einzunehmen.

Prinzipiell lässt sich nicht ausschließen, dass Chips dieser Art eines Tages die nichtlineare Gehirndynamik simulieren können. Ist damit das Gehirn berechenbar und die Willensfreiheit des Einzelnen ad absurdum geführt? Tatsächlich entsprechen unsere Gedanken, Gefühle und Bewusstseinszustände neuronalen Verschaltungsmustern des Gehirns, die durch entsprechende Ordnungsparameter charakterisierbar sind. Aus der Theorie zellulärer Automaten wissen wir aber, dass solche Automaten eine Eigendynamik entwickeln können, die eine Vorausberechnung im Detail ausschließt. Wenn wir ein Computermodell ähnlich dem Gehirn gebaut hätten, müssen wir also damit rechnen, dass es ähnlich wie ein biologisches Gehirn „eigenwillige“ Dynamiken entwickeln könnte. Wir hätten dann zwar ein Computermodell des dynamischen Systems ‚Gehirn‘, das aber nicht berechenbar und entscheidbar ist. Das ist eine Folge nichtlinearer Kausalität komplexer dynamischer Systeme.

Gehirne treten in der Natur nicht isoliert auf, sondern haben sich in nichtlinearen Populationsdynamik entwickelt. In der biologischen Evolution haben sich Kommunikationssysteme von

Tierpopulationen herausgebildet. Sie reichen von neurochemischen Signalen in Insektenpopulationen bis zum artikulierten Gesang von Vögeln. Primaten, die mit Ästen Alarm schlugen, benutzten erstmals Werkzeuge zur Nachrichtenübertragung. Nach Trommeln, Rauchzeichen, Morsen und Telefonnetzen kommunizieren wir heute in Computernetzen wie dem Internet. Es ist mittlerweile das Nervensystem einer globalisierten Welt, in der wir Nachrichten in Echtzeit (d.h. mit Lichtgeschwindigkeit) austauschen. Das Internet zerfällt aber nicht nur in die Summe einzelner vernetzter Computer. Mit plattformunabhängigen Computersprachen wie z.B. Java ist das Netz selber ein gigantischer Computer, in dem die Menschheit wie in einem Supergehirn ihre Dokumente speichert und multimedial animiert. Wie ein Nervensystem ist das Internet tatsächlich bereits bis zu einem bestimmten Grad ein komplexes sich selbst organisierendes Informationssystem, in dem keine zentrale Leitungsvermittlung stattfindet.

Die Informationsflut in komplexen Informations- und Kommunikationssystemen wie dem Internet kann von einzelnen Nutzern nicht mehr kontrolliert und bewältigt werden. Dazu bedarf es intelligenter Informationsfilter, Koordinations- und Kooperationsprogramme, die im Netz verteilt den Interessen der Nutzer entsprechend agieren. Als mobile und intelligente Programme in komplexen Informations- und Kommunikationsnetzen könnten solche virtuellen Dienstleister („Agenten“) untereinander kooperieren und nützliche Informationen austauschen, die verschiedenen Nutzern helfen. In der Natur trat ein solches kooperatives Kommunikationsverhalten bei komplexen Insektenpopulationen auf, die gemeinsam kollektive Leistungen wie den Bau von kunstvollen Termitenbauten oder verzweigten Ameisenstraßen organisierten, von denen das einzelne Tier keine Vorstellung hat. In der Soziobiologie spricht man daher von Schwarmintelligenz, die erst durch Kooperation und Kommunikation der Individuen einer Population entsteht. Im elektronischen Medium werden Kommunikationsmuster erzeugt, deren Ordnungsparameter das Verhalten einzelner Agenten prägen.

Ende der 80er Jahre prophezeite M. Weiser von der Firma Xerox den Trend zu einer telematisch vernetzten Gesellschaft, in der eine Vielzahl von einfachen Endgeräten den Alltag der Menschen unterstützen. Er prägte dafür die Bezeichnung vom Ubiquitous Computing. Informations- und Kommunikationstechnologie ist aber erst dann ‚ubiquitär‘ (d.h. überall verbreitet), wenn ihre Verbindung an Standardrechner wie PCs und Laptops überwunden wird und die gebündelten Funktionen eines Computers in die eigentlichen Anwendungen zurück verlagert werden. Künstliche Intelligenz steckt dann weniger hoch konzentriert in einem Gerät, sondern in der komplexen Vernetzung einer Infrastruktur von verschiedenen Geräten, die eine intelligente Nutzerumgebung schaffen. Intelligenz entsteht daher in der nichtlinearen Interaktion dieser Infrastruktur mit dem Menschen.

Nichtlineare Kausalität eröffnet auch die Möglichkeit, Selbstorganisationseigenschaften organischer Systeme in der Technik zu übernehmen. Man spricht bereits vom Organic Computing, in dem autonome Einheiten komplexer technischer Systeme Selbstdiagnose und Selbsttherapie bei Fehlfunktionen ermöglichen. Allerdings zeigen die bisherigen Beispiele, dass nicht nur gewünschte, sondern auch chaotische und unkontrollierbare Phänomene (z.B. Krankheiten wie Krebs) sich selber in nichtlinearer Dynamik aufschaukeln können. Es kommt darauf an, die kritischen Werte entsprechender Kontrollparameter zu erkennen und diese Art von Emergenz im Vorfeld zu vermeiden.

5. Was lernen wir aus der nichtlinearen Dynamik komplexer Systeme?

Die Theorie komplexer dynamischer Systeme ist eine interdisziplinäre Methodologie zur Modellierung nichtlinearer Prozesse in Natur und Gesellschaft. Diese Perspektive nenne ich den ‚dynamical view‘ der Welt. Sie ist die wissenschaftstheoretische

Antwort auf die zunehmende Komplexität, Empfindlichkeit und Unübersichtlichkeit der modernen Lebenswelt des Menschen. Als Beispiele seien die Herausforderungen der Globalisierung, von Umwelt und Klima, Life Sciences und Informationsflut genannt. Veränderungen, Krisen, Chaos, Innovations- und Wachstumsschübe werden durch Phasenübergänge in kritischen Zuständen modelliert. Ziel sind Erklärungen und Prognosen dieser Prozesse. In Zeitreihenanalysen müssen dazu Phasenräume und Attraktoren aus Messwerten rekonstruiert werden. Die damit verbundenen Probleme der Messauswertung und Diagnose sind eine große Herausforderung für die Technik.

Häufig reichen Computersimulationen, bei denen Algorithmen und Programme an die Stelle von Gleichungen dynamischer Systeme treten. In diesem Fall spreche ich vom ‚computational view‘ der Welt. In einer Komplexitätsanalyse sind Leistungsfähigkeit, Aufwand und praktische Beschränkungen dieser Modelle zu bestimmen. Die Zukunft ist langfristig nicht vorausberechenbar, aber Trends (Ordnungsparameter) ihrer Dynamik erkennbar und beeinflussbar. Ebenso wenig wie die lineare Kausalität des Laplaceschen Geistes ausreicht, gelingt es dem homo oeconomicus, unter den Bedingungen vollständiger Information vollständige Rationalität zu realisieren. Entscheidungsverhalten findet unter den Bedingungen von Komplexität statt. Ihre nichtlineare Kausalität erlaubt nur beschränkte Rationalität. Lineare Kausalität ist ebenso wie die klassische Mechanik und Ökonomie eine begriffliche Fiktion, die bestenfalls Näherungen erlaubt.

Selbstorganisation komplexer Systeme führt zur Emergenz neuer Phänomene, die auf neuen Stufen der Evolution auftreten. Selbstorganisation ist notwendig, um die zunehmende Komplexität dieser Entwicklung zu bewältigen. Sie kann aber auch zu unkontrollierbarer Eigendynamik und Chaos führen (vgl. Chaostheorie). In komplexen dynamischen Systemen (z.B. Organismen) bedarf es daher auch Monitoring und Controlling auf

hierarchischen Systemstufen. Das gilt auch für soziale und ökonomische Systeme. Es gibt (noch?) keine abschließende nichtlineare Systemtheorie. Wir kennen nur Teile von biologischen, neuronalen, kognitiven und sozialen Systemen im Rahmen einer allgemeinen Theorie komplexer dynamischer Systeme. Aber auch z.B. in der Physik gibt es noch keine abschließende Theorie physikalischer Kräfte. Dennoch wird damit erfolgreich gearbeitet. Um mehr darüber zu erfahren, bedarf es der interdisziplinären Zusammenarbeit von Computer-, Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften. Ziel sind selbstorganisierende Systeme und Infrastrukturen als Dienstleister für uns Menschen, die helfen, eine immer komplexer werdende Welt zu bewältigen und lebenswerter zu gestalten. Dienstleistung setzt aber voraus, dass wir selber die innere Gelassenheit finden, um sensibel reagieren und Maßstäbe für eine nachhaltige Zukunft setzen zu können.

Im Zeitalter der Globalisierung erweisen sich Länder und Kulturen als komplexe Systeme, die den Gesetzen nichtlinearer Dynamik folgen. Religionen wirken dabei häufig wie Katalysatoren, die politische und kulturelle Veränderungen bewirken, ohne selber direkt in Erscheinung zu treten. Geschichte lässt sich in Phasenübergänge verstehen, die an Instabilitätspunkten in neue Ordnungen umschlagen, die wiederum instabil werden können, um neuen Ordnungen Platz zu machen. Nichtlineare Dynamik bedeutet aber, dass wir diese Prozesse nicht in allen Details zentral steuern können. Wir müssen also rechtzeitig die Instabilitätspunkte und möglichen Ordnungsparameter erkennen, die globale Trends dominieren könnten. Ihre Gesetze verstehen bedeutet nicht, sie berechnen und beherrschen zu können. Sensibilität für empfindliche Gleichgewichte ist eine neue Qualität der Erkenntnis nichtlinearer Dynamik.

Religiöse, philosophische und kulturelle Traditionen Asiens, die Sensibilität für die Gleichgewichte in Natur und Gesellschaft betonen, scheinen daher besonders gut auf die Herausforderungen der Globalisierung vorbereitet. Es kann nicht darum gehen, einen

Wahrheitsanspruch gegen jede andere Sichtweise durchzusetzen. In einer komplexen Welt müssen Spannungen ertragen werden, um Friedfertigkeit und Integration zu erreichen. Mit hoher Sensibilität für die Vielheit der Perspektiven muss die Einheit gesucht werden. Einheit ist aber kein endgültiger Fixpunkt einer starren politischen Ordnung, in dem die weltweite Dynamik eingefroren werden könnte. In der Nichtgleichgewichtsdynamik ständiger Veränderung benötigen wir die Gelassenheit und innere Ruhe, die in einer Jahrtausende alten Tradition der Philosophie und Religion gefordert wird. Dazu gehört auch, Gelassenheit durch Loslassen von Fixierungen zu üben, um für neue Herausforderungen wieder frei zu werden. In der abendländischen Tradition Europas und Nordamerikas scheinen diese Einsichten verloren zu gehen: Ein gefährliches Defizit! Heidegger sprach von der Seinsvergessenheit technisch-wissenschaftlicher Zivilisationen. Diese Kritik sollte nicht als Technikfeindlichkeit ausgelegt werden. Wir brauchen innovative Technik wie nie zu vor, um die komplexe Dynamik einer globalisierten Welt gestalten zu können. Wir brauchen aber auch den inneren Frieden und die Gelassenheit, um das rechte Maß im Tempo dieser Veränderungen zu finden. Europa kann von der Dynamik und Innovationskraft Asiens, aber auch von seiner alten Philosophie, Kultur und Religion lernen..

Literaturhinweise

K. Mainzer, *Thinking in Complexity. The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*, Springer-Verlag 4. erweiterte Aufl. 2004; ders., *KI – Künstliche Intelligenz. Grundlagen intelligenter Systeme*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft 2003; ders. (Hrsg.), *Komplexität und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*, Springer 1999; ders., A. Müller, W.G. Saltzer (Hrsg.), *From Simplicity to Complexity: Information, Interaction, Emergence*, Vieweg 1998; ders., *Komplexität in der Natur*, in: *Nova Acta Leopoldina* NF 76, Nr. 303, 165-189 (1997); ders., *Vom Komplexitäts- zum Kreativitätsmanagement. Auf Talentsuche in der Wissensgesellschaft*, in: K. Götz (Hrs.),

Personalarbeit der Zukunft. Managementkonzepte DaimlerChrysler AG. Rainer Hamp Verlag 2002, 13-25; E.R. Nakamura (Ed.), *Complexity and Diversity*, Springer- Verlag 1997.