Chaos- und Komplexitätstheorie

Peter Kappelhoff

Februar 2003

1. Modelltheoretische Grundlagen

Dem Anspruch nach ist die Chaos- und Komplexitätstheorie eine allgemeine Theorie der Entstehung, Weiterentwicklung und eventuell auch des Zusammenbruchs einer komplexen Ordnung, die für unterschiedliche Anwendungsbereiche aussagekräftig ist. Die Modelle der Chaos- und Komplexitätstheorie können als Teil einer allgemeinen Theorie dynamischer Systeme verstanden werden. Ein zugrunde liegender physikalischer, biologischer oder sozialer Prozess wird modelliert, indem die Systemzustände abstrakt als Vektoren in einen sogenannten Phasenraum abgebildet und die dynamischen Abhängigkeiten zwischen den Systemzuständen mit Hilfe von Modellgleichungen erfasst werden. Ein konkreter Systemverlauf kann dann ausgehend von einem Anfangszustand als Pfad bzw. Trajektorie im Phasenraum gemäß den Modellgleichungen berechnet werden. Das Verhalten solcher dynamischer Systeme kann einerseits rein mathematisch und mit Hilfe von Simulationsstudien untersucht werden. In diesem Sinne sind die Modelle der Chaos- und Komplexitätstheorie Bestandteil der mathematischen Systemtheorie. Andererseits können dynamische Modelle aber auch substanzwissenschaftlich interpretiert werden und sind als solche Bestandteil der theoretischen Physik, Biologie oder Sozialwissenschaft. Schließlich kann die Erklärkraft solcher Modelle in den jeweiligen Anwendungskontexten empirisch überprüft werden. Dazu stellt die mathematische Systemtheorie Maßzahlen zur Verfügung, mit denen die Passung zwischen dynamischen Modellen und empirisch ermittelten Zeitreihen beurteilt werden kann.

Kern der Chaostheorie (CT) ist die mathematische Theorie des sogenannten deterministischen Chaos. Die CT zeigt, dass deterministisches Chaos bereits in einfachen dynamischen Systemen, also Systemen mit nur wenigen, nichtlinear gekoppelten Freiheitsgraden auftreten kann. Die CT hat wesentlich dazu beigetragen, unsere Vorstellungen über mögliche Ordnungszustände in dynamischen Systemen zu erweitern. Deterministisches Chaos kann als ein besonderer Ordnungszustand aufgefasst werden, der neben stabilen und periodischen Ordnungen existiert, d.h. als ein seltsamer Attraktor neben Punkt- und periodischen Attraktoren. Als ein, wenn auch aus der traditionellen Sicht ungewöhnlicher Ordnungszustand unterscheidet sich deterministisches Chaos (schwaches Chaos) grundlegend von reinen Zufallsprozessen (starkem Chaos). Die CT entdeckt also dort (mathematische) Tiefeneinfachheit, wo (empirisch) Oberflächenkomplexität herrscht, die auf den ersten Blick kaum von reinen Zufallsprozessen unterschieden werden kann. Zeitreihen als empirische Manifestationen eines dynamischen Prozesses können mit den Mitteln der CT auf das Vorliegen von deterministischem Chaos hin untersucht werden, eine Möglichkeit, die auch zur empirischen Untersuchung organisationaler Prozesse genutzt werden kann.

Ziel der Komplexitätstheorie (KT) ist es, die allgemeinen Gesetze der Emergenz von Ordnungszuständen in komplexen Systemen auf einer abstrakten Modellebene zu verstehen und dann auf die unterschiedlichsten substanzwissenschaftlichen Anwendungsbereiche zu übertragen. Grundlage der KT ist das abstrakte Konzept eines komplexen adaptiven Systems (KAS). KAS können als Systeme komplex vernetzter Wechselwirkungen mit einer Vielzahl von Freiheitsgraden aufgefasst werden, also als komplexes Geflecht von in der Regel nichtlinearen Wechselwirkungen, die sich weder einfach berechnen noch stochastisch eliminieren lassen. Die resultierenden komplexen Dynamiken können nur in Einzelfällen mathematisch exakt verstanden werden und müssen in der Regel mit Hilfe von Simulationsexperimenten untersucht werden. Chemische Reaktionsnetzwerke, genetische Netzwerke, neuronale Netzwerke, Ökosysteme, technische und wirtschaftliche Systeme, um nur einige Anwendungsbeispiele zu nennen, die in der KT eine hervorgehobene Rolle spielen, können als KAS modelliert werden. Aus sozialwissenschaftlicher Sicht von besonderem Interesse sind insbesondere Multiagentensysteme, also KAS, die aus interaktiv vernetzten autonomen Agenten bestehen, die selbst wieder als KAS, etwa im Sinne von Modellen der Künstlichen Intelligenz, aufgefasst werden können. Viele Simulationen aus den Bereichen Künstlichen Lebens und Künstlicher Gesellschaften beruhen auf Modellen, die als KAS von KAS im gerade explizierten Sinne verstanden werden können.

1.1 Chaostheorie

Paradebeispiel für die endogene Erzeugung von „schwachem (niedrigdimensionalen) Chaos" ist das schon von Henri Poincaré gegen Ende des 19. Jahrhunderts studierte Dreikörperproblem der Newtonschen Mechanik. Dabei handelt es sich um ein nichtlineares Differentialgleichungssystem mit drei Freiheitsgraden. Poincaré erkannte, dass sich die Störungen des zusätzlichen dritten Körpers durch Rückkopplungen verstärken und so unvorhersagbare Veränderungen in den (weiterhin deterministischen und prinzipiell berechenbaren) Bahnen der beiden anderen Körper hervorrufen können. Poincaré sah also deutlich, dass deterministisches Chaos bei den Planetenbewegungen, also im Falle eines konservativen nichtlinearen dynamischen Systems, möglich ist. Die Konsequenzen aus seinen Berechnungen wagte aber auch Poincaré noch nicht zu ziehen: „Die Dinge sind so bizarr, dass ich es nicht ertrage, weiter darüber nachzudenken" (zitiert nach Briggs/Peat 1990, S.38).

Die Existenz von deterministischem Chaos als Systemzustand ergibt sich also notwendig aus dem Weltbild der Newtonschen Mechanik und war somit ein, wenn auch wenig beachteter Bestandteil des Standardwissens in der theoretischen Physik. Aber erst in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts waren die Zeit reif und die Computer stark genug, um eine neue Phase in der Erforschung des deterministischen Chaos einzuleiten. Das deterministische Chaos in einfachen nichtlinearen dynamischen Systemen wurde zentraler Bestandteil der sich rasant und weltbildmächtig entwickelnden CT, einem Vorläufer der KT. Der Meteorologe Edward Lorenz stieß bei Computersimulationen mit einem System nichtlinearer Differentialgleichungen mit drei Freiheitsgraden auf chaotische Phänomene, als er abgebrochene Simulationsläufe mit geringfügig gerundeten Werten fortsetzen wollte. Das Lorenzsche Klimamodell ist ein einfaches Beispiel für deterministisches Chaos in einem dissipativen System (vgl. Schuster 1984, S. 9, 92). Der Physiker Robert May konnte zeigen, dass auch die Verhulstgleichung, also die einfache logistische Differenzgleichung mit einem Freiheitsgrad, die Wachstumsprozesse bei begrenzten Ressourcen modelliert, in Abhängigkeit von dem Wachstumsparameter zu deterministischem Chaos führen kann (vgl. Schuster 1984, S. 13, 31 ff). Wie der Fall der (nichtlinearen) logistischen Differenzgleichung zeigt, können zeitdiskrete Modelle schon im eindimensionalen Fall deterministisches Chaos zeigen (May); für den Fall zeitstetiger Differentialgleichung sind mindestens drei Freiheitsgrade mit nichtlinearen Wechselwirkungen erforderlich (Poincaré, Lorenz).

Nichtlinearität ist eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung für das Entstehen von deterministischem Chaos. Im Gegensatz zu den linearen existiert nämlich für die nichtlinearen Differentialgleichungssysteme keine allgemeine Lösungstheorie; jede Gleichung beschreibt eine einzigartige Dynamik, die speziell analysiert werden muss. Bedingung für das Auftreten von deterministischem Chaos ist, dass sich ursprünglich nahe Trajektorien exponentiell (siehe Lyapunov-Exponent) voneinander entfernen. Dadurch werden Vorhersagen über längere Zeiträume praktisch unmöglich. Chaotische Systeme sind als determinierte Systeme also zwar weiterhin grundsätzlich berechenbar, aber nicht analytisch lösbar und damit praktisch auch nicht prognostizierbar. Was nämlich grundsätzlich, etwa für den Laplaceschen Dämon, berechenbar ist, braucht praktisch nicht vorhersagbar zu sein. Diese Empfindlichkeit gegenüber äußerst kleinen Veränderungen in den Anfangsbedingungen wird üblicherweise als Schmetterlings-Effekt bezeichnet. In chaotischen Bereichen der Dynamik können also kleine Ursachen große Wirkungen haben.

Die CT erweitert die Typologie der Attraktoren dynamischer Systeme um einen zusätzlichen Typ. Neben Fixpunkten und (möglicherweise mehrdimensionalen) periodische Attraktoren können in chaotischen Systemen auch seltsame Attraktoren auftreten. Da sich auch im Fall seltsamer Attraktoren die Trajektorien weiterhin in einem begrenzten Teil des Phasenraumes bewegen, muss sich der Prozess neben der exponentiellen Streckung (Lyapunov-Exponent größer null) auch in sich zurück falten (sogenannte Bäckertransformation). Seltsame Attraktoren weisen daher selbstähnliche Strukturen auf, die mit dem mathematischen Instrumentarium der fraktalen Geometrie untersucht werden können. Deterministisches Chaos wird auch als schwaches (niedrigdimensionales) Chaos bezeichnet und muss von starken (hochdimensionalen) Chaos im Sinne echter Zufallsprozesse unterschieden werden. Im Gegensatz zum deterministischen Chaos verfügen Zufallsprozesse über keinerlei Attraktoren. Echte Zufallsprozesse stellen „weißes Rauschen“ im strengen Sinne dar, wie es in Systemen mit einer sehr großen Zahl von Freiheitsgraden auftritt, etwa bei einem Münzwurf oder der Brownschen Molekularbewegung.

Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung der Art und der Dimensionalität eines Attraktors (Schuster 1984, 18 ff). Der Lyapunov-Exponent L charakterisiert den Grad der Kon- bzw. Divergenz von benachbarten Trajektorien. Dabei bedeutet exp(L) die durchschnittliche Zunahme des Abstandes d zweier benachbarter Trajektorien pro Zeiteinheit. Daraus folgt, dass für negatives L der anfängliche Abstand d mit der Zeit gegen 0 konvergiert, für positives L dagegen exponentiell anwächst. Damit entsprechen negative Exponenten einem stabilen System im Sinne der Konvergenz auf konventionelle Attraktoren, seien es Punkt- oder periodische Attraktoren. Der Wert 0 entspricht Bifurkationspunkten des Systems, also Gebieten besonders hoher Umweltsensibilität. Positive Exponenten bezeichnen seltsame Attraktoren und genuin zufällige Dynamiken. Da Lyapunov-Exponenten den Grad der Divergenz des Systems anzeigen, können sie auch benutzt werden, um den Zeithorizont zu berechnen, für den das System bei gegebenem Anfangsfehler Prognosen einer gewünschten Genauigkeit zulässt. Lyapunov-Exponenten können exakt aus den dynamischen Systemgleichungen berechnet oder auch empirisch, z.B. aus Zeitreihen, geschätzt werden. Ein weiteres wichtiges Maß ist die (fraktale) (Korrelations-)Dimension eines Attraktors. Konvergiert die Korrelationsdimension bei steigender Einbettungsdimension, so liegt ein chaotischer Prozess vor und die nächstgrößere ganze Zahl gibt die Anzahl der Freiheitsgrade des Prozesses an. Konvergiert die Korrelationsdimension dagegen nicht, so liegt ein genuiner Zufallsprozess vor. Der Lorenz-Attraktor etwa hat die fraktale Dimension von 2,05, kann also in einen dreidimensionalen Raum eingebettet werden.

Auch chaotische Dynamiken bleiben in Grenzen vorhersagbar. Diese gilt allerdings nur kurzfristig, und zwar je besser, desto genauer die Messungen und je höher der Rechenaufwand sind und desto niedriger der (positive) Lyapunov-Exponent des Systems ist.

Unabhängig davon sind statistische Vorhersagen, etwa als Eintrittswahrscheinlichkeit von Wetterereignissen im Sinne eines Mittelwertes für die nächsten 1000 Zeitperioden im Falle der Lorenzgleichungen, grundsätzlich weiterhin möglich. Diese Vorhersagen auf der statistischen Ebene beruhen gerade auf der inhärenten Instabilität chaotischer Dynamiken. Darüber hinaus ermöglicht die fraktale Geometrie eine Bestimmung der Dimensionalität und der Gestalt eines seltsamen Attraktors. Damit kann der Bereich des Phasenraums spezifiziert werden, in dem sich das deterministische Chaos entfalten muss. Außerdem weist auch das deterministische Chaos mathematische Gesetzmäßigkeiten auf. So wird der sogenannte Feigenbaum-Weg zum Chaos (über eine Kaskade von Periodenverdopplungen als Folge von Gabel-Bifurkationen) durch die Feigenbaumzahlen als universellen Konstanten gesteuert (Schuster 1984, S. 35).

1.2 Komplexitätstheorie

Gegenstand der KT ist die Erforschung der Bedingungen für die Evolution einer evolutionsfähigen Ordnung in KAS (Kauffman 1996). Die KT beginnt als dort, wo die CT endet und fragt nach Prozessen der Ordnungsbildung in einer potentiell chaotischen Welt. Eine der grundlegenden Einsichten der KT ist die Möglichkeit spontaner Ordnungsbildung in komplex vernetzten dynamischen Systemen. Ein einfaches Modell eines dynamischen Interdependenzsystems ist ein Boolesches NK-Zufallsnetzwerk bestehend aus N K-fach vernetzten Agenten. Jeder der Agenten verfügt über zwei Aktivitätszustände, die dynamisch von den Aktivitätszuständen der mit dieser Komponente zufällig vernetzten K anderen Komponenten abhängt. Diese Abhängigkeiten werden durch jeweils spezifische, aber ebenfalls zufällig generierte Boolesche Funktionen modelliert. Insgesamt entsteht damit ein sich dynamisch entfaltendes System komplex vernetzter Wechselwirkungen.

In Abhängigkeit von der Beziehungsdichte K lassen sich drei Ordnungszustände unterscheiden (Kauffman 1996, Kap. 4): Bei minimaler Beziehungsdichte (K=1) zerfällt das System wegen zu geringer Wechselwirkungen in kurze, meistens lokal stabile Zustandszyklen. Sind die Wechselwirkungen zu dicht, zeigt das System „chaotisches" Verhalten. Die Zustandszyklen sind irregulär, also extrem lang in Hinblick auf den Zeithorizont des Systems und außerdem äußerst instabil. Allerdings ist die Charakterisierung dieser Systemzustände als „chaotisch" nur im metaphorischem Sinne einer aus praktischer Sicht vollkommen irregulären Trajektorie zu verstehen, da es sich nicht um echtes deterministisches Chaos (vgl. 1.1) handelt. In einem schmalen Zwischenbereich zwischen diesen beiden Systemzuständen starrer Ordnung und „chaotischer" Dynamik, etwa bei K=2, liegt ein Bereich komplexer und zugleich relativ stabiler zyklischer Attraktoren, den Kauffman als „Ordnung am Rand des Chaos" bezeichnet. Eine der zentralen Einsichten der KT ist es also, dass auch komplexe zufallsinduzierte dynamische Systeme in Abhängigkeit von ihrer Vernetzungsdichte K eine Tendenz zur Selbstorganisation aufweisen. Kauffman spricht hier von „Ordnung zum Nulltarif". Genauere Analysen zeigen außerdem, dass sich solche Ordnungen am Rande des Chaos auch bei höherer Beziehungsdichte (K>2) einstellen, wenn die die Interdependenzen spezifizierenden Booleschen Funktionen nicht zufällig, sondern kanalisiert sind (Kauffman 1996, S. 130 ff). Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Bestimmung des Zielzustandes durch die Boolesche Funktion weitgehend durch einen der insgesamt K Eingangszustände bestimmt wird, wie dies z.B. in hierarchischen Interdependenzsystemen der Fall ist.

Komplex vernetzte Systeme verfügen also über Ordnungszustände am Rande des Chaos, die ein prekäres Gleichgewicht zwischen Ordnung und Chaos repräsentieren. In diesem Übergangsbereich sollten dynamische Systeme am ehesten in der Lage sein, Ordnungs- und

Anpassungsfähigkeit miteinander zu verbinden. Es kann also vermutet werden, das KAS eine Tendenz haben, zum Chaosrand zu evolvieren und sich dort in einem Zustand optimaler Evolutionsfähigkeit weiter zu entwickeln. Diese überaus weitreichende Vermutung der KT kann zumindest ansatzweise durch Simulationsexperimente mit NK-Fitnesslandschaften untermauert werden (Kauffman 1996, Kap. 8). Diese Überlegungen sind insbesondere deshalb von großer Bedeutung, weil sie es ermöglichen, eine theoretische Verbindung zwischen Selbstorganisations- und Evolutionstheorie herstellen. Danach ist der evolutionäre Mechanismus von blinder Variation und selektiver Retention nicht die einzige Quelle von Ordnung. Evolutionäre Ordnungsbildung überformt lediglich die durch Selbstorganisation erzeugte „Ordnung zum Nulltarif" und ist umgekehrt in ihrer Funktionsweise auf diese flexiblen Ordnungsformen am Rande des Chaos angewiesen.

NK-Fitnesslandschaften modellieren K-fach gekoppelte Fitnesslandschaften zwischen N Agenten (Kauffman 1996, S. 257 ff). Die evolutionäre Dynamik eines solchen Systems lässt sich nicht zerlegen und für jeden Agenten isoliert bestimmen, sondern folgt einer komplexen koevolutionären Dynamik, da die Fitnesslandschaft jedes einzelnen Agenten nicht nur von den eigenen Aktivitätszuständen, sondern auch von denen der K anderen, evolutionär gekoppelten Agenten abhängt. Solche gekoppelten Fitnesslandschaften verfügen in Abhängigkeit von dem Kopplungsparameter K über eine äußerst variable Topologie. Ist K=N-1, so sind die Fitnesslandschaften der Agenten vollständig vernetzt und die Gesamtfitness des Systems kann durch die Veränderung des Aktivitätszustandes eines einzigen Agenten völlig verändert werden. In einer derart stark zerklüfteten, völlig irregulären Gesamtfitnesslandschaft wird ein zufällig operierender evolutionärer Suchmechanismus kaum eine optimale Variante finden können – es kommt zur sogenannten Komplexitätskatastrophe. Umgekehrt wird für K=0 eine zwar hochkorrelierte, aber glatte Gesamtfitnesslandschaft erzeugt, in der ein einmal gefundenes Optimum nicht festgehalten werden kann, zumindest dann nicht, wenn die Anzahl der Agenten N groß ist – es kommt zur sogenannten Fehlerkatastrophe.

Wiederum kann ein besonderer Systemzustand moderater Koppelung der Fitnesslandschaften als ein schmaler „Korridor der Evolvierbarkeit" ausgezeichnet werden. Dabei handelt es sich also um „Koevolution *am* Rande des Chaos". Dieser Bereich der Systemvernetzung und evolutionärer Kopplung kann als Bereich optimaler Ordnungs- und Evolutionsfähigkeit zwischen Rigidität und Chaos angesehen werden. Weitere Simulationsexperimente mit evolutionär variabler Vernetzungsdichte zeigen, dass dieser Korridor der Evolvierbarkeit durch eine evolutionäre Koevolutionsdynamik erreicht werden kann. In diesem Sinne handelt es sich also um Koevolution *zum* Rand des Chaos. Die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen für die Gestaltung der Vernetzung von Systemen sind für die Organisationstheorie von unmittelbarer Bedeutung (vgl. 2.1).

Allerdings bedeutet die Charakterisierung eines Systemzustandes als „Rand des Chaos" auch, dass ständig die Gefahr des „Abrutschens" in starre Ordnungen und insbesondere auch chaotische Dynamiken droht. Auch die KT betont daher den unberechenbaren und potentiell chaotischen Verlauf koevolutionärer Systemdynamiken. Aus einer anderen Perspektive wird dieser Aspekt der KT durch den Begriff der selbstorganisierten Kritizität veranschaulicht, durch den eine Tendenz von komplexen Systemdynamiken bezeichnet wird, in den „chaotischen" Bereich abzudriften (vgl. Bak und Chen 1991). Typischerweise entwickelt sich daraus eine Sequenz von partiellen Systemzusammenbrüchen in Form von nicht vorhersagbaren Kettenreaktionen lokaler Wechselwirkungen, anschließender Reorganisation und erneutem Aufbau von selbstorganisierter Kritizität, die schließlich wieder in einen neuen Systemzusammenbruch einmündet, wie dies auch die Theorie „durchbrochener

Gleichgewichte“ vorhersagt. Gerade in der Organisationstheorie hat dieses Modell durchbrochener Gleichgewichte Bedeutung erlangt, wie etwa die Theorie organisationalen Wandels von Miller und Friesen (1984) zeigt.

Allerdings ist die KT noch weit von ihrem Anspruch entfernt, eine allgemeine Theorie der Ordnungsbildung in komplexen Systemen zu sein. Zu dieser Einschätzung kommt auch Kauffman selbst, wenn er einräumt: „ Nirgendwo in der Wissenschaft gibt es eine geeignete Methode, um die Verzahnung von Selbstorganisation, Selektion, Zufall und planmäßiger Gestaltung zu erfassen und zu erforschen“ (1996, S. 281). Dies gilt insbesondere, wenn es um „planmäßige Gestaltung“ und damit um die Möglichkeit der Anwendung von Einsichten der CT und der KT in den Sozialwissenschaften geht.

2. Die Bedeutung der Chaos- und Komplexitätstheorie für die Betriebswirtschaftslehre

2.1 Einige exemplarische Anwendungen

Anwendungen der CT in den Sozialwissenschaften sind mit einem grundsätzlichen Problem konfrontiert. Wie in 1.1 gezeigt wurde, beruhen die Modelle des deterministischen Chaos auf nichtlinearen Differenz- bzw. Differentialgleichungen mit nur wenigen Freiheitsgraden. Solche theoretischen Modelle sind aber in den Sozialwissenschaften gegenwärtig kaum vorhanden, sieht man einmal von einigen Modellierungsversuchen, etwa von Dynamiken der Unternehmensentwicklung (Pinkwart 1992) und von Dynamiken des Wettrüstens (Saperstein 1996), ab. So kann Saperstein zeigen, dass in Einklang mit den theoretischen Erwartungen die chaotischen Bereiche in einer tripolaren Welt größer sind als in einer bipolaren. Pinkwart entwickelt ein einfaches Modell irregulärer Unternehmensentwicklung, das auch empirisch mit Daten über Forschungsquoten und Umsatzrenditen von Unternehmen getestet wird. Darüber hinausgehende metaphorische Anwendungen der CT auf der Ebene theoretischer Argumentation werden dadurch erschwert, dass sich das Konzept des deterministischen Chaos gegen allzu simple metaphorische Übertragungen sperrt und rein metaphorische Übertragungen eines diffusen Begriffs des „Chaos“ theoretisch nicht sehr attraktiv sind.

Weiter wird in empirischen Untersuchen geprüft, inwieweit sich dynamische Abläufe mit Hilfe seltsamer Attraktoren beschreiben lassen. Dazu werden Zeitreihen mit dem Instrumentarium der CT analysiert. Insbesondere werden der Lyapunov-Exponent und die Korrelationsdimension geschätzt, um feststellen zu können, ob überhaupt chaotische Verläufe vorliegen und ob es sich um deterministisches (schwaches) Chaos oder rein zufällige Dynamiken (starkes Chaos) handelt (vgl. 1.1). So untersuchen z.B. Baum und Silverman (2001) die technologische Entwicklung in kooperativ und kompetitiv gekoppelten interorganisationalen Systemen am Beispiel von Zeitreihen über die Häufigkeit von Patenten im Bereich der Lasertechnologie. Wie die Analysen mit Hilfe von Lyapunov-Exponent und Korrelationsdimension zeigen (vgl. 1.1), fallen die untersuchten Trajektorien für die betrachteten Patentklassen der Lasertechnologie in den Bereich des deterministischen Chaos mit vermutlich 4 Freiheitsgraden. Allerdings ist bei empirischen Überprüfungen dieser Art immer zu beachten, dass im Idealfall unendlich lange Zeitreihen und fehlerfreie Messungen vorausgesetzt werden müssen. Das bedeutet umgekehrt, dass die Schätzungen um so unzuverlässiger sind, je kürzer und fehlerbehafteter die Zeitreihen sind. Außerdem, und dies ist aus theoretischer Sicht besonders problematisch, muss vorausgesetzt werden, dass der die Zeitreihe generierende soziale Prozess durch ein zeitlich konstantes theoretisches Modell beschrieben werden kann.

Es existiert ein außerordentlich breites Spektrum von Anwendungen der KT in der Betriebswirtschaftslehre. Insbesondere im Bereich des Managements komplexer Prozesse sind Anwendungen der KT zu einer Modeerscheinung geworden (vgl. Kappelhoff 2002). Dabei kann zwischen direkten Anwendungen der Modelle der KT auf organisationstheoretische Problemstellungen und rein metaphorischen Verwendungen der Begrifflichkeit der KT in einem respezifizierten Theoriekontext unterschieden werden. Exemplarisch sollen im Folgenden die erste Variante am Beispiel der quasi-naturalistischen Organisationstheorie von McKelvey (1999) und die zweite am Beispiel der interpretativ-konstruktivistischen Organisationstheorie von Stacey u.a. (2000) dargestellt werden.

Eine der elaboriertesten direkten Übertragung eines komplexitätstheoretischen Modells auf organisationstheoretische Fragstellungen, nämlich eines erweiterten Modells der NK-Fitnesslandschaften (vgl. 1.2), stammt von McKelvey (1999), einem der Hauptvertreter des populationsökologischen Ansatzes. Dabei wird die bereits in der Populationsökologie enthaltene Außenperspektive der Selektion durch die Umwelt durch eine Innenperspektive der endogenen Organisationsentwicklung ergänzt. Eine Firma wird als Bündel von Kompetenzen betrachtet, die intern zu organisieren sind, und zwar so, dass die Firma in ihrem Marktsegment besonders anpassungs- und damit konkurrenzfähig ist (vgl. auch die Überlegungen zur „Logik der Felder“ bei Kauffman 1996, S. 366 ff.). Es handelt sich also um ein Mehrebenenmodell, in dem zunächst die Fitnesslandschaften der Kompetenzen einer Firma intern gekoppelt sind. Auf der Ebene der Marktkonkurrenz gilt das gleiche dann wiederum für die Fitnesslandschaften der Firmen untereinander. Die Ergebnisse der Simulationsexperimente zeigen, dass die Firmen sich dann am besten entwickeln, wenn sie sich auf Märkten mit moderatem Wettbewerbsdruck intern so organisieren, dass ihre innere Komplexität in etwa der Marktkomplexität entspricht (Gesetz der erforderlichen Komplexität).

Eine weitere Form der Anwendung der KT ist die Verbindung komplexitätstheoretischer Einsichten mit Elementen anderer Theorietraditionen zu einer neuen organisationstheoretischen Perspektive. So versuchen Stacey, Griffin und Shaw (2000), die auf der Grundlage eines naturalistisch-emergentistischen Wissenschaftsverständnisses gewonnenen Einsichten der KT zu dekontextualisieren und dann in eine interpretativ-konstruktivistisch argumentierende Organisationstheorie zu integrieren. Als Einwand gegen die KT als objektivistische Wissenschaft wird vorgebracht, dass sie eine Systemdynamik lediglich als Entfaltung einer schon im System vorhandenen Tendenz der Strukturierung, also als Evolution im wörtlichen Sinne, auffasst. In der Konzeption von Stacey, Griffin und Shaw ist Handlungswissen dagegen unmittelbar mit den relationalen, individualistischen nicht auflösbaren organisationalen Prozessen verbunden, die sich kreativ und systemisch unberechenbar entfalten. Hier wird eine Verbindung zu den interpretativ argumentierenden Arbeiten über Pfadabhängigkeit und Pfadgestaltung deutlich (vgl. auch Garud und Karnoe 2001). Kern des Arguments ist, dass eine angemessene Berücksichtigung der Gestaltungsdimension eine hinreichend komplexe Modellierung menschlicher Handlungskomplexität, d.h. eine neue Ebene emergenter Komplexität, erfordert (vgl. auch Kappelhoff 2002).

2.2 Zusammenfassende Beurteilung

Im vorigen Abschnitt habe ich versucht, auf einige grundlegende Probleme der Anwendung von Modellen und Metaphern der CT und KT hinzuweisen. Bezogen auf direkte Übertragungen von Modellen der CT und KT hat sich ein gewisses Spannungsverhältnis zwischen den konkreten Ergebnissen der Modellsimulationen und den daraus gezogenen weitreichenden sozialwissenschaftlichen Schlussfolgerungen gezeigt. Allerdings dürfte auch klar geworden sein, dass die bereits vorliegenden Ergebnisse im Vergleich zu den Vorläufertheorien der Synergetik, dissipativer Strukturen und autopoietischer Systeme einen deutenden Erkenntnisfortschritt darstellen. Dazu genügt es, an Stichworte wie deterministisches Chaos, Ordnung am Rand des Chaos und Koevolution am Rand des Chaos, aber auch an Komplexitätskatastrophe, selbstorganisierte Kritizität und durchbrochene Gleichgewichte zu erinnern.

Mit Recht ist darauf hingewiesen worden, dass die Einsichten von CT und KT zu einem grundlegenden Wandel des wissenschaftlichen Weltbildes beigetragen haben (Kauffman 1996). Um so wichtiger ist es aber zu betonen, dass dieser Wandel im Sinne einer Kritik und Erweiterung des traditionellen naturwissenschaftlichen *Weltbildes* keinen Wandel hin zu einer neuen, wie auch immer als nichtlinear, als holistisch oder gar als postmodern charakterisierten *Wissenschaftsauffassung* bedeutet. Im Gegenteil, die Entwicklung der CT und KT fand gerade im Rahmen der grundlegenden methodologischen Regeln statt, die für die Naturwissenschaften seit langer Zeit verbindlich sind und die auch in Teilen der Sozialwissenschaften in Form einer naturalistisch-emergentistischen Wissenschaftsauffassung Anerkennung finden. Die oft propagierte neue Wissenschaft die also die alte, seien die Modelle nun linear oder nichtlinear, einfach oder komplex. In diesem Rahmen lässt sich allerdings für die KT durchaus eine Verschiebung von reduktionistischen zu emergentistischen, von statischen zu dynamischen und von mechanistisch-deterministischen zu interpretativ-kontingenten Betrachtungsweisen konstatieren.

Von ihrem Erkenntnisinteresse her ist die KT durchaus mehr als nur ein abstrakter Rahmen für mathematische Modelle. Gerade die Simulationen in den Bereichen Künstlicher Intelligenz, Künstlichen Lebens und Künstlicher Gesellschaften machen deutlich, dass die KT den Versuch unternimmt, die Ebene steuernder Komplexität zu erreichen, die für die Modellierung sinnorientierten intentionalen Handelns notwendig ist. In diesem Sinne stellt die KT neben der allgemeinen Evolutionstheorie eine wichtige Grundlage für eine zu entwickelnde evolutionäre Sozialtheorie dar (vgl. Kappelhoff 2002). Von daher fällt die Prognose nicht schwer, dass die Beurteilung ihrer sozialtheoretischen Relevanz weiterhin Gegenstand kontroverser Debatten zwischen Vertretern der KT sein wird (vgl. Richerson und Cilliers 2001 und das zugehörige Schwerpunktheft von Emergence).

Bak, Per/Chen, K. (1991): Selbstorganisierte Kritizität. In: Spektrum der Wissenschaft, März 1991, S. 62-71.

Baum, Joel A. C.; Brian S. Silverman (2001): Complexity, Attractors, and Path Dependence and Creation in Technological Evolution. In: Garud, Raghu/Karnoe, Peter (Hrsg.) (2001): Path Dependence and Creation. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, S. 169-209.

Briggs, J./Peat, F.D. (1990): Die Entdeckung des Chaos. München: Hanser.

Garud, Raghu/Karnoe, Peter (Hrsg.) (2001): Path Dependence and Creation. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Kappelhoff, Peter (2002): Komplexitätstheorie: Neues Paradigma für die Managementforschung? In: Managementforschung 12 (hrsg. von Schreyögg, G./Conrad, P.), S. 49-101.

Kauffman, Stuart (1996): Der Öltropfen im Wasser. Chaos, Komplexität, Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft. München: Piper.

McKelvey, B. (1999): Self-Organization, Complexity Catastrophe, and Microstate Models at the Edge of Chaos. In: Baum, J.A.C./McKelvey, B. (Hrsg.): Variations in Organization Science. Thousand Oaks, S. 279-307.

Miller, D. /Friesen, P. (1984): Organisations: A Quantum View. Englewood Cliffs, NJ.

Pinkwart, Andreas (1992): Chaos und Unternehmenskrise. Wiesbaden: Gabler.

Richardson, Kurt/Cilliers, Paul (2001): What is Complexity Science? A View from Different Directions. In: Emergence 3, S. 5-23.

Saperstein, Alvin M. (1996): The Prediction of Unpredictability: Applications of the New Paradigm of Chaos in Dynamical Systems to the Old Problem of the Stability of a System of Hostile Nations. In: Kiel, L. Douglas/Elliott, Euel: Chaos Theory in the Social Sciences. Ann Arbor: University of Michigan Press, S. 139-163.

Schuster, Heinz Georg (1984). Deterministic Chaos. Weinheim: Physik-Verlag.

Stacey, Ralph D./Griffin, Douglas/Shaw, Patricia (2000): Complexity and Management. Fad or Radical Challenge to Systems Thinking? London: Routledge.