

Zweifel am Rande des Chaos

Wissenschaftstheoretische Probleme der Komplexitätsforschung

Diplomarbeit

der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Bern

vorgelegt von

Markus Christen

1996

Leiter der Arbeit:

Prof. Viktor Gorgé, Institut für theoretische Physik

Vorwort

Es gibt sicher Einfacheres, als sich mit Komplexem auseinanderzusetzen. Hinter diesem trivial anmutendem Wortspiel verbirgt sich schon eine ganze Menge an Absichten eines neuen Forschungsgebietes, das sich Komplexitätswissenschaft nennt. Diese will nicht weniger als eine Erklärung für Komplexität liefern. Die Suche nach einer solchen wirft natürlich eine Reihe von Fragen auf, die Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind. So etwa: Was ist Komplexität? Was ist Komplexitätsforschung? Wie erklärt man Komplexität? usw. Ich will diese hier nicht weiter explizieren. Vielmehr soll deutlich gemacht werden, warum ich überhaupt an dieser Problematik interessiert bin und welchen Nutzen man meines Erachtens aus der vorliegenden Untersuchung ziehen kann. Dies soll in diesem Vorwort geschehen.

Ich versuche, in meiner Arbeit eine kritische Einführung in die Komplexitätsforschung zu geben. Wie schon der Titel deutlich macht, bezieht sich der kritische Aspekt auf eine wissenschaftstheoretische Untersuchung des Gegenstands „Komplexitätsforschung“. Methoden, Forschungsprogramm, Ziele und Forschungsgebiete dieser neuen Wissenschaft sollen dargestellt und analysiert werden.

Vor allem zwei Gründe motivierten diese Untersuchung: Einerseits erscheint diese neue Wissenschaft auf dem ersten Blick spannend. Sie sucht gemäss eigenem Dafürhalten nach einer neuen, adäquateren Sicht der Natur und stellt sich der Herausforderung, eine Reihe sehr schwieriger Probleme lösen zu wollen. Andererseits machen die Ansprüche der Komplexitätsforschung auch misstrauisch. Sie verleiten zur Frage, welchen Stellenwert dieses neue Projekt im gesamten wissenschaftlichen Unternehmen der Menschen hat.

All diese Fragen machen deutlich, dass mit deren Beantwortung ein sehr grosser Aufwand verbunden sein kann. In der Tat bewegt sich meine Analyse im Spannungsfeld zwischen Umfassendheit und Tiefe. Ich habe mich dazu entschlossen, dem ersten Aspekt grössere Bedeutung zuzumessen. Dies hat zur Folge, dass eine Reihe von Fragen auftauchen, die nicht weiter verfolgt werden können. Die Arbeit skizziert in diesem Sinn mehr das „Problemfeld“ der Komplexitätsforschung, ohne dass die Frage über deren Status abschliessend beantwortet werden kann.

Trotz dieser Einschränkung kann diese kritische Untersuchung zu drei Aspekten Wichtiges beisteuern:

- Sie liefert eine **Einführung in die Komplexitätsforschung**. Dabei wird aber nicht nur deren historische Entstehung vorgestellt, was ebenso Thema anderer aktueller Publikationen ist, sondern auch das Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft soll ermittelt und kritisiert werden.
- Sie gibt einen **Übersicht über die Verwendung des Komplexitätsbegriffs** in den Wissenschaften. Dabei geht es nicht nur um notwendige begriffliche Präzisierungen, die geleistet werden. Vielmehr werden die verschiedenen Versuche, ein Mass für Komplexität einzuführen, so umfassend wie möglich präsentiert.
- Sie zeigt schliesslich auf, dass die Komplexitätsforschung in ihrer derzeitigen Form mit einer **Reihe von Schwierigkeiten** zu kämpfen hat, die sich in drei Zweifel verdichten.

Meine Diplomarbeit versteht sich nicht als Versuch, die Komplexitätsforschung als Ganzes zu diskreditieren. Vielmehr soll ein Diskussionsbeitrag zu einer aktuellen und kontroversen „neuen Wissenschaft“ geliefert werden.

Markus Christen, Mai 1996

Dank

Den Begriff „Komplexitätsforschung“ findet man im Organigramm der Universität Bern nicht. „Gleichgesinnte“ zu finden, war demnach nicht einfach. Ich möchte an dieser Stelle deshalb den Teilnehmern und der Teilnehmerin der von mir im Wintersemester 1995/96 organisierten Veranstaltung „Komplexität – Probleme eines neuen Paradigmas“ herzlich danken – insbesondere Herrn Prof. John S. Shiner und post-doc Matt Davison, beide vom Physiologischen Institut der Uni Bern. Die Diskussionen im kleinen Kreis haben mir diverse Ideen klar werden lassen, die in diese Arbeit geflossen sind. Matt Davison hat mich zudem auf wichtige Unklarheiten aufmerksam gemacht.

Danken möchte ich auch ganz herzlich meinem Betreuer der vorliegenden Arbeit, Herrn Professor Viktor Gorgé. Seine kritischen Bemerkungen haben wesentlich dazu beigetragen, dass der wissenschaftstheoretische Aspekt angesichts der Fülle von Fakten nicht untergegangen ist. Meinen Dank aussprechen möchte ich auch Herrn Professor Paul Hoyningen-Huene für die Durchsicht der Arbeit und seine kritischen Hinweise.

Erich Kuhn schliesslich hat die vorliegende Arbeit korrigiert, wofür ich ihm ebenfalls danken möchte. Damit ist nicht gesagt, dass ich die Verantwortung für die noch vorhandenen „Verbrechen an der deutschen Sprache“ bequem abschieben kann. Solche bleiben natürlich mein Verschulden.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit geht von der Tatsache aus, dass sich in den vergangenen Jahren eine sogenannte Komplexitätswissenschaft (bzw. Komplexitätsforschung) etabliert hat, die sich der Erklärung der Entstehung von Komplexität widmen will. Sie versucht, dieses Unterfangen zu explizieren und einer kritischen Betrachtungsweise zu unterziehen, wobei dem Zentralbegriff „Komplexität“ besondere Beachtung geschenkt wird.

Fünf Zielsetzungen sind formuliert worden: Erstens soll der facettenreiche Begriff „Komplexität“ bezüglich der möglichen Verwendungsweise untersucht werden. Zweitens soll der historische Ursprung der Komplexitätsforschung offengelegt werden. Drittens sollen verschiedene Konzepte von Komplexität, die innerhalb wissenschaftlicher Disziplinen Verwendung finden, vorgestellt werden. Viertens sollen Komplexitätsbegriff und Forschungsprogramm der Komplexitätsforschung dargestellt werden. Fünftens soll dargelegt werden, dass die Komplexitätsforschung in ihrem derzeitigen Selbstverständnis mit einer Reihe von Problemen zu kämpfen hat.

Zum Begriff „Komplexität“ selbst lassen sich vier Verwendungsweisen unterscheiden. Im Alltag ist meist von trivialer Komplexität die Rede. Entsprechende Sachverhalte sind unverstanden, und man rechnet weiter mit einem beträchtlichen Aufwand für die Erlangung von deren Verständnis. Ein konkretisierter Alltagsgebrauch führt zur intuitiven Komplexität. Etwas ist intuitiv komplex, wenn es aus vielen Teilen besteht, die mannigfaltig miteinander interagieren. Daraus ergeben sich ebenfalls Schwierigkeiten für das Verständnis solcher Systeme. Die Wissenschaft bemüht sich um quantitative Komplexität, d.h. ein Mass für Komplexität wird gesucht. Schliesslich finden sich auch Emergenzbehauptungen im Zusammenhang mit Komplexität, d.h. komplexe Systeme zeigen in irgendeiner Form Emergenz. Wir sprechen dann von Emergenzkomplexität. Die Extension des einstelligen Prädikats „komplex“ ist sehr umfassend und durch den konkreten Anwendungsfall gegeben. Eine wichtige Unterscheidung betrifft komplexe Strukturen versus komplexes Verhalten. Quantitative Komplexität bezieht sich meist auf erstere. Untersucht wurde zudem – wenn auch nicht umfassend – das Begriffsumfeld von „Komplexität“, gegeben durch „Einfachheit“, „Kompliziertheit“, „Chaos“, „Ordnung“, „Organisation“ und „Selbstorganisation“.

Die Untersuchung von Komplexität im Sinn der Komplexitätsforschung ist ein Phänomen des 20. Jahrhunderts. Institutionen und Vertreter dieser neuen Disziplin sind vorhanden, ebenso ein (wenn auch problematisches) Forschungsprogramm. Die Rede von einer Komplexitätsforschung ist also gerechtfertigt. Obwohl mit dem Aufkommen dieses neuen Gebietes zuweilen der Begriff „Paradigmenwechsel“ fällt, ist ein solcher unserer Ansicht nach nicht auszumachen.

Bemühungen um eine quantitative Komplexität finden sich in den verschiedensten Disziplinen. Die meisten Ansätze versuchen, die Komplexität von Strukturen mit dem Aufwand ihrer Beschreibung in Beziehung zu setzen. Im Einzelfall ergeben sich meist grosse Probleme. Ein universales Komplexitätsmass ist nicht vorhanden. Wir argumentieren, dass ein solches Mass beobachter- und schliesslich auch theorie-relativ ist.

Die Komplexitätsforschung hält das Auftreten von Emergenz für ein definitorisches Merkmal komplexer Systeme. Der Emergenzbegriff der Komplexitätsforschung ist hingegen sehr vage. Problematisch ist dies insbesondere im Zusammenhang mit dem Forschungsprogramm, das sich in die Formel „Oberflächenkomplexität durch Tiefeneinfachheit erklären“ fassen lässt, ein reduktionistisches Programm. Gesucht wird nach neuen Prinzipien für das Verständnis komplexer Systeme. Deren Geltungsanspruch ist sehr umfassend, d.h. auch Phänomene der Sozial-, Wirtschafts- und Geisteswissenschaften sollten erklärt werden können. Die Komplexitätsforschung hat demnach einen einheitswissenschaftlichen Charakter. Der Computer ist dabei nicht nur das zentrale Arbeitsinstrument der Komplexitätsforschung, sondern gleichsam eine Metapher für deren Weltansicht. Die Natur wird als analoger Computer bzw. zellulärer Automat betrachtet.

Die Komplexitätsforschung versteht sich als „entstehend“. Will sie zur Blüte gelangen, muss sie sich mit drei Zweifeln auseinandersetzen: Sie muss zeigen, wie sie die Heterogenität der zu untersuchenden Phänomene überwinden und zu einem einheitlichen Begriff eines „komplexen Systems“ gelangen will. Sie muss darlegen, wie sie mit der Theorie-relativität eines Komplexitätsmasses umgehen will. Schliesslich muss sie deutlich machen, welches Emergenzkonzept verwendet werden soll.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Dank	2
Zusammenfassung	3
Bemerkung zu Ziel und Methode	
1. Der Aufstieg der Komplexitätsforschung.....	7
2. Probleme der Komplexitätsforschung – Entwicklung einer Fragestellung.....	8
3. Zielsetzung und Methode.....	9
4. Zum Aufbau der Arbeit.....	10
Teil I Einführung	
1. Komplexität – eine Vorbemerkung zum Gebrauch dieses Begriffs.....	13
1.1. Triviale Komplexität.....	13
1.2. Intuitive Komplexität.....	14
1.3. Quantitative Komplexität.....	16
1.4. Emergenzkomplexität.....	16
1.5. Zur Extension des Prädikates „komplex“.....	17
2. Das begriffliche Umfeld.....	18
2.1. Kompliziertheit.....	18
2.2. Einfachheit.....	18
2.3. Chaos.....	19
2.4. Ordnung.....	21
2.5. Organisation.....	22
2.6. Selbstorganisation.....	23
3. Wissenschaftstheoretische Grundbegriffe.....	24
3.1. Erklärung von Komplexität.....	24
3.2. Reduktionismus.....	26
3.3. Emergenz.....	27
4. Seitenaspekte der Komplexität.....	30
4.1. Komplexität als Klassifikationskriterium wissenschaftlicher Disziplinen.....	30
4.2. Wissenschaft als Projekt der Komplexitätsreduktion.....	32
4.3. Das Management einer komplexen Welt.....	33
Teil II Wurzeln der Komplexitätsforschung	
1. Genese der Komplexitätsforschung.....	35
1.1. Komplexität als Problem der modernen Naturwissenschaft.....	35
1.2. Entwicklung einer Theorie der dynamischen Systeme – Mathematik als Ausgangspunkt...36	
1.3. Der Zweite Weltkrieg und die Entwicklung „atypischer Disziplinen“.....	37
1.4. Der Computer, Chaos und Selbstorganisation – die Rückkehr der Physik.....	40
1.5. Die verschiedenen Ansätze treffen sich – Entwicklung der Komplexitätsforschung.....	41
1.6. Die „Summer Schools“ des Santa-Fe-Institutes – eine Annäherung an die Komplexitätsforschung.....	43

2. Warren Weavers „Science and Complexity“	45
2.1. Charakterisierung des Forschungsfeldes – die „organisierte Komplexität“	46
2.2. Unabdingbare Methoden – Interdisziplinarität und der Computer.....	46
2.3. Eine neue Welt – zum Status der Komplexitätswissenschaft.....	47
3. Komplexität als neues Paradigma?.....	47
3.1. Kuhns Konzeption des wissenschaftlichen Wandels.....	48
3.2. Kein Paradigma Komplexität?.....	50

Teil III Konzepte von Komplexität

1. Ein kurzer Blick auf die Philosophie.....	53
2. Wissenschaftliche Gebiete mit einem nichttrivialen Konzept von Komplexität.....	58
2.1. Mathematik.....	58
2.2. Informatik.....	59
2.3. Physik.....	65
2.4. Biologie.....	71
2.5. Evolutionstheorie.....	76
2.6. Ökologie.....	79
2.7. Systemtheorie.....	80
2.8. Sozial- und Wirtschaftswissenschaften.....	87
3. Ein Versuch zur Charakterisierung von Komplexität.....	89

Teil IV Ein kritischer Blick auf die Komplexitätsforschung

1. Ziele der Komplexitätsforschung.....	91
1.1. Der Komplexitätsbegriff.....	91
1.2. Das Forschungsprogramm.....	92
1.3. Der interdisziplinäre Anspruch.....	95
1.4. Komplexitätsforschung als neue Einheitswissenschaft?.....	96
2. Komplexitätsforschung und Emergenz.....	98
2.1. Der Emergenzbegriff.....	98
2.2. Ein reduktionistisches Forschungsprogramm emergenter Phänomene?.....	101
3. Der Computer als Modell und als Werkzeug der Komplexitätsforschung.....	102
3.1. Computer und der universelle Berechenbarkeitsbegriff.....	102
3.2. Zelluläre Automaten.....	104
3.3. Forschung mit dem Computer – ergänzende Beispiele.....	107
4. Komplexität als neue Weltsicht.....	109
4.1. Komplexität – der Hype nach Chaos.....	109
4.2. Die antireduktionistische Welt der Komplexität.....	111

Teil V Drei Zweifel am Projekt der Komplexitätsforschung

1. Heterogenität.....	113
2. Relativität.....	114
3. Emergenz.....	114

Literatur.....	117
-----------------------	------------

Bemerkung zu Ziel und Methode

Auf den folgenden Seiten werden wir im Sinn einer ersten Einführung die Konzeption der Arbeit vorstellen. Dies beinhaltet zuerst einmal eine geraffte Präsentation der Ausgangslage – sprich das Aufkommen der sogenannten Komplexitätsforschung –, welche Anlass zu einer allgemeinen Grundfrage gibt. Kurz gefasst lautet diese: Was ist von dieser Komplexitätsforschung zu halten? Diese sehr allgemein umschriebene Problemstellung gibt Anlass zu einer Reihe konkretisierender Teilfragen, aus welchen wir die Zielsetzung entwickeln. Unter Vorstellung der verwendeten Methoden ergibt sich daraus ein Konzept zur Erreichung unseres Ziels, das gleichsam die Struktur der vorliegenden Untersuchung definiert. Hinweise auf formale Gestaltungselemente ergänzen schliesslich diese einführenden Bemerkungen.

1. Der Aufstieg der Komplexitätsforschung

Komplexität zu erforschen, mag verwegen erscheinen. Wir sind gerne bereit, die Welt als komplex zu bezeichnen, und die Erforschung des Komplexen wird zu einem Synonym für die Erforschung der Welt an sich. Komplexitätsforschung in diesem Sinn beinhaltet demnach das gesamte wissenschaftliche Unternehmen, ein unzweifelhaft komplexes Projekt.

Schon diese triviale Überlegung macht deutlich, dass die Rede von einer Komplexitätsforschung nicht ohne Schwierigkeiten ist. Diese wurzeln einmal in der Vagheit des Begriffs „Komplexität“ selbst. Um das Projekt dieser „neuen Wissenschaft“ also charakterisieren zu können, sind begriffliche Präzisierungen unumgänglich. Erst dann können wir solche trivialen Überlegungen ausschliessen und uns fragen, was die Komplexitätsforschung von den bisherigen wissenschaftlichen Unternehmungen unterscheidet.

Tatsache ist, dass es eine Reihe von wissenschaftlichen Projekten gibt, die unter dem Titel Komplexitätsforschung, Komplexitätswissenschaft oder auch Selbstorganisationsforschung laufen.¹ Es handelt sich hier um eine recht neue Richtung in den Naturwissenschaften, begleitet von vielfältiger populärer Literatur. Vor allem in dieser finden sich weitreichende Versprechungen, was deren Zielsetzung und Geltungskraft betrifft. Fast unvermeidlich fällt dabei der Begriff des „Paradigmenwechsels“, und Komplexität wird zu einer neuen wissenschaftlichen Weltsicht stilisiert.

Derartige Versprechungen, die wir im Laufe der Arbeit genau vorstellen werden, machen neugierig und misstrauisch zugleich. Was ist von einem Projekt zu halten, das nach „universellen Prinzipien“ für die Entstehung komplexer Strukturen in der Welt sucht? Warum sollen wir an eine Wissenschaft glauben, die uns verheisst, den Kosmos angemessener zu beschreiben? Ja selbst das ehrwürdige philosophische Leib-Seele-Problem soll in dieser Wissenschaft des Komplexen zu einer Lösung geführt werden.² Handelt es sich hier nur um Phantasien von Wissenschaftlern und ihren Kommentatoren, oder verbirgt sich hinter diesem Projekt ein machbarer Kern? Solche Fragen stellen sich unausweichlich, wirft man einen ersten kritischen Blick auf das Unterfangen Komplexitätsforschung.

Klar ist hingegen, dass sich die Komplexitätsforschung nicht auf einen neuen naturwissenschaftlichen „Hype“ reduzieren lässt. Zu viele Forscher arbeiten in den verschiedensten Disziplinen schon lange an Fragen, die später unter dem Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft zusammengefasst wur-

¹ Wir werden im Folgenden unter „Komplexitätsforschung“ und „Komplexitätswissenschaft“ dasselbe verstehen, während wir zwischen „Selbstorganisation“ und „Komplexität“ klar unterscheiden. In vielen, meist populär gehaltenen deutschen Publikationen bezeichnet der Begriff „Selbstorganisationsforschung“ aber oft dasselbe wie „Komplexitätsforschung“, so wie wir diese im Folgenden charakterisieren werden. Wenn wir von „Komplexitätstheorie“ sprechen, meinen wir damit die entsprechenden theoretischen Ansätze der Komplexitätsforschung. Daneben wird auch in der Informatik von einer Komplexitätstheorie gesprochen. Um Verwechslungen zu vermeiden, bezeichnen wir letztere künftig als „I-Komplexitätstheorie“.

² Solche und ähnliche Behauptungen finden sich im Übermass, vor allem in der populären Literatur. Ein Zitat unter vielen besagt: „Diese neue Wissenschaft des Komplexen steckt noch in ihren Kinderschuhen, verheisst aber, den Kosmos in genaueren und angemessenen Begriffen zu beschreiben und folglich zu einem besseren Verständnis und einer zuverlässigeren Vorhersage zu führen. Sie verheisst auch eine viel engere Verbindung zwischen der physikalischen Welt mit der des Geistes, eine Vereinigung dessen, was zuvor als etwas Getrenntes betrachtet wurde.“ Peak et al. (1995) S. 19. (vgl. auch Teil IV).

den. Auch hat die Komplexitätsforschung eine – wenn auch verhältnismässig junge – Geschichte. Sie hat ihre Institutionen und Vertreter. Sie hat aber auch ihre Probleme, unabhängig von der Kritik an den Überzeichnungen in der populären Literatur.³ Kurz gesagt gibt es also eine Komplexitätsforschung.

Mit diesen einleitenden Sätzen haben wir die Ausgangslage für die vorliegende Arbeit charakterisiert. Es steht ein wissenschaftliches Projekt im Zentrum, das schon einige Publizität hervorrief, das selbst aber seltsam vage erscheint. Oder ganz allgemein gefragt: Was ist von der Komplexitätsforschung zu halten?

2. Probleme der Komplexitätsforschung – Entwicklung einer Fragestellung

Diese Grundfrage verlangt nach Konkretisierung in mehrfacher Hinsicht. So muss klargestellt werden, was Komplexitätsforschung überhaupt ist. Dieser Aspekt ist mit der Präzisierung des Grundbegriffs „Komplexität“ verbunden, der in der Alltagssprache sehr verschieden verwendet wird. Diese notorische Quelle der Unsicherheit muss beseitigt werden. Weiter muss untersucht werden, was diese Forschungsrichtung von „klassischen“ Disziplinen unterscheidet. Dieses Problem führt auch zur Frage nach den historischen Ursprüngen der Komplexitätsforschung.

Ausgehend von diesen Analysen, den Publikationen jener Institutionen, die sich als Vorreiterinnen der Komplexitätsforschung sehen, und schliesslich den populär gehaltenen Büchern zur Propagierung dieser neuen Wissenschaft, ergibt sich das Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft. Wir verstehen darunter deren Ziele und Methoden. Dabei muss auch untersucht werden, ob überhaupt ein kohärentes Programm existiert.

Nach der Ermittlung der grundsätzlichen Ziele der Komplexitätsforschung folgen sofort weitere Fragen: In welchen Gebieten wird primär geforscht? Welche Methoden werden verwendet? Und schliesslich: Gibt es Einwände, welche das Erreichen des Ziels grundsätzlich in Frage stellen? All diese Aspekte hängen mit der Charakterisierung der Komplexitätswissenschaft zusammen.

Eng mit dieser Problemstellung verbunden ist schliesslich auch eine Analyse der Verwendungsweise des Begriffs „Komplexität“ in den Wissenschaften selbst. Wir werden feststellen, dass man sich in vielen Disziplinen mit diesem auseinandergesetzt hat, vor allem was Versuche zu dessen Quantifizierung betrifft. Die Suche nach einem Mass für Komplexität erweist sich in der Tat als bedeutender Aspekt der Komplexitätsforschung. Sie ist demnach wichtig genug, um möglichst umfassend dargestellt zu werden.

Diese Fragen werden mit einer kritischen Grundhaltung gestellt. In diesem Sinn erklärt sich auch der Titel der vorliegenden Arbeit, der auf „wissenschaftstheoretische Probleme“ der Komplexitätsforschung hinweist. Wissenschaftstheorie bedeutet in unserem Verständnis allgemein die Untersuchung wissenschaftlicher Methoden und Ziele, die Analyse von Struktur und Voraussetzung einer Wissenschaft sowie deren Gegenstandsbereich. „Wissenschaftstheoretische Probleme“ sind demnach solche, die obige Aspekte betreffen. Damit wird auch klar, dass das Aufzeigen von Problemen der Komplexitätsforschung erst dann geschehen kann, wenn diese hinreichend charakterisiert ist. Die im Vergleich zu vorher leicht umformulierte Grundfrage lautet nun: Mit welchen wissenschaftstheoretischen Problemen ist die Komplexitätsforschung konfrontiert? Ausgehend von dieser und unter Berücksichtigung der oben vorgestellten Teilfragen können wir nun die Zielsetzung dieser Arbeit formulieren.

³ Exemplarisch für eine kritische Haltung gegenüber der Komplexitätsforschung ist der Beitrag von John Horgan (1995) „From Complexity to Perplexity“. Gesamthaft gesehen ist seine Argumentation sicher überzeichnet, sie macht aber eine Reihe grundlegender Probleme des Projektes Komplexitätsforschung deutlich, wie wir sehen werden.

3. Zielsetzung und Methode

Das Hauptziel lässt sich wie folgt formulieren: Es soll begründet werden, dass es ernstzunehmende wissenschaftstheoretische Probleme für die Komplexitätsforschung gibt. Es geht also um die Darlegung der Struktur dieser Problematik. Bildlich gesprochen soll das Feld, auf welchem sich die Komplexitätsforschung bewegt, abgesteckt und auf versteckte Fallgruben hingewiesen werden.

Schon hier muss aber gesagt werden, was nicht erreicht werden kann: Wir können die Virulenz der offengelegten Probleme nicht untersuchen. Dies bedeutet, dass wir nicht darauf eingehen, ob die dargestellten Probleme das Erreichen der Zielsetzung der Komplexitätsforschung verunmöglichen. Ein solches Unterfangen wäre auch unfair gegenüber einer Wissenschaft, die sich selbst als „entstehend“ bezeichnet. Die vorliegende Arbeit soll als Beitrag zur Diskussion über die Komplexitätsforschung in dem Sinn gelten, dass sie vielleicht auch den Forschenden selbst zur Klarheit über die künftige Weiterentwicklung dieses Gebietes verhilft.

Unter Berücksichtigung des vorhergehenden Abschnitts können fünf Teilziele formuliert werden:

- ❶ **Begriffe klären:** Es soll dargelegt werden, was gemeint ist, wenn von „Komplexität“ und anderen Begriffen in diesem Umfeld die Rede ist.
- ❷ **Wurzeln offenlegen:** Es soll dargestellt werden, woher die Komplexitätsforschung stammt und mit welchen Disziplinen Überschneidungen bestehen.
- ❸ **Komplexität konkretisieren:** Es soll eine Übersicht über vorhandene Konzepte von Komplexität in den Wissenschaften gegeben werden.
- ❹ **Forschungsprogramm rekonstruieren:** Ziele, Methoden und das Umfeld der Komplexitätsforschung sollen offengelegt werden.
- ❺ **Zweifel darlegen:** Die ermittelten Probleme sollen zusammengefasst werden, und es soll erläutert werden, warum diese bedeutsam sind.

Diese Teilziele definieren zugleich die Struktur der Arbeit. Die Probleme, die in Zielsetzung fünf zusammengestellt werden, tauchen vor allem bei der Bearbeitung von Zielsetzung drei und vier auf. Sie lassen sich – um dies schon vorwegzunehmen – in drei Zweifeln zusammenfassen:

- ➔ **Heterogenität:** diese betrifft das Bezugsfeld der Komplexitätsforschung
- ➔ **Relativität:** diese betrifft den Begriff „Komplexität“
- ➔ **Emergenz:** diese betrifft das Ziel der Komplexitätsforschung.

Grundlage der Arbeit ist ein umfassendes Literaturstudium, wobei insbesondere die Publikationen der im Bereich Komplexitätswissenschaft (und in Vorläuferdisziplinen) Forschenden berücksichtigt werden. Hier stellt sich natürlich sofort die Frage, ob die notwendige Umfassendheit erfüllt wurde. Abschliessend lässt sich diese von meinem Standpunkt aus nicht beantworten. Aufgrund der Literaturangaben, die sich jeweils bei den verschiedenen Autoren finden, lässt sich aber schliessen, dass ein offenbar grosser Teil der relevanten Literatur erfasst wurde.

Die gelesene Literatur dient als Datenmaterial, auf das in erster Linie zurückgegriffen wird, um die Komplexitätsforschung zu charakterisieren. Vor allem im historischen Teil liesse sich zu den einzelnen vorgestellten Gebieten jeweils viel mehr sagen. Diesbezüglich wird aber auf die Originalliteratur verwiesen. Zu den Problemen der Komplexitätsforschung finden sich in der Literatur meist nur allgemeine Überlegungen. Eine systematische Darstellung in der Art und Weise, wie sie diese Arbeit bietet, ist meines Wissens noch nicht vorgenommen worden.

Schliesslich soll noch auf drei Einschränkungen hingewiesen werden, welche diese Arbeit betreffen. Die erste betrifft die wissenschaftlichen Disziplinen, aus welchen die untersuchten Publikationen stammen. Obwohl die Komplexitätsforschung Ansprüche formuliert, die weit über die Naturwissenschaften hinausgehen, liegen ihre Wurzeln – wie sich zeigen wird – eindeutig im naturwissenschaftlichen, mathematischen (inklusive Informatik) und systemtheoretischen Bereich.⁴ Aus diesem Grund wurden überwiegend Arbeiten aus diesen Disziplinen untersucht. Diese Einschränkung erscheint demnach gerechtfertigt.

Zweitens gibt es eine Reihe weiterer Aspekte im Zusammenhang mit Komplexität, die nur angesprochen werden, namentlich erwähnt sei die Frage des Managements komplexer Systeme. Diese werden am Rand der Erfüllung von Zielsetzung eins kurz vorgestellt.

Die dritte Schranke betrifft schliesslich meine persönlichen Kenntnisse. Es wäre schlicht vermessen zu behaupten, dass ich in der Vielfalt der untersuchten Disziplinen gleichermassen Bescheid wüsste. Dies ist meines Erachtens kein grundsätzliches Hindernis für das Erreichen der definierten Zielsetzung. Hingegen sind manche Detailspekte nicht so klar erläutert, wie ich es gewünscht hätte. Bei diesen bin ich gezwungen, auf die Originalliteratur zu verweisen, ohne dass damit gleichzeitig gesagt ist, dass ich diese vollständig verstanden habe.

4. Zum Aufbau der Arbeit

Entsprechend der fünf formulierten Zielsetzungen gestaltet sich der Aufbau der Untersuchung, der hier kurz vorgestellt werden soll:

- ❶ **Teil I** beinhaltet Begriffspräzisierungen. Insbesondere werden vier Verwendungsweisen von „Komplexität“ vorgestellt. Diese Unterscheidung wird künftig verwendet werden, um die Klarheit der Analyse zu gewährleisten. Auch soll in einer ersten Annäherung die Frage beantwortet werden, was überhaupt als „komplex“ bezeichnet werden soll. Überdies wird ein Blick auf das Begriffsumfeld von „Komplexität“ geworfen. Wissenschaftstheoretische Grundbegriffe, die in der weiteren Arbeit Verwendung finden, werden ebenfalls eingeführt. Schliesslich sollen die angesprochenen Seitenaspekte vorgestellt werden, dies aber ohne Anspruch auf Umfassendheit.
- ❷ **Teil II** dokumentiert die historischen Wurzeln der Komplexitätswissenschaft, wobei vor allem das 20. Jahrhundert untersucht wurde. Daraus ergibt sich eine erste inhaltliche Charakterisierung dieser Wissenschaft. Anhand eines exemplarischen Papers von Warren Weaver werden die frühen Vorstellungen über die Ziele der Komplexitätsforschung vorgestellt.
- ❸ **Teil III** stellt möglichst umfassend die verschiedenen Ansätze für die Bestimmung eines Komplexitätsmasses in Mathematik/Informatik, Naturwissenschaft und Systemtheorie dar. Auch erkenntnistheoretische Aspekte werden berücksichtigt. Zwei der drei angesprochenen Zweifel – Heterogenität und Relativität – finden ihren Ursprung in diesem Teil. Wir versuchen schliesslich auch, zu einer eigenen Charakterisierung von Komplexität zu gelangen.
- ❹ **Teil IV** befasst sich mit der Komplexitätsforschung selbst. Dabei sollen das Forschungsprogramm, die Mittel und die konkreten Forschungsgebiete vorgestellt werden. Die zentrale Bedeutung des Computers wird eingehend untersucht. Weiter wird auch das Problem der Emergenz beleuchtet, das sich im Zusammenhang mit dem Forschungsprogramm stellt. Schliesslich wird auch der „propagandistische“ Aspekt vorgestellt.

⁴ Dies zeigt auch die Bibliographie auf, die Cornacchio (1977b) angibt.

- ⑤ **Teil V** schliesslich stellt die drei Zweifel zusammen und geht auf die Frage ein, warum diese ein Problem für die Komplexitätsforschung sind.

Um die Arbeit übersichtlich zu machen, werden drei Gestaltungselemente eingesetzt: Der *Lauftext* beinhaltet den Hauptstrang der Argumentation.⁵

Einschübe: Diese erläutern und präzisieren bestimmte Aspekte im Zusammenhang mit dem Besprochenen. Sie enthalten auch formale Definitionen, die für das Verständnis der Arbeit nicht von primärer Bedeutung sind.

⁵ Fussnoten dienen primär für den Verweis auf verwendete Literatur und enthalten auch die meisten Zitate. Zuweilen enthalten sie auch weiterführende Gedanken, ohne diese umfassend zu explizieren.

Teil I

Einführung

Schon ein oberflächlicher Blick auf die Literatur macht deutlich, dass sehr oft unklar ist, was mit dem Begriff „Komplexität“ gemeint ist. Verschiedene Verwendungsweisen fließen ineinander über und tragen zur Konfusion bei. Selbst Paper, die explizit eine Präzisierung des Komplexitätsbegriffs zum Ziel haben, sind vor solchen Verwirrungen nicht gefeit. Um dieser Gefahr schon zu Beginn weg auszuweichen, sollen in der Einführung die verschiedenen Weisen des Gebrauchs dieses wichtigen Begriffs offengelegt werden. Dabei werden wir auch das begriffliche Umfeld ausleuchten und wissenschaftstheoretische Grundbegriffe einführen, die in der nachfolgenden Analyse Verwendung finden. Schliesslich werden Seitenaspekte vorgestellt, die im Zusammenhang mit Komplexität diskutiert werden, aber nicht Thema der vorliegenden Arbeit sind. Auf deren ausführliche Behandlung wird verzichtet.

1. Komplexität – eine Vorbemerkung zum Gebrauch dieses Begriffs

Der Begriff „Komplexität“ kann auf vier verschiedene Arten verwendet werden. Diese Schlussfolgerung lässt sich aufgrund unseres Literaturstudiums ziehen, es handelt sich also um eine deskriptiv begründete Unterscheidung. Wir nennen diese vier Arten triviale, intuitive, quantitative und Emergenzkomplexität.⁶ Die ersten zwei werden in Teil I abschliessend behandelt. Die quantitative und die Emergenzkomplexität hingegen haben ihren festen Platz im Vokabular der Komplexitätsforschung. Die Ausgestaltung der exakten Verwendungsweise beider Begriffe – beispielsweise die Präsentation möglicher Komplexitätsmasse – ist Thema von Teil III und IV der Arbeit. Dass die vorliegende Unterscheidung getroffen werden kann, ist stark mit dem Aufkommen der Komplexitätsforschung verbunden. *Henri Atlan* spricht dazu von einem bemerkenswerten „changement de status“ des Begriffs Komplexität. Zuerst gedacht, um einen Mangel an Theorie zu kennzeichnen, ist das Komplexum zum Forschungsgegenstand geworden.⁷

Es muss aber erwähnt werden, dass es zuweilen zu Überschneidungen zwischen den vier Komplexitätsbegriffen kommen kann. Beispielsweise kann man schon aufgrund der intuitiven Komplexität ein (einfaches) Mass definieren. Künftig soll aber angegeben werden, mit welchem Komplexitätsbegriff operiert wird. Sollte es zu Überlappungen kommen, werden wir dies markieren.

1.1. Triviale Komplexität

Bezeichnen wir im Alltag bestimmte Probleme als komplex, so bringen wir damit oft unsere Ratlosigkeit zum Ausdruck. Diese Verwendungsweise des Komplexitätsbegriffs entspricht zwar zu einem grossen Teil dem alltäglichen Sprachgebrauch, eine so verstandene Komplexität ist aber für das wissenschaftliche Vokabular der Komplexitätsforschung sicher unbrauchbar.

Diese Feststellung führt zu unserem ersten Komplexitätsbegriff – der trivialen Komplexität. Ist also ein Problem im trivialen Sinn komplex, so ist dieser nicht verstanden, und es ist zudem zu erwarten, dass das Erreichen von Verständnis mit beträchtlichen Problemen verbunden ist. Warum ein solcher Aufwand zu leisten ist, bleibt aber unklar. Diese Einschränkung führen wir deshalb ein, weil schon durch das Auf-

⁶ Es lässt sich übrigens auch ein weiterer Gebrauch des Wortes Komplexität nachweisen, den man den „esoterischen“ nennen könnte. Damit ist gemeint, dass dem Wort ein Anstrich des Positiven oder Wünschenswerten gegeben wird. Das Komplexum ist also gleichsam das Schöne oder das Gute. Dazu nur ein exemplarischer Satz von Jantsch (1979): „Die Wechselwirkung von Ethik und Moral ergibt damit einen weiteren epigenealogischen Prozess, in welchem Komplexität dem Leben verfügbar wird und damit neue Komplexität entstehen lässt.“, S. 358. Verstehe dieser Satz, wer will!

⁷ Atlan (1991), S. 9.

finden von Gründen für die Schwierigkeit von Problemen einiges für deren Verständnis gewonnen wird. Die Rede von trivialer Komplexität macht dann keinen Sinn mehr, weil das betreffende Problem dann nicht mehr völlig unverständlich ist.

Dazu ein Beispiel: Haben wir in den letzten Tagen typisches Aprilwetter erlebt und bezeichnen deshalb im Alltag die Frage, welches Wetter morgen herrschen wird, im trivialen Sinn als „komplex“, so bringen wir damit lediglich zum Ausdruck, dass wir eben nicht wissen, ob es morgen regnet oder schneit. Im Kontext der Meteorologie ist die Komplexität dieser Frage eine andere. Wir haben theoretische Modelle, die uns sagen, *warum* es komplex (und ab bestimmten Prognosezeiten auch unmöglich) ist, eine zuverlässige Wetterprognose anzugeben. Das Verständnis des Problems ist also viel exakter bestimmt. Natürlich verwendet man aber auch im wissenschaftlichen Alltag den trivialen Komplexitätsbegriff.

Halten wir fest: Verwenden wir den trivialen Komplexitätsbegriff, so bringt der Satz „Dieses Problem ist komplex“ zum Ausdruck, dass das betreffende Problem kaum verständlich ist. Ein solcher Sprachgebrauch lässt sich im Alltag sicherlich nachweisen, so dass die Einführung der trivialen Komplexität gerechtfertigt ist. Natürlich ist damit nicht gesagt, dass man Unkenntnis nicht auch anders zum Ausdruck bringen kann. Etwa, indem man Probleme als „kompliziert“ bezeichnet. Unseres Erachtens scheint letzterer Ausdruck im hier besprochenen Kontext aber mehr und mehr durch „komplex“ ersetzt zu werden. Vielleicht ist dies eine Nebenfolge der Popularisierung der Komplexitätsforschung, indem der Begriff „Komplexität“ vermehrt Eingang in die Alltagssprache findet. Dies ist aber nur Spekulation.

1.2. Intuitive Komplexität

Mit der trivialen Komplexität haben wir aber nicht das gesamte Spektrum des alltäglichen Gebrauchs des Komplexitätsbegriffs abgedeckt. Um Klarheit darüber zu erlangen, worin sich eine Sprachgemeinschaft diesbezüglich einig ist, bietet sich der Griff zum Lexikon an: Das Fremdwörterbuch des *Duden*⁸ sieht neben spezifisch mathematischen Aspekten (komplexe Zahl bzw. Funktion) drei Arten der Erläuterung von „komplex“: a) Vielschichtigkeit, d.h. viele, sehr verschiedene Dinge umfassend; b) zusammenhängend; c) allseitig, alles umfassend.

Für den englischen *The Random House Dictionary*⁹ ist etwas komplex (complex), das a) aus miteinander verbundenen Teilen besteht; b) durch eine komplizierte Anordnung der Teile charakterisiert ist; c) aus diesem Grund schwierig zu verstehen ist.

*Webster's Third International Dictionary*¹⁰ gibt unter dem Stichwort „Komplexität“ („complexity“) an, dass dieses die Qualität oder den Zustand, komplex zu sein, beinhaltet. Dies bedeutet, dass a) viele verschiedene miteinander verbundene Teile vorhanden sind, welche das Verständnis des Ganzen erschweren; b) die grosse Anzahl der verschiedenen Detailaspekte schwierige Analysen zum Verständnis des Ganzen erfordert.

Der Griff nach dem Lexikon macht also einen weiteren, rudimentär quantitativen Aspekt deutlich: Die Anzahl der Teile eines Ganzen und der Relationen zwischen diesen taucht als Charakteristikum für Komplexität auf. Diese Verwendungsweise bedarf der Begriffe „Ganzheit“ und „Teile“ – oder moderner gesprochen „System“. Der Systembegriff hat hingegen seine Tücken, wie noch deutlich werden wird (siehe dazu Teil II, Fussnote 125). Im Folgenden verwenden wir diesen in seiner allgemeinsten Form. Ein System ist demnach ein von einer Umwelt abgrenzbares Gebilde von Elementen und Wechselwirkungen zwischen diesen. Dabei bleibt offen, ob es sich nun um ein physikalisches oder ein semiotisches System handelt.

Problembeladen ist aber auch der Ausdruck „Teil“. Betrachten wir beispielsweise einen Organismus, ist auf den ersten Blick überhaupt nicht klar, was dessen Teile sind. Deren Spezifikation ist abhängig von der Fragestellung und auch von der Theorie, in deren Rahmen wir den Organismus untersuchen. Die

⁸ Duden, „Fremdwörterbuch“, Stichwort „komplex“.

⁹ Zitiert nach Peliti et al. (1988), S. III.

¹⁰ Zitiert nach Klir (1985), S. 131.

Teile eines Schweines sind für den Metzger etwas anderes als für den auf Schweine spezialisierten Molekularbiologen (falls ein solcher existiert). Dieses Problem wird spätestens bei der Bestimmung einer quantitativen Komplexität akut.

Auch die Etymologie des Begriffs „komplex“ macht den Systemaspekt deutlich. Das Wort stammt vom lateinischen „complexus“, gleichbedeutend mit „umgarnt“ oder „zusammengefasst“. In fachspezifischeren Lexika finden sich weitere Präzisierungen:

Das *Philosophische Wörterbuch*¹¹ sowie das *Wörterbuch der Kybernetik*¹² sehen im Begriff „Komplexität“ eine Eigenschaft von Systemen ausgedrückt, die durch die Anzahl der Elemente und der zwischen ihnen bestehenden Relationen bestimmt wird. Je grösser diese Zahl, desto komplexer das System. Von der Komplexität unterschieden wird die *Kompliziertheit* eines Systems, welche qualitative Unterschiede zwischen den Elementen bzw. deren Relationen erfasst. Ein kompliziertes System enthält demzufolge viele verschiedene Element- bzw. Relationstypen und ist immer auch komplex. Hingegen gibt es auch komplexe Systeme, die nicht kompliziert sind. Es wird aber darauf hingewiesen, dass diese Verwendungsweise nicht einheitlich ist und einige Autoren die Begriffe gerade umgekehrt verwenden.

In der *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*¹³ ist der Begriff differenzierter aufgeschlüsselt. So sind unter dem Stichwort „komplex“ fünf verschiedene Anwendungsbereiche aufgeführt. Gesprochen wird von der (1) Komplexität von Sachverhalten, von (2) Urteilen, von (3) Wahrnehmungen, von (4) Ideen im Sinne John Lockes und David Humes und von (5) komplexen Zahlen. Hier wird deutlich, dass eine Spezifikation des Anwendungsbereiches für eine weitergehende Begriffsbestimmung von „Komplexität“ notwendig ist, was auch nicht anders zu erwarten war. Die Unterscheidung Komplexität-Kompliziertheit wird wie oben besprochen eingeführt.

Das *Historische Wörterbuch der Philosophie*¹⁴ geht genauer auf die Verwendungsweise in den verschiedenen Wissenschaften ein und weist diesbezüglich auf einen sehr unterschiedlichen Gebrauch des Terminus Komplexität hin. Vorgestellt werden die Bereiche Psychologie, Organisationstheorie, die Theorie der soziokulturellen Evolution und die Formalwissenschaften. Bezüglich der letzteren entspricht der Gebrauch in etwa dem bisher vorgestellten.

Dieser kurze Überblick macht deutlich, dass jeder Versuch einer grösseren Präzisierung des Komplexitätsbegriffs in Einzelwissenschaften mit dem Verlust an allgemeiner Anerkennung verbunden ist. Dies wird im folgenden Abschnitt und vor allem in Teil III sehr deutlich werden.

Unabhängig davon lässt sich aber feststellen, dass bezüglich eines einfachen quantitativen Aspektes Einigkeit herrscht. Entsprechend lässt sich eine neue Art der Verwendungsweise charakterisieren, die wir intuitive Komplexität nennen. Kurz gesagt ist etwas intuitiv komplex, das a) aus vielen Teilen/Elementen/Aspekten und vielen Relationen zwischen diesen besteht; b) aus *diesem* Grund schwierig zu untersuchen/charakterisieren/handzuhaben ist. „Intuitiv“ ist dieser Begriff deshalb, weil viele Autoren, die nach einem exakten Mass für Komplexität suchen, genau diese oben angesprochene Intuition bemühen, von der man sich bei der Bestimmung des Masses nicht allzuweit entfernen dürfe.¹⁵

Klar ist, dass man schon aufgrund des intuitiven Komplexitätsbegriffs ein quantitatives Mass definieren kann. *Nicholas Pippenger* etwa möchte Komplexität lediglich als die Anzahl gleicher Teile und die Anzahl Verknüpfungen verstanden sehen.¹⁶ Die meisten Versuche zur Quantifizierung des Begriffs gehen aber darüber hinaus.

¹¹ Klaus et. al. (1975).

¹² Klaus (1967)

¹³ Mittelstrass (1984).

¹⁴ Ritter et al. (div. Jahrgänge)

¹⁵ Als Beispiele dienen etwa: Bennett (1990), S. 138; Grassberger (1986), S. 909; Huberman (1989), S. 130; Lloyd et al. (1988), S.186-189.

¹⁶ Pippenger (1978).

1.3. Quantitative Komplexität

Sobald Komplexität Gegenstand einer naturwissenschaftlichen Betrachtungsweise wird, reichen triviale und intuitive Komplexität nicht mehr aus. *Peter Grassberger* macht dies deutlich: „Confronted with situations that intuitively are judged as „complex“, one of the first reactions should be to quantify this judgement by defining an observable [unsere Hervorhebung].“¹⁷ Der wissenschaftliche Umgang mit Komplexität braucht also eine messbare, eine quantitative Komplexität, bzw. ein Komplexitätsmass. Oder wie *Luca Peliti* schreibt: „If complexity could be consistently measured, its place among physical concepts could hardly be disputed.“¹⁸

Die Suche nach einem solchen Mass ist sicher ein legitimes Unternehmen. Es gibt in der Geschichte der Naturwissenschaften genügend ähnliche Beispiele von unscharf verwendeten Begriffen, die erst im Laufe der Zeit eine klare Bedeutung erlangten. So ist etwa der Wärmebegriff zu nennen. Erste Versuche zu dessen Quantifizierung liefen über die Wärmestoff-Theorie von Lavoisier gegen Ende des 18. Jahrhunderts. Ein vollständiges Verständnis in unserem Sinn wurde hingegen erst mehr als hundert Jahre später mit Boltzmann erreicht.¹⁹ Warum sollte dies mit der Komplexität nicht anders sein?²⁰

In der Tat wurden viele Versuche unternommen, ein solches Komplexitätsmass zu erreichen. Teil III wird darauf sehr ausführlich eingehen. Tatsache bleibt aber, dass es sehr schwierig sein wird, ein universales quantitatives Mass zu finden.²¹ Ein solches Unterfangen ist bisher gescheitert, wie deutlich gemacht wird. Dies ist für die Komplexitätsforschung nicht unwesentlich. Mit einem möglichst universalem Mass könnte sie eine einheitliche Charakterisierung für eine grosse Klasse komplexer Systeme angeben. Dies wiederum ist nötig für das Auffinden „neuer Prinzipien“ von komplexen Systeme, die breite Anwendung finden sollten. Die Suche nach solchen Prinzipien ist ein wichtiges Element des Forschungsprogramms der Komplexitätswissenschaft, wie noch deutlich werden wird. Es ist aber nicht gesagt, dass das Auffinden eines universalen Komplexitätsmasses für die Ziele der Komplexitätsforschung unbedingt notwendig ist. Zumindest verlangen aber eine Reihe konkreter Fragestellungen ein Mass, das für den jeweiligen Kontext Anwendung finden kann. So ist etwa die Problemstellung, ob und warum Komplexität in der Evolution zunimmt, gar nicht verständlich, gäbe es kein Mass für Komplexität.

Schon an dieser Stelle sei schliesslich erwähnt, dass manche Autoren bestreiten, Komplexität liesse sich rein quantitativ erfassen. *Hans W. Gottinger* sieht qualitative Aspekte, die durch ein solches Mass übersehen werden.²² Auch *Bernardo A. Huberman* schlägt vor, dass ein Komplexitätsmass sowohl qualitativ wie quantitativ genügen müsse.²³ Hier verbergen sich ebenfalls ernstzunehmende Probleme, denn es besteht keine Einigkeit darüber, was diese qualitativen Eigenschaften sind.

1.4. Emergenzkomplexität

Bemühungen, ein Mass für Komplexität zu etablieren, finden sich in verschiedenen (natur)wissenschaftlichen Bereichen. Hingegen spielt ein Aspekt von Komplexität vor allem in der Diskussion innerhalb der Komplexitätsforschung eine zentrale Rolle: der emergente Charakter von Komplexität. Damit einher gehen zwei Arten von Behauptungen: Erstens wird gesagt, komplexe Systeme seien in einem bestimmten

¹⁷ Grassberger (1986), S. 908.

¹⁸ Peliti et al. (1988), S. III

¹⁹ Vergleiche dazu Gorgé (1995), Abschnitt 10.3.

²⁰ Huberman (1989) sagt dazu: „I look forward to the time when concepts such as complexity and adaption will be as clear and informative as those of temperature and entropy“, S. 132.

²¹ Nur nebenbei bemerkt stellt sich dabei auch die Frage nach der Einheit eines solchen Masses. Meistens wird quantitative Komplexität mittels fundamentalere Observablen definiert. Entsprechend ergibt sich dann auch die Einheit.

²² Gottinger (1983): Of course, it would not be at all satisfactory to replace „complexity“ by some other more restrictive notions such as largeness, size, multidimensionality. Part of the problem is that complexity is not merely a quantitative property but foremost a qualitative one.“ S. 11.

²³ Huberman et al. (1986): (...) one desires a complexity measure which, besides being quantifiable, encodes the relevant properties of the system.“, S. 376.

Sinn irreduzibel, wobei diese Irreduzibilität meist nicht weiter expliziert wird. Der Begriff taucht im Zusammenhang mit der Reduktionismus-Emergenz-Debatte auf, und wir werden im Abschnitt 3.3 in diesem Teil auf Irreduzibilität eingehen. Zweitens wird behauptet, das Verhalten komplexer Systeme sei schlecht (oder überhaupt nicht) prognostizierbar. Auch in dieser Behauptung verstecken sich eine Reihe von Problemen. So muss man den Fall, dass man den Grund für diese schlechte Prognostizierbarkeit kennt, von jenem unterscheiden, dass man diesen nicht weiss. Weiter stellt sich die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Prognose und Erklärung. Inwieweit lässt sich das Verhalten komplexer Systeme erklären, wenn man dieses nicht prognostizieren kann. Auf diesen Problemkreis werden wir in Abschnitt 3.1 in diesem Teil eingehen.

Generell muss gesagt sein, dass mit dem Emergenzbegriff eine Reihe sehr schwieriger Probleme verbunden sind, wie wir noch deutlich machen werden. Dies hat einen grossen Einfluss auf die Möglichkeit einer sinnvollen Verwendung des Begriffs „Emergenzkomplexität“. Wir stellen hier aber lediglich fest, dass sich ein Sprachgebrauch von „Komplexität“ im Sinn von Emergenzkomplexität ausmachen lässt. Auf die Probleme mit diesem Begriff werden wir noch ausführlich eingehen.

1.5. Zur Extension des Prädikates „komplex“

Eine Begriffsbestimmung von Komplexität muss sich auch der Frage nach dem Bezugfeld stellen. Oder anders gefragt: *Was ist komplex?* Generell ist „komplex“ ein einstelliges Prädikat mit einem sehr weitgefassten Gegenstandsbereich: Sowohl physikalische Strukturen als etwa auch Theorien oder Propositionen werden als komplex bezeichnet. *Mario Bunge* etablierte diesbezüglich die Unterscheidung zwischen ontologischer und semiotischer Komplexität. Wir führen diese in Abschnitt 1 in Teil III aus. Die Frage nach der Extension dieses Prädikats wird vor allem dann bedeutsam, wenn ein Komplexitätsmass gesucht wird. Bis jetzt sind solche jeweils nur für einen bestimmten Rahmen vorgeschlagen worden. Entsprechend definiert die Theorie, in welcher das Komplexitätsmass eingebettet ist, das Bezugfeld. Wird etwa ein solches aus der Informatik benutzt, ist die Menge aller Algorithmen relevant. Der Anwendungsbereich ergibt sich also aus dem konkreten Einzelfall.

Auf eine wichtige Unterscheidung soll aber schon hier aufmerksam gemacht werden. Man spricht einerseits von *komplexen Strukturen*, andererseits von einer *komplexen Dynamik*. Wenn es um die Suche nach einem Komplexitätsmass geht, steht die Struktur meist im Vordergrund. Schwieriger ist die Situation aber bei einer komplexen Dynamik. Diese wird meist mit Prognoseschwierigkeiten für das Verhalten eines Systems in Verbindung gebracht. Im Fall von chaotisch-dynamischen Systemen spricht man gerne von einer „komplexen Dynamik“, meint aber eine chaotische Dynamik.²⁴ Wir halten diesen Sprachgebrauch für unglücklich. Die Dynamik ist eben chaotisch! Chaos und Komplexität sollten auseinandergehalten werden, was beispielsweise auch *Eubank et al.* klarstellen.²⁵

Wird von komplexem Verhalten in einem umfassenderen Sinn gesprochen – beispielsweise wenn man das Verhalten einer Tierpopulation als komplex bezeichnet –, ist eine Spezifikation mit Schwierigkeiten verbunden. Komplexes Verhalten könnte man in diesem Fall mit einer grossen Anzahl Freiheitsgrade des Systems in Verbindung bringen, um zu einer quantitativen Komplexität zu gelangen. Die Charakterisierung dieser Freiheitsgrade ist dann wiederum vom Einzelfall abhängig.

²⁴ Etwa in Livi et al. (1987), Einführung.

²⁵ Eubank et al. (1990) setzen die Komplexität eines dynamischen Systems mit der Anzahl unabhängiger Freiheitsgrade in Verbindung; S. 77.

2. Das begriffliche Umfeld

2.1. Kompliziertheit

Im Gegensatz zum Begriff „Komplexität“ findet sich bei der Kompliziertheit kein irgendwie geartetes Forschungsprogramm, man spricht insbesondere nicht von einem Mass für Kompliziertheit. „Kompliziert“ wird im Sinn von „schwierig“, „verwickelt“ oder auch „umständlich“ verwendet, ein Sprachgebrauch ähnlich wie bei unserer trivialen Komplexität.

Im Fall der intuitiven Komplexität taucht der Begriff in den Lexika ebenfalls auf. Er beschreibt dort den Sachverhalt, dass die Komponenten von bzw. die Relationen innerhalb von Systemen sehr verschieden sein können. Inwiefern man von Verschiedenheit sprechen kann, ist dabei eine offene Frage. Wir können annehmen, dass die Art der Verschiedenheit vom jeweiligen theoretischen Kontext abhängt, unter welchem man das System betrachtet. Dazu ein Beispiel: Eine militärstrategische Betrachtung eines Truppenteils braucht auf individuelle Unterschiede der Soldaten keine Rücksicht zu nehmen, was im Fall der Truppenpsychiatrie nicht zutrifft.

Emergenzbehauptungen finden sich übrigens im Zusammenhang mit Kompliziertheit ebenfalls nicht. Innerhalb der Komplexitätsforschung scheint man im Gegenteil den Begriff „kompliziert“ eher für Systeme zu verwenden, die *keine* emergenten Eigenschaften haben (vgl. Teil IV, Fussnote 386).

Henri Atlan schliesslich verwendet den Terminus „kompliziert“ für Artefakte, „komplex“ hingegen für natürliche Systeme, insbesondere Organismen (vgl. den Einschub „Henri Atlan und die Bedeutung der Komplexität“, Teil III, Abschnitt 2.4).

Wir schlagen vor, dem Begriff „kompliziert“ lediglich eine Funktion in der Alltagssprache (und nicht innerhalb einer wissenschaftlichen Theorie) zuzuschreiben. Kompliziertheit wird dabei vor allem ähnlich wie triviale Komplexität verwendet.

2.2. Einfachheit

„Einfachheit“ ist in mehrfacher Hinsicht ein zentraler Begriff in Philosophie und Wissenschaften. Untersuchen wir dazu zuerst einmal das Verhältnis von „einfach“ zu „zusammengesetzt“. Dieses kann in einem *relativen* wie in einem *absoluten* Sinn gesehen werden. Betrachtet man ein zusammengesetztes System und dessen Teile, ist man geneigt, letztere als „einfacher“ zu bezeichnen. Das relativierende Element ist dabei die Spezifikation der Teile (vgl. Abschnitt 1.2 in diesem Teil). Auch müssen System wie Teile in demselben Theorierahmen betrachtet werden. Von der Sichtweise eines Morphologen aus sind die Organe eines Wirbeltiers einfacher als der Gesamtorganismus. Betrachtet man danach aber *nur* die Organe unter dem Blickwinkel der Molekularbiologie, macht die Bezeichnung „einfacher“ für die Organe (im Vergleich zum Gesamtorganismus) keinen Sinn mehr.

Die Verwendung von „einfach“ in einem absoluten Sinn geht davon aus, dass es einfachste Teile gibt, aus denen die Naturdinge zusammengesetzt sind. Als Beispiel können wir die Atomlehre Demokrits nennen. Heutzutage besteht hingegen keine Klarheit darüber, welche physikalischen Entitäten als „einfachste Teile“ gelten sollen. Die Suche nach den fundamentalsten Bausteinen ist jedenfalls noch im Gang.

Zur Extension des Prädikates „einfach“ lassen sich dieselben Bemerkungen machen wie zum Prädikat „komplex“. Diese Feststellung und eine Untersuchung des Sprachgebrauchs legt uns nahe, „Einfachheit“ und „Komplexität“ als *Gegenbegriffe* zu verwenden. Wir werden dies im Folgenden so handhaben, müssen aber hinzufügen, dass die Probleme des Begriffs „Komplexität“ natürlich auch auf die „Einfachheit“ abfärben.

Wir schliessen diesen Abschnitt mit einer Bemerkung zum „Prinzip der Einfachheit“. Es handelt sich hier um ein methodologisches Prinzip, das vorschreibt, von mehreren konkurrierenden Theorien zur Deutung einer Klasse von Phänomenen die einfachere zu bevorzugen. Davon zu unterscheiden ist die in der abendländischen Geistesgeschichte immer wieder aufgetretene Auffassung, dass die Natur selbst

einfach ist bzw. die Naturgesetze eine einfache Form haben sollen. Als heuristisches Prinzip mag diese Vorstellung nützlich sein (so ist beispielsweise von Kepler überliefert, er habe seine Gesetze der Planetenbewegung nicht zuletzt deshalb gefunden, weil er an eine einfache Lösung glaubte), ontologisch gesehen ist sie jedoch fragwürdig. Auf diesen Problemkreis kommen wir in Abschnitt 1 von Teil III noch kurz zu sprechen.

2.3. Chaos

Wenn von Komplexität die Rede ist, ist das Chaos meist nicht weit. Wir wollen diese Aussage nicht buchstäblich verstehen, sondern auf eine Verwandtschaft zwischen den beiden Begriffen hinweisen, die sich in mehrfacher Hinsicht zeigt. Zuerst soll aber der Begriff „Chaos“ selbst expliziert werden. Dessen Wurzel liegt im Griechischen und bedeutet soviel wie klaffende Leere. Gegenbegriff ist „Kosmos“, was sinngemäss mit „Ordnung“ übersetzt wird. Im Alltag bezeichnet „Chaos“ meist einen Zustand der totalen Unordnung. Man kann diesen Sprachgebrauch auch in die Wissenschaften übertragen, indem etwa ein Mass für Ordnung auch als Mass für Unordnung bzw. Chaos gebraucht wird, d.h. Ordnung und Chaos als gegensätzliches Begriffspaar verwendet werden.

Im Zusammenhang mit Komplexität taucht der Begriff aber meist im Kontext der Chaostheorie bzw. des deterministischen Chaos auf. Der Begriff „Chaos“ dient dabei der Bezeichnung eines bestimmten dynamischen Verhaltens. Die Chaostheorie ist ein Teilgebiet der Theorie dynamischer Systeme. Im Folgenden bieten wir einen kurzen Abriss dieser Disziplin:

Deterministisches Chaos:²⁶ (Vgl. auch der Einschub „Dynamisches System“, Teil II, Abschnitt 1.2) Ausgangspunkt der Chaostheorie sind Differentialgleichungen bzw. Differentialgleichungssysteme. Deterministisches Chaos bezeichnet ein bestimmtes dynamisches Verhalten der Trajektorien solcher Systeme im Phasenraum. Die chaotische Dynamik hat weder mit äusseren stochastischen Fluktuationen (noise) noch mit einer unendlichen Anzahl von Freiheitsgraden oder mit der quantenmechanischen Unschärfe einen Zusammenhang. Die Quelle der Irregularität des Verhaltens liegt in der *Nichtlinearität* der zugrundeliegenden Differentialgleichung.²⁷ Diese sorgt dafür, dass beliebig nahe Trajektorien sich exponentiell voneinander entfernen. Dieser Effekt wird auch sensitive Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen genannt. Diese lokale Instabilität kann mit einer gebundenen Bewegung koexistieren, d.h. die Trajektorien des Systems füllen nur einen endlichen Teil des Phasenraums aus.

Der Lyapunov-Exponent ist ein Mass für die Sensitivität der Dynamik von den Anfangsbedingungen. Deterministisches Chaos ist per definitionem gegeben durch Anwesenheit eines *positiven Lyapunov-Exponenten*. Eine notwendige Bedingung für deterministisches Chaos bei kontinuierlicher Zeit ist die Anwesenheit von *mindestens drei unabhängigen Variablen*, d.h. die Dimension des Phasenraums muss mindestens drei sein. Im Fall einer diskreten Zeit kann Chaos hingegen schon bei einer Dimension auftreten.

Komplexität hat in zweierlei Hinsicht eine Beziehung zum Chaos. Historisch gesehen hat die Komplexitätsforschung einen wichtigen Teil ihrer Wurzeln in der Chaostheorie. Dieser Aspekt wird auch in der populären Literatur zur Komplexitätswissenschaft immer wieder betont, wie wir noch feststellen werden.

Zweitens versucht man innerhalb der Komplexitätsforschung das Verhältnis zwischen Chaos und Komplexität zu bestimmen. Dieses wird vage mit der Redeweise „Komplexität liegt zwischen Ordnung

²⁶ Die Ausführungen richten sich nach Schuster (1989) und Eubank et al. (1990).

²⁷ Matt Davison hat mich darauf aufmerksam gemacht, dass es nicht eigentlich die Nichtlinearität ist, welche für die Chaotizität einer Bewegung verantwortlich ist. Unter Verwendung von Reihen (und Distributionen, wie die Dirac-Deltafunktion) lassen sich nichtlineare Komponenten von Gleichungen eliminieren. Man bezahlt dabei aber den Preis, dass die Dimension des Phasenraumes unendlich wird, was mathematisch noch schwieriger zu behandeln ist als Nichtlinearität. Nichtlinearität ist gewissermassen das kleinere Übel. Dieser Aspekt lässt sich aber als Hinweis verstehen, dass der Nichtlinearität von Gleichungen eine *viel zu hohe Bedeutung* zugemessen wird! Aus einer genauen Untersuchung dieser Problematik liessen sich demnach sehr interessante Schlussfolgerungen ziehen, vor allem wenn man um die Beliebtheit des Terminus „nichtlinear“ weiss. Dies konnten wir leider nicht leisten.

und Chaos“ bzw. „Komplexität liegt am Rand des Chaos“ umschrieben. Innerhalb dieser Metaphern bewegt man sich im alltagssprachlichen Gebrauch von „Chaos“, indem man „Ordnung“ als Gegenbegriff verwendet.²⁸

Komplexität und Chaostheorie: Eine Reihe von Autoren betrachten die Chaostheorie als fundamental für das Verständnis komplexer Systeme.²⁹ Begründet wird dieser Zusammenhang meist damit, dass Nichtlinearität ein Charakteristikum sowohl für Chaos wie auch für Komplexität sei.³⁰ Mit der Chaostheorie lässt sich (zumindest in ein paar Fällen) ein Aspekt der intuitiven Komplexität klären. So sind die Prognoseschwierigkeiten bei chaotisch-dynamischen Systemen in der sensitiven Abhängigkeit der Dynamik von den Anfangsbedingungen begründet. Mehr als die Erklärung solcher Schwierigkeiten in diesen speziellen Fällen ist aber von der Chaostheorie nicht zu erwarten. Insbesondere für eine Klärung der Emergenzkomplexität vermag die Chaostheorie kaum Beiträge zu leisten.

Der Rand des Chaos: Ein weiterer Punkt betrifft den schon oben angesprochenen „Rand des Chaos“, eine Redeweise, die innerhalb der Komplexitätsforschung aufgetaucht ist.³¹ Wer als Urheber dieser Metapher anzusehen ist, ist nicht klar. *Roger Lewin* nennt sowohl *Stuart A. Kauffman*, *Christopher G. Langton* und *Norman Packard*.³² Letzterer hat zumindest den Ausdruck erstmals in einer Publikation verwendet.³³ Die Metapher ist bei Untersuchungen mit zellulären Automaten geprägt worden und hat mit der Chaostheorie nichts zu tun. Wir werden auf diese deshalb erst dann eingehen, wenn wir uns näher mit zellulären Automaten beschäftigen (Teil IV, Abschnitt 3.2). Das Bild von Komplexität zwischen Ordnung und Unordnung findet sich aber auch bei den noch vorzustellenden Komplexitätsmassen thermodynamische Tiefe und Diversität (Teil III, Abschnitt 2.3).

Das Problem der Prognostizierbarkeit: Da die mangelnde Prognostizierbarkeit sowohl als Eigenschaft komplexer wie chaotischer Systeme angesehen wird, gehen wir auf diesen Aspekt etwas genauer ein. So sehen manche Autoren in der Unvorhersehbarkeit von Endzuständen ein definitorisches Merkmal von Chaos, wie *Robert W. Batterman* feststellt.³⁴ Batterman erwähnt ein Beispiel von J. Ford. Dieser sieht ein hinreichendes Kriterium für Chaos gegeben, wenn das dynamische System Sequenzen mit maximalem algorithmischem Informationsgehalt (d.h. Zufallssequenzen) erzeugen kann. Dieser Ansatz schlägt fehl, weil auch nichtchaotische Systeme dies leisten können. Batterman schliesst seine Ausführungen mit: „(...) chaos cannot be identified or fully characterized purely in terms of the possession of random output sequences and strongly statistical ergodic properties (...)“.³⁵ Ein derartiges Verhalten ist zwar ein typisches, aber kein definierendes Merkmal chaotischer Systeme.

Aufgrund der angesprochenen Prognoseschwierigkeiten für chaotische Systeme finden Post-facto-Erklärungen Anwendung (zum Begriff „Post-facto-Erklärung“ vgl. Abschnitt 3.1 in diesem Teil). Es gibt übrigens eine weitere Schwierigkeit bei der Untersuchung chaotischer Systeme: So kann man zwar durch Analyse von Zeitserien feststellen, ob eine Dynamik chaotisch ist. Die konkrete Gleichung hingegen kann nicht erstellt werden.³⁶ Die Identifizierung eines solchen Systems mit einem mathematischen Objekt ist also nicht durchführbar.

²⁸ Etwa in Livi et al. (1987).

²⁹ So meint etwa Çambel (1993): „(...) [chaos theory] serves as the most powerful and general paradigm for the study of complex systems.“, Seite 14. Vergleiche auch Wolschin (1989), S. 21.

³⁰ Çambel (1993), Kapitel 1.

³¹ Vergleiche Kauffman (1993) oder Waldrop (1992): „(...) the edge of chaos is like an infinitesimally thin membrane, a region of special, complex behaviours separating chaos from order.“, S. 295.

³² Lewin (1993), S. 72-78.

³³ Packard (1988), vgl. Waldrop (1992), S. 302.

³⁴ Batterman (1993), die ausführliche Argumentation findet sich auf S. 43-45.

³⁵ Batterman (1993), S. 62.

³⁶ Weiteres zur Problematik der Analyse chaotischer Zeitreihen finden sich in Isola (1987), S. 29-34.

2.4. Ordnung

Ordnung gilt als ein sehr wichtiges Konzept in den Wissenschaften, ist aber schwierig zu definieren. Grundsätzlich beschreibt die Ordnung eines Systems die Gesamtheit regelmässiger Beziehungen zwischen dessen Elementen, wobei Symmetrieüberlegungen zentral sind.³⁷ Ordnung kann wie schon erwähnt als Gegenbegriff von Chaos verwendet werden. Ein paradigmatisches Beispiel für Ordnung ist etwa ein perfekter Kristall. Unordnung wird im Kontext der Physik oft mit einer hohen Entropie gleichgesetzt. In diesem Sinn kann Entropie als Mass für Ordnung verwendet werden. Innerhalb der Informationstheorie setzt man Unordnung mit Zufall in Zusammenhang. Entsprechend lässt sich auch die Shannon-Entropie als Mass für Ordnung verwenden.

Ordnung hat auch eine epistemische Bedeutung:³⁸ Geordnete Strukturen sind in der Natur besser erkennbar bzw. es lassen sich leichter Relationen zwischen den Teilen geordneter Strukturen finden. Insofern ist beispielsweise eine geordnete Sequenz algorithmisch kompressibel, während bei einer ungeordneten Sequenz der algorithmische Informationsgehalt sehr hoch ist.

Die Rede von Ordnung innerhalb der Biologie ist problematischer.³⁹ „Ordnung“ im biologischen Kontext bedeutet meist, dass die Teile eines Organismus (z.B. die Organe, usw.) einen fest definierten Platz haben. Entropie-Ansätze zur Bestimmung eines Masses für Ordnung finden demnach in der Biologie keine Anwendung.⁴⁰ Der Gebrauch dieses Begriffs in der Biologie macht weiter den Anschein, dass Ordnung und Organisation in Beziehung gesetzt werden, d.h. organisierte Strukturen werden als geordnet bezeichnet.⁴¹ Eine Gleichsetzung beider Begriffe ist aber nicht angebracht, wie *Jeffrey S. Wicken* ausführte.⁴² Zuweilen wird auch ein Bezug zwischen Ordnung und Selbstorganisation gesehen: So sollen Selbstorganisationsphänomene geordnete Strukturen hervorbringen, diese Ordnung wird dann als „emergente Eigenschaft“ aufgefasst.⁴³ Damit gelangen wir in den Dunstkreis der Emergenz-Problematik.

Ordnung und Komplexität: Die Beziehung zwischen Ordnung und Komplexität ist in vielen Fällen unklar. Ein Paradebeispiel dafür ist *Stuart A. Kauffman*.⁴⁴ Er spricht in seinem Buch „The Origins of Order“ laufend davon, dass sowohl komplexe als auch einfache Systeme Ordnung aufweisen (exhibit). Offenbar ist „geordnet“ bei Kauffman von der Eigenschaft „komplex“ unabhängig. Andererseits weist er im Zusammenhang mit dem Verhalten von zellulären Automaten darauf hin, dass sich komplexes Verhalten in einer Übergangsphase von geordnetem zu chaotischem Verhalten einstellt (der berühmte „Rand des Chaos“).⁴⁵ Wieder an anderer Stelle spricht er schliesslich sogar von „geordneter Komplexität“⁴⁶. Dieser wechselnde Sprachgebrauch trägt nicht gerade zur Klärung von Kauffmans Standpunkt bei.

G. Kampis et al. unterscheiden Ordnung und Komplexität folgendermassen:⁴⁷ (Struktur-)Komplexität bezieht sich auf die Beschreibung eines Systems, während sich Ordnung auf die Gesetzmässigkeit der Beschreibung bezieht. Verbirgt sich hinter einer Beschreibung eine einfache Gesetzmässigkeit, so ist das System geordnet. Die genaue Argumentation ist aber schwierig nachzuvollziehen, so dass wir darauf verzichten, diese hier darzustellen.

³⁷ Mittelstrass (1984), Stichwort „Ordnung“.

³⁸ Vergleiche dazu Morin (1991).

³⁹ Mit dem Ausdruck „Ordnung“ ist dabei nicht die gleichnamige systematische Einheit gemeint, die in der Taxonomie zur Anwendung kommt.

⁴⁰ Vergleiche dazu beispielsweise Shiner (1995). Er argumentiert, dass die sogenannte „landsberg-order“ sich im Falle wachsender Systeme besser eignet als Entropiemasse.

⁴¹ So z.B. in Shiner (1995), S. 1. (Seitenangabe bezieht sich auf ein separat ausgeteiltes Paper und nicht auf die später erschienenen „Proceedings“).

⁴² Wicken (1979): „Organized‘ Systems are to be carefully distinguished from ‘ordered‘ systems.“, S. 353. Bischof (1988) sieht in „Ordnung“ ein Begriff, der für das Innere des Systems Sinn macht, d.h. Auskunft über die Anordnung der Teile gibt, während „Organisation“ einen teleologischen Aspekt aufweist, d.h. ein System ist zur Erreichung eines Ziels hin organisiert, S. 88/89.

⁴³ Vergleiche Mainzer (1992), S. 272.

⁴⁴ Kauffman (1993).

⁴⁵ Kauffman (1993), Kap. 5.

⁴⁶ Kauffman (1993), S. 182.

⁴⁷ Kampis et al. (1987).

Frank Papentin bestimmt Ordnung so, dass ein entsprechendes Mass auf derselben Skala liegt wie ein Komplexitätsmass.⁴⁸ Ist die Beschreibung eines Objektes kurz, so ist dieses geordnet; ist die Beschreibung lang, so ist dieses komplex. Dadurch wird sein Konzept von Ordnung bezüglich dieser beschreibenden Sprache relativiert. Für weitergehende Erörterungen verweisen wir auf Abschnitt 2.4 in Teil III, wo wir Papentins Komplexitätsmass vorstellen.

B.A. Huberman et al. schliesslich folgen der Intuition, dass Komplexität eine Funktion der Ordnung eines Systems ist.⁴⁹ Deckt dabei ein Mass für Ordnung das Intervall $[0, k]$ ab (0: maximale Ordnung, k: maximale Unordnung), so soll das Komplexitätsmass C für die Randpunkte jeweils den Wert $C(0) = C(k) = 0$ haben. Für den Maximalwert $C_{\max}(x)$ gilt dann: $0 < x < k$. Für das von Huberman et al. vorgeschlagene Komplexitätsmass siehe Teil III, Abschnitt 2.3

Dieser kurze Überblick zeigt, dass zum Verhältnis von Ordnung und Komplexität sehr verschiedenartige Ansichten vorhanden sind. Wir halten den Ansatz von Huberman et al. für am brauchbarsten und schlagen deshalb vor, quantitative Komplexität als Funktion eines Masses für Ordnung zu verstehen.

2.5. Organisation

Mindestens ebenso verwirrend wie beim Begriff „Ordnung“ ist die Situation bei der „Organisation“.⁵⁰ Man gebraucht den Begriff sowohl für Strukturen wie für Prozesse. Dabei sind zwei Trends auszumachen: Einer sieht Organisation im Zusammenhang mit der Redundanz der Ordnung, d.h. die bestorganisierte Struktur wäre ein perfekter Kristall.⁵¹ Der zweite sieht im Gegensatz dazu Organisation als Eigenschaft nichtrepetitiver Ordnung, gemessen als Informationsgehalt, die aber wiederum vom Zufall abgegrenzt werden muss.⁵²

Komplexität und Organisation: Die Beziehung zwischen den Begriffen „Organisation“ und „Komplexität“ wird sehr verschieden dargestellt. *Harold F. Blum* hält beide Begriffe für entgegengesetzt. Für die Definition von Komplexität soll ein thermodynamischer Ansatz verwendet werden, d.h. hohe Komplexität ist gleichbedeutend mit hoher Entropie. Organisation hingegen setzt er mit einer minimalen Entropie gleich. Eine bestorganisierte Struktur wäre demnach wie oben erwähnt ein perfekter Kristall.⁵³ Blum selbst erwähnt, dass er sich mit diesem Sprachgebrauch vom alltäglichen entfernt. Wir sind jedenfalls der Ansicht, dass Blums Verständnis von Komplexität und Organisation in die Irre führt.

Gregory J. Chaitin verwendet beide Begriffe synonym, d.h. eine komplexe ist zugleich eine organisierte Struktur.⁵⁴ Ein Mass für Komplexität bestimmt er unter Verwendung des algorithmischen Informationsgehaltes, wie wir noch feststellen werden.

Daniel W. McShea hingegen hält Komplexität für eine rein strukturelle Eigenschaft von Systemen, während Organisation deren Funktion betrifft.⁵⁵ Innerhalb dieses Schemas besteht also kein direkter Zusammenhang zwischen Organisation und Komplexität. Bei Organismen wird ein solcher aber durch den Prozess der Evolution geschaffen, da komplexere Organismen auch organisierter sein müssen, um überleben zu können.

⁴⁸ Papentin (1980), S. 423.

⁴⁹ Huberman et al. (1986).

⁵⁰ An der Heiden (1992) stellt etwa fest: „Auch im wissenschaftlichen Sprachgebrauch sind diese Begriffe [Organisation und Selbstorganisation] nicht eindeutig festgelegt (...).“ S. 57.

⁵¹ Blum (1963).

⁵² Atlan (1974), S. 296. Auch Chaitin (1979) äussert sich entsprechend, der als Extreme der Unorganisiertheit ein Gas und ein Kristall nennt: „Neither a gas nor a crystal should count as organized (...).“ S. 478.

⁵³ Blum (1963): „Complexity seems to imply multiplicity and organization to suggest orderliness. (...) complexity ought to be associated with high entropy, and organization with low entropy“ (S. 115). Und weiter: „I think (...) that the term „complexity“ if given a strictly thermodynamic, numerical definition – as seems appropriate – is far from synonymous with organization, and even contrary in meaning.“, S. 120.

⁵⁴ Chaitin (1979). Auch Bennett (1988a) verwendet die Begriffe synonym, S. 216.

⁵⁵ McShea (1991), S. 305. Siehe auch Wicken (1979), S. 353.

Für *John D. Barrow* ist Organisation das Wesensmerkmal des Komplexen.⁵⁶ Der Bereich des Komplexen in der Welt ist charakterisiert durch die Organisation der Materie und nicht durch ein ungewöhnliches Verhalten der Naturkräfte. Diese organisierten Strukturen belegen eine Welt zwischen dem ganz Grossen und dem ganz Kleinen. Damit das Komplexen überhaupt entstehen kann, braucht es definierte Randbedingungen. Insofern sind etwa bestimmte Eigenschaften der Materie (etwa Supraleitfähigkeit bestimmter Substanzen bei vergleichsweise hohen Temperaturen) zwar in den Grundgesetzen der Natur als latente Möglichkeit vorhanden, aber erst bei sehr definierten Randbedingungen faktisch realisiert worden. Insofern ist übrigens ein naiver Reduktionismus, der Organisationsprinzipien ausschliesst, kein durchführbares Programm, meint Barrow.

Für *Edgar Morin* ist schliesslich ein organisiertes Gebilde „quelque chose de *plus* que la somme des parties“.⁵⁷ Es wird also ein Zusammenhang zwischen Organisation und Emergenz postuliert. *William Bechtel* und *Robert C. Richardson* äussern sich ähnlich: „It is certainly important to distinguish the properties of complex systems from the properties of their constituents. Because of organizational properties, the properties of complex systems may differ significantly from any properties of the constituents of the system.“⁵⁸

Ausserdem muss unserer Ansicht nach ein weiterer Aspekt berücksichtigt werden. Organisierte Gebilde sind immer *bezüglich* eines bestimmten Ziels bzw. einer bestimmten Funktion organisiert. Dieser externe Aspekt unterscheidet die Begriffe „Komplexität“ und „Organisation“. Ist also ein Mass für Organisation gegeben, ist dessen Maximum auf diesen externen Aspekt abgestimmt. Dies gilt für ein Komplexitätsmass nicht.

2.6. Selbstorganisation

Der Begriff „Selbstorganisation“ tritt innerhalb der Komplexitätswissenschaft sehr oft auf. Wie wir noch feststellen werden (Teil II, Abschnitt 1.4), kann man eine Reihe von Disziplinen zum Projekt „Selbstorganisationsforschung“ zusammenfassen. Diese untersucht grundsätzlich Strukturbildungsprozesse im makroskopischen Bereich.

Die Rede von Selbstorganisation ist aber mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Ausgangspunkt sind Phänomene innerhalb der Physik und Chemie, wo man bis zu einem bestimmten Punkt auch klären kann, was Selbstorganisation bedeutet. Im Laufe der Zeit wurde Selbstorganisation aber ein sehr weitgreifendes Konzept, etwa gipfend im Satz „Gott ist die Selbstorganisations-Dynamik des gesamten Universums“.⁵⁹ *Erich Jantsch* hält Selbstorganisation für ein zentrales Paradigma, das in allen Wissenschaften Anwendung finden soll.⁶⁰ Entsprechend wird die Selbstorganisationsforschung als ein fächerübergreifendes Forschungsprogramm aufgefasst und ist in diesem Sinn mit der Komplexitätsforschung vergleichbar.⁶¹ Auch die Emergenzproblematik wird berührt, soll doch Selbstorganisation als theoretisches Konzept auch Bestandteil einer antireduktionistischen Wissenschaft sein.⁶²

Diese grosse Popularisierung des „Selbstorganisations-Ansatzes“ geht also einher mit einer sehr unpräzisen Verwendungsweise des Begriffs. Wir können im Folgenden nicht umfassend auf diese eingehen und beschränken uns primär auf eine Untersuchung des Verhältnisses zwischen Komplexität und Selbstorganisation.

⁵⁶ Vergleiche Barrow (1992), Kap. 7.

⁵⁷ Morin (1991), S. 285.

⁵⁸ Bechtel et al. (1983), S. 387.

⁵⁹ F. Capra, zitiert nach Mittelstrass (1984), Stichwort „Selbstorganisation“.

⁶⁰ Jantsch (1979).

⁶¹ Siehe dazu etwa Mainzer (1992), S. 259.

⁶² Niedersen (1990) meint dazu: „Mit dem Paradigma „Selbstorganisation“ wird eine grundsätzliche Kritik am mechanistischen Weltverständnis und seinem natur-, sozial- und geisteswissenschaftlichen Reduktionismus vollzogen. (Geleitwort).“

Was ist Selbstorganisation? Generell versteht man unter Selbstorganisation die Leistung eines Systems, die lediglich durch die Wechselwirkung seiner Komponenten ausgeht und nicht durch Einflüsse von außen bestimmt wird, wie *Uwe an der Heiden* festhält.⁶³ Als Gegenbegriff figuriert „Fremdorganisation“, d.h. die Eigenschaften fremdorganisierter Systeme werden diesem von der Systemumwelt aufgezwungen.

Friedrich Cramer macht auf drei verschiedene Aspekte von Selbstorganisation aufmerksam.⁶⁴ So gibt es einmal eine Selbstorganisation, die durch vorgegebene Eigenschaften der Teile gegeben ist. Die Kristallisation eines Salzes ist ein solches Beispiel, bei welchem das Kristallgitter durch die Struktur der Ionen definiert wird. Davon zu unterscheiden ist die von einem Programm gesteuerte Selbstorganisation. Als Beispiel nennt er die Ontogenese eines Organismus, wobei der Prozess der Zelldifferenzierung letztlich durch das Genom des Lebewesens gesteuert ist (wie das geschieht, ist ein sehr aktueller Forschungsschwerpunkt der Entwicklungsbiologie). Schliesslich gibt es eine „echte Selbstorganisation“ als Systemeigenschaft bzw. als ein Attribut der Materie, ähnlich wie die Schwere: Unter bestimmten Randbedingungen organisiert sich Materie notwendig zu bestimmten Strukturen. Diese Redeweise ist aber sehr problematisch, da sie keine Erklärungskraft hat. Ähnlich wie man die Wirkung eines Schlafmittels durch das Vorhandensein einer „einschläfernden Substanz“ erklärt, ist Selbstorganisation einfach eine Eigenschaft von Materie. Die Cramersche „echte Selbstorganisation“ ist Begriffsspielerei.

Sinnvoller sind da schon die Versuche, konkrete Strukturbildungsprozesse zu verstehen. Ein exemplarisches Beispiel ist die Bildung von Bénard-Zellen, die auftauchen, wenn man eine Flüssigkeitsschicht einem Temperaturgradienten unterwirft. Konkret sorgt man dafür, dass die Unterseite einer Schicht Wasser erwärmt wird, während die Oberfläche gekühlt ist. Ab einer bestimmten Temperaturdifferenz bildet sich eine thermische Konvektion in der Form von „Walzen“ bzw. Zellen. Dieses Phänomen gilt als paradigmatisches Beispiel einer sich selbst organisierenden Struktur.⁶⁵

Eine Reihe von Autoren bringen schliesslich Selbstorganisation und Emergenz in Beziehung.⁶⁶ Eine detailliertere Betrachtung würde wohl auch hier eine Reihe von Problemen ergeben, vergleichbar mit dem Verhältnis von Komplexität und Emergenz.

Selbstorganisation und Komplexität: Oft geht man von einem sehr engen Verhältnis der Begriffe Selbstorganisation und Komplexität aus: *A.B. Çambel* meint stellvertretend für diese Ansicht, dass alle selbstorganisierten Systeme komplex zu nennen sind, während das Umgekehrte nicht unbedingt gelten muss.⁶⁷ Wir glauben hingegen, dass diese Sichtweise problematisch ist. Es hängt stark vom Einzelfall und vom verwendeten Komplexitätsmass ab, inwieweit man eine selbstorganisierte Struktur als komplexer betrachten will als den Ausgangszustand. Es ist durchaus denkbar, dass man letzteren als komplex bezeichnet, während durch Selbstorganisation eine verhältnismässig einfache Struktur entsteht. Man kann nicht sagen, dass selbstorganisierte Strukturen notwendig komplexer sind als der Ausgangszustand.

3. Wissenschaftstheoretische Grundbegriffe

3.1. Erklärung von Komplexität

Wir haben im Vorwort davon gesprochen, dass die Komplexitätsforschung nach einer „Erklärung für Komplexität“ sucht. Diese Aussage verlangt natürlich nach einer Explikation, was wir im Folgenden

⁶³ An der Heiden (1992), S. 72/73.

⁶⁴ Cramer (1988), S. 224-230.

⁶⁵ Details siehe beispielsweise in Nicolis et al. (1989), S. 8-15.

⁶⁶ Baas (1994) sieht beispielsweise einen notwendigen Zusammenhang: „It seems reasonable to require that a self-organizing system should exhibit emergent properties.“, S. 527. Küppers et al. (1992) sehen im Begriff Emergenz einen zentralen Fokus der verschiedenen Selbstorganisationstheorien, S. 7.

⁶⁷ Çambel (1993), S. 20

versuchen wollen. So muss man unterscheiden zwischen der Erklärung der Entstehung eines komplexen Systems und der Erklärung von komplexem Verhalten. Dies bedingt Klarheit darüber, was ein komplexes System bzw. was komplexes Verhalten ist. Von den Ansprüchen der Komplexitätsforschung ausgehend, müsste der Begriff „komplexes System“ auf eine sehr grosse Klasse von Entitäten zutreffen. Wir versuchen, am Ende von Teil III charakteristische Merkmale komplexer Systeme anzugeben, und gehen im weiteren davon aus, dass man wüsste, was ein komplexes System ist. Klar ist dabei auch, dass die Komplexitätsforschung an ontologischer Komplexität interessiert ist. Komplexes Verhalten zu spezifizieren, ist ebenfalls schwierig. Auch hier setzen wir die Lösung dieses Problems voraus.

Zuerst eine Bemerkung zum Status des Begriffs „Komplexität“. *Rudolf Carnap* hat eine Zwei-Schichten-Theorie empirischer Sprachen vorgeschlagen.⁶⁸ Gemäss dieser wird zwischen Termen der Beobachtungssprache und solchen des theoretischen Vokabulars unterschieden. Carnaps Modell ist sicher nicht unumstritten, und wir verwenden es hier nur für die Explikation methodologischer Unterscheidungen. „Komplexität“ ist dem theoretischen Vokabular zuzurechnen und demnach ein theoretischer Term. Dies deshalb, weil (quantitative) Komplexität keine direkt beobachtbare Observable ist. Wir brauchen vielmehr ein recht umfangreiches theoretisches Rüstzeug, um ein Komplexitätsmass einführen zu können, wie noch deutlich werden wird (vgl. Teil III).⁶⁹

Betrachten wir den ersten Fall, die Erklärung der Entstehung eines komplexen Systems. Dies setzt voraus, dass solche Systeme Ergebnisse eines Prozesses sind, als klassisches Beispiel kann man die biologische Evolution anführen (zum Verhältnis von Evolution und Komplexität siehe Teil III, Abschnitt 2.5). Zu Beginn dieses Prozesses muss das System „einfacher“ gewesen sein. Es sei also zu einem Zeitpunkt t das einfache System S_1 gegeben, das sich im Verlauf von Δt zum komplexeren System S_2 entwickelt hat. Wir müssen dabei keinerlei Ähnlichkeiten zwischen S_1 und S_2 annehmen, sondern lediglich S_1 als Vorstufe von S_2 betrachten. Damit dieser Weg vom Einfachen zum Komplexen aber verständlich gemacht werden kann, muss ein Mass für Komplexität, nennen wir es C , angegeben werden können. Man muss also erklären: Warum $C(S_2) > C(S_1)$?

Bevor wir weiterfahren, machen wir einige Bemerkungen zum Begriff „Erklärung“. Die präziseste Ausführung der klassischen Theorie der wissenschaftlichen Erklärung stammt von *Carl Hempel* und *Paul Oppenheim*.⁷⁰ Gemäss dieser gilt ein Phänomen (Explanandum) dann als erklärt, wenn es aus einer Reihe von Gesetzen und Randbedingungen (den Explanans) abgeleitet werden kann.⁷¹ Dieses Erklärungsmodell nennt man HO-Schema (HO für Hempel-Oppenheim). Auf unseren Fall angewendet wird eine Erklärung des Prozesses $S_1 \Rightarrow S_2$ dann interessant, wenn die Komplexitätsforschung dazu neue Gesetze postuliert. Manche Äusserungen im Umfeld der Komplexitätswissenschaft lassen den Schluss zu, dass solche gesucht werden. Darauf werden wir in Teil IV, Abschnitt 1.2 eingehen.

Im zweiten Fall präsentiert sich die Sachlage anders. Wenden wir das HO-Schema an, so muss entsprechend von Gesetzen gesprochen werden, die das Verhalten des Systems bestimmen. Der interessante Fall dabei ist, wenn die Gesetze, die das Verhalten der Systemteile determinieren, nicht ausreichen, um das Verhalten des Gesamtsystems zu beschreiben. Braucht es neue Gesetze, stellt sich die Frage, welche Beziehung diese zu den bisher bekannten haben. Wie wir noch sehen werden, bezeichnet man in der Komplexitätsforschung gewisse Aspekte des Verhaltens komplexer Systeme gerne als „emergent“. Dies lässt darauf schliessen, dass man tatsächlich neue Gesetze im vorgestellten Sinn postulieren will. In beiden Fällen geraten wir in die Emergenzdebatte, sobald die Frage nach dem Verhältnis dieser neuen Gesetze zu den bisher bestehenden gestellt wird.

⁶⁸ Aus von Kutschera (1981), Kap. 9.

⁶⁹ Natürlich kann man im Angesicht eines komplexen Systems auch unmittelbar zur Behauptung „Oh, ist das komplex!“ gelangen. Damit ist man aber meist in der trivialen Komplexität verhaftet, so dass uns dieser Fall nicht zu interessieren braucht.

⁷⁰ Aus Lambert et al. (1991), S. 33-41. Es gibt übrigens auch eine Reihe anderer Erklärungsbegriffe. Wir sind nicht darauf eingegangen, inwiefern diese für die Explikation von „Erklärung von Komplexität“ adäquater sind.

⁷¹ Diese Formulierung ist nicht ganz präzise, da man nur Sätze (und nicht Phänomene) ableiten kann. Demzufolge müssen sowohl das Phänomen wie auch die Gesetze und die Randbedingungen in Form von Sätzen vorliegen.

Im Folgenden gehen wir noch kurz auf den Begriff „Post-facto-Erklärung“ ein.⁷² Derartige Erklärungen galten lange als suspekt, da man innerhalb der Wissenschaftstheorie davon ausging, zwischen Erklärung und Prognose bestünde eine enge Beziehung. Ihren Ausdruck fand diese Überzeugung in der These, jede Erklärung sei eine (potentielle) Prognose und jede (gute) Prognose eine potentielle Erklärung. Diese Ansicht gilt heute als fragwürdig,⁷³ wobei auch die Ergebnisse der Chaostheorie Zweifel an dieser These weckten. So ist man im Falle chaotischer Systeme damit konfrontiert, dass kleinste Einflüsse makroskopische Auswirkungen haben, wie *Jesse Hobbs* ausführt.⁷⁴ Da jede Messung endliche Genauigkeit aufweist, ist eine Voraussage in chaotischen Systemen über längere Zeiträume nicht möglich, und das beobachtete Systemverhalten ist in diesem Sinn erst post facto erklärbar.

3.2. Reduktionismus

Die Komplexitätsforschung befindet sich im Spannungsfeld von Reduktionismus und Emergenz. Dies haben wir schon mehrfach angesprochen, und wir werden ausführlich aufzeigen, zu welchen Problemen dies führt. In den folgenden beiden Abschnitten liefern wir dazu eine Einführung in die verschiedenen Reduktions- und Emergenzbegriffe.⁷⁵

Reduktionismus lässt sich grob folgendermassen charakterisieren: Es sollen Phänomene auf der Basis ihrer elementaren Konstituenten und der Gesetzmässigkeiten, denen diese gehorchen, verstanden werden. Es wird also die Existenz einer „unteren“ Ebene A angenommen, auf welche sich die Phänomene der „oberen“ Ebene B zurückführen lassen. Die Unterteilung in zwei solche Ebenen ist eine Voraussetzung für die Anwendung des Reduktionsbegriffs.⁷⁶ Die reduktionistische Methode sieht vor, dass man Ganzheiten durch Analyse ihrer Teile verstehen kann. Ein Reduktionist würde beispielsweise behaupten, dass sich sämtliche biologische Phänomene zumindest im Prinzip mittels physikalischer Gesetze erklären liessen.

Es gibt eine ganze Reihe von Reduktionsbegriffen. So kann man zwischen *diachronischem* und *synchronischem* Reduktionismus unterscheiden. Diachronischer Reduktionismus betrifft den Vergleich einer Theorie mit deren Vorgängerin. So kann man sich diesbezüglich die Frage stellen, inwiefern Newtonsche Mechanik auf relativistische Mechanik reduziert werden kann. Synchronischer Reduktionismus hingegen betrifft den Vergleich von (aktuellen) Theorien über verschiedene Komplexitätsebenen. Im Folgenden untersuchen wir nur den synchronischen Reduktionismus. Hier lassen sich vier Fälle unterscheiden:

Der *ontologische Reduktionismus* behauptet, dass das Grundsubstrat aller Gegenstände auf den verschiedenen Komplexitätsebenen dasselbe ist. Ein Gegner des ontologischen Reduktionismus würde beispielsweise behaupten, in Lebewesen liesse sich ein besonderer „Lebensstoff“ finden. Leute, die so argumentieren, findet man zumindest innerhalb des Wissenschaftsbetriebs kaum mehr. Der ontologische Reduktionismus ist gemeinhin akzeptiert.

Kontroverser ist die Situation beim *epistemischen Reduktionismus*. Dieser behauptet, dass man das Wissen über die Phänomene der höheren Stufe auf das Wissen über jene der unteren Stufe zurückführen kann. Dies verlangt einerseits nach einer Verbindbarkeitsbedingung, d.h. die B-Begriffe müssen mit A-Begriffen formuliert werden können. Andererseits muss eine Ableitbarkeitsbedingung erfüllt sein, d.h. das B-Wissen muss tatsächlich aus A-Wissen abgeleitet werden können. Der klassische epistemische

⁷² Oft findet man auch die Bezeichnung „ex post facto“. Diese ist rein sprachlich aber falsch, ein Hinweis, den ich Paul Hoyningen-Huene verdanke.

⁷³ Vergleiche dazu Lambert et al. (1991), S. 69-73.

⁷⁴ Hobbs (1993).

⁷⁵ Die Ausführungen stützen sich auf Dupré (1983), S. 321-323; Nagel (1979), Kap. 11; Schlosser (1993), Kap. 1; und die Ausführungen Paul Hoyningen-Huenes in der Veranstaltung „Ist das Ganze mehr als die Summe seiner Teile?“ (Universität Bern, Sommersemester 1996).

⁷⁶ Die Unterscheidung zwischen solchen Ebenen ist „ontologischer Natur“, d.h. auf den Ebenen finden sich jeweils verschiedene Klassen von Gegenständen. Daraus ergibt sich auch eine „epistemische“ Unterteilung, d.h. die zwei Klassen von Gegenständen werden mit verschiedenen Theorien erklärt. Die Reduktionismus-Problematik betrifft meist das Verhältnis der Theorien. Die Unterscheidung zwischen den Gegenstandsklassen kann also auch bei einer durchgeführten Reduktion aufrechterhalten werden.

Reduktionismus wurde von *Hilary Putnam* und *Paul Oppenheim* formuliert.⁷⁷ In diesen Bereich fällt auch *Ernest Nagels* Modell der Theorienreduktion, der argumentiert, dass die B-Phänomene durch die Theorie von A und durch sogenannte Brückenprinzipien erklärt werden können.⁷⁸

Beim *methodologischen Reduktionismus* lassen sich zwei Varianten unterscheiden: Die starke Version behauptet, dass man auf der B-Ebene nur mit Methoden der A-Ebene brauchbare Resultate erzielen könne und demzufolge auch jede Erklärung von B-Phänomenen in A-Sätzen zu erfolgen habe. Diese Forderung erweist sich als undurchführbar, da das Wissen auf der B-Ebene überhaupt erst einmal erzeugt werden muss. Entsprechend gibt es auch kaum jemanden, der diese starke Version wirklich vertritt. Gegner des Reduktionismus benutzen die starke Form gerne als propagandistisches Konstrukt, um das gesamte reduktionistische Programm zu diskreditieren. Die schwächere Form behauptet den methodologischen Reduktionismus lediglich als Leitidee, die eine „ausgereifte Wissenschaft“ in ferner Zukunft erfüllen wird. Dahinter verbirgt sich ein nicht unumstrittenes Modell des wissenschaftlichen Fortschritts. Uns erscheint der methodologische Reduktionismus demnach als eher problematische Version.

Schliesslich spricht man auch von *explanatorischem Reduktionismus*. Dieser behauptet, dass es für jedes B-Phänomen einen Mechanismus aus A gibt, welcher dieses erklärt. Ein Beispiel wäre, wenn man das Balzverhalten von Gnus durch die Anwesenheit gewisser Hormone und deren Wirkung auf das Nervensystem dieser Tiere erklären würde.

Im weiteren stellt sich die Frage, welche Beziehungen zwischen diesen vier Reduktionsbegriffen herrschen. Eine Untersuchung aller möglichen Kombinationen zeigt, dass einige Positionen nicht konsistent sind, während bei anderen diese Frage kontrovers diskutiert wird.

Auf einen Aspekt wollen zum Schluss noch hinweisen: So wird ein Unterschied zwischen *prinzipieller* und *faktischer* Reduktion postuliert, man quantifiziert also die Stärke von Reduktionsbehauptungen. Dies kann man so verstehen, dass die praktische Durchführung einer Reduktion an den nicht vorhandenen Mitteln scheitert. Es ist aber sicher zulässig zu fragen, wie man in einem solchen Fall die Güte der Reduktion testen kann. Der Bezug auf eine rein prinzipielle Reduktion immunisiert diese vor Falsifizierung.

3.3. Emergenz

Mit dem Begriff „Emergenz“ lässt sich eine Gegeposition zum Reduktionismus charakterisieren. Emergentisten bestreiten, dass die oben vorgestellten Reduktionsstrategien anwendbar sind. Die Position der Emergentisten kann man mit dem eingängigen, im Detail aber problematischen Satz „das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ charakterisieren. Wir werden den Emergenzbegriff im Folgenden ausführlich vorstellen, da dieser Term im Projekt der Komplexitätsforschung eine wichtige Stellung einnimmt. Wir orientieren uns dabei primär an der Arbeit von *Paul Hoyningen-Huene*.⁷⁹

Zur Geschichte des Emergenzbegriffs: In der Geschichte des Emergenzbegriffs lassen sich vier Phasen unterscheiden: Die fundamentale Unterscheidung zwischen emergent und resultant wurde dem Sinn nach von *John Stuart Mill* eingeführt und später von *Henry Lewes* entsprechend bezeichnet. Eine resultante Eigenschaft ist demzufolge beispielsweise das Gewicht eines Körpers. Fügt man zwei Körper mit dem Gewicht a und b zusammen, ergibt sich für den neuen Körper das Gewicht a + b. Paradebeispiel einer emergenten Eigenschaft ist der Geruch eines Gases. Wasserstoff und reiner Schwefel sind geruchlos, der gasförmige Schwefelwasserstoff H₂S hingegen stinkt penetrant nach faulen Eiern. Der Geruch von H₂S ist aus dem Geruch der Grundsubstanzen nicht herleitbar.

Grosse Popularität erlangt der Begriff in der *Evolutionstheorie der 20er Jahre*. Emergenz charakterisierte damals eine dritte Position im Streit zwischen Mechanisten und Vitalisten. Im Gegensatz zur vitalistischen Position geht diese Theorie wie der Mechanismus davon aus, dass alle Eigenschaften lebender

⁷⁷ Oppenheim et al. (1958), zitiert nach Dupré (1983), S. 323.

⁷⁸ Ausgeführt in Nagel (1979), Kap. 11.

⁷⁹ Hoyningen-Huene (1994), vergleiche auch Stephan et al. (1994).

Organismen durch ihre Teile und deren Zusammenwirken vollständig determiniert sind. Die Annahme einer weiteren Substanz (eines „Lebensstoffs“) wird bestritten. Im Gegensatz zum Mechanismus vertritt die Theorie der Emergenz die Auffassung, dass die Eigenschaften lebender Organismen nicht aus dem Verhalten der Teile abgeleitet werden können. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang vor allem C.D. Broad's Buch „The Mind and its Place in Nature“, wo dieser auf die Rolle der Kompositionsgesetze für das Verständnis von Ganzheiten hinweist.

Der damals eingeführte Emergenzbegriff wurde bis zu Beginn der 60er Jahre lebhaft diskutiert. Die Debatte endete mit der vernichtenden Kritik *Ernest Nagels* im Jahr 1961.⁸⁰ Dessen Analyse führte zu einem recht schwachen, epistemischen und theorie-relativen Begriff von Emergenz, der kein besonderes wissenschaftstheoretisches Interesse mehr beanspruchen kann. Unglücklicherweise hat zudem der grosse Erfolg der Quantentheorie für die Erklärung chemischer Phänomene dazu geführt, dass den Emergenten die Beispiele für Emergenz ausgingen.

Eine Renaissance erlebte der Emergenzbegriff schliesslich in den 70er Jahren. Dies hängt einerseits mit dem zunehmenden Interesse am *Hirn-Geist-Problem* zusammen. Der durch das Hirn „erzeugte“ Geist gilt als Paradebeispiel einer emergenten Eigenschaft, die durch Neurophysiologie allein nicht erklärt werden kann. Andererseits spielt Emergenz auch in der aufkommenden *Komplexitätsforschung* eine prominente Rolle, wie wir schon festgestellt haben.

Voraussetzungen: Die Verwendung des Emergenzbegriffs beruht auf drei Voraussetzungen: Die grundlegende ontologische Prämisse ist der *materialistische Monismus*. Vitalistische oder dualistische Konzepte haben keinen Platz. Auch wird der Emergenzbegriff immer im Zusammenhang mit einem Übergang zwischen zwei (Komplexitäts-)Stufen angewendet. Die höhere Stufe besteht dabei aus Systemen der unteren Stufe. Diese Teil-Ganzes-Relation muss spezifiziert werden können. Schliesslich gilt es, das *Vokabular* festzulegen, mit welchem man über die beiden Stufen spricht. Ohne diese Festlegung ist es gar nicht möglich, überhaupt zu einem Begriff von Emergenz zu kommen. Das Vokabular darf aber nicht so gewählt werden, dass Emergenz trivialerweise vorliegt oder eben nicht. Teilhard de Chardins Gedanke, schon Atome besäßen eine Vorform von Bewusstsein (vgl. Teil III, Abschnitt 2.5), würde beispielsweise das Bewusstsein als emergentes Phänomen ausschliessen.

Charakteristika der Emergenz: Bei der Rede von Emergenz muss klar gemacht werden, welche Charakteristika diesem Begriff zukommen müssen. Hoyningen-Huene sieht zwei Aspekte: Unvorhersehbarkeit und Makrodetermination.

Bezüglich der *Unvorhersehbarkeit* muss weiter differenziert werden. So gilt es zu unterscheiden, ob *Mikrodetermination* vorhanden ist oder nicht. Mikrodetermination bedeutet, dass der Zustand des Ganzen restlos durch den Zustand der Teile determiniert ist. Im stärksten Fall gäbe es keine Mikrodetermination, d.h. der Zustand der Teile ist irrelevant für den Zustand des Ganzen. Ein bestimmter Mikrozustand ist dann mit mehreren Makrozuständen des Systems vereinbar.

Weiter könnte die Mikrodetermination nur probabilistischer Natur sein. Vom Zustand der Teile lassen sich in diesem Fall nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über den Zustand des Gesamtsystems machen. Dieser Fall könnte in Quantensystemen realisiert sein.

In einem nächsten Fall könnte vorhandene Mikrodetermination zu Unvorhersehbarkeit führen. So kann der determinative Zusammenhang zwischen den beiden Ebenen prinzipiell unwissbar oder erst post facto erkennbar sein.⁸¹ In diesem Zusammenhang sind auch faktische Grenzen der Prognosemöglichkeiten zu nennen, wie sie etwa im Fall des deterministischen Chaos auftreten.

Bei der *Makrodetermination* stellen sich eine Reihe sehr schwerwiegender Probleme. Die Behauptung besagt, dass das Emergente kausal auf die Teile des Systems wirken kann. Dabei ist aber nicht klar, was mit den Gesetzen der unteren Stufe geschieht. Manche Autoren scheinen annehmen zu wollen, dass die

⁸⁰ Vergleiche Nagel (1979).

⁸¹ Vergleiche dazu Pap (1952).

Naturgesetze der unteren Stufe verletzt werden. Dies ist eine sehr starke Behauptung, zu welcher es bisher keine plausiblen Beispiele gibt.

Was ist emergent?: Bezüglich der Frage, welche Entitäten als emergent zu betrachten sind, existieren verschiedene Ansichten. Oft ist die Rede von emergenten Eigenschaften (*deskriptive Emergenz*), welche meistens dem System zukommen. Solche Eigenschaften sind im Verhältnis zur unteren Ebene nicht nur neu, sondern geradezu bedeutungslos auf dieser.⁸² Manchmal wird auch von emergenten Eigenschaften der Teile gesprochen, die in einem Ganzen vereint sind. Als Beispiel dient etwa das Verhalten eines Tieres im Sozialverband, das sich vom Verhalten des einzelnen Tieres unterscheidet.

Ein weiterer Vorschlag betrifft emergente Gesetze, die erst auf dem höheren Niveau gelten und nicht auf die Gesetze des unteren Niveaus reduziert werden können. Eine solche *nomologische Emergenz* kann eine direkte Folge von deskriptiver Emergenz sein, d.h. die Gesetze betreffen emergente Eigenschaften, so dass sie trivialerweise nicht aus den Gesetzen der unteren Stufe folgen können. Manche Autoren sprechen aber auch von nomologischer Emergenz, ohne dass deskriptive Emergenz gegeben ist.

Schliesslich werden auch *Makrobedingungen* als emergent bezeichnet. Eine solche Makrobedingung ist beispielsweise die Organisation eines Lebewesens.

Gegenbegriff: Je nach der Art und Weise, wie „Emergenz“ verwendet wird, bieten sich eine Reihe von Gegenbegriffen an. Klassisch spricht man vom Begriffspaar „emergent“ versus „resultant“, wenn von deskriptiver Emergenz die Rede ist. Weiter kann man einen Reduktionsbegriff (meist epistemischer oder explanatorischer Reduktionismus) als Gegensatz zu Emergenz verwenden, wenn man von einer *starken Emergenz* ausgeht. Diese besagt, dass emergente Eigenschaften bzw. Gesetze grundsätzlich nicht aus den Eigenschaften bzw. Gesetzen der unteren Stufe hergeleitet werden können. In diesem Sinn lässt sich auch behaupten, dass die emergenten Eigenschaften bzw. Gesetze *irreduzibel* sind. *Irreduzibilität* geht also in unserer Terminologie einher mit starker Emergenz. In der Literatur wird aber auch ein *schwacher Emergenzbegriff* verwendet, der Reduktion nicht ausschliesst.

Anwendungsbereich: Der Emergenzbegriff führt zu einer Hierarchisierung der Wirklichkeit. Die vorgeschlagene Anzahl solcher Stufen variiert zwischen vier (physikalisch – chemisch – biologisch – mental) und etwa 12 (subelementare Teilchen – Elementarteilchen – Atome – Moleküle – Flüssigkeiten und Kristalle – Organellen – Zellen und Einzeller – Populationen von Einzellern – Organe – Vielzeller – Populationen von Vielzellern – Ökosysteme). Hier zeigt sich auch ein Bezug zum Begriff der Komplexität, d.h. verschiedene Emergenzebenen werden mit verschiedenen Komplexitätsstufen in Verbindung gebracht.⁸³

Theorierelativ oder absolut: Die Unterscheidung von Emergenz als theorierelativer bzw. absoluter Begriff geht auf eine Untersuchung von *Paul Oppenheim* und *Hilary Putnam* zurück, wie Hoyningen-Huene darlegt. Theorierelative bzw. *epistemische Emergenz* ist nur bezüglich einer bestimmten Theorie gegeben. Als Beispiel kann die Superfluidität von Helium nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt dienen. Dieser Effekt ist klassisch nicht erklärbar, d.h. bezüglich der klassischen Hydrodynamik ist Superfluidität eine emergente Eigenschaft. Nimmt man aber die Quantentheorie zu Hilfe, lässt sich die Möglichkeit der Superfluidität ableiten, und der Effekt ist nicht emergent. Epistemische Emergenz besagt also lediglich, dass bestimmte Theorien zur Erklärung bestimmter Phänomene nicht ausreichen, eine recht triviale Aussage also. Emergentisten müssen demnach einen absoluten bzw. *ontologischen Emergenzbegriff* vertreten, wollen sie dieser Trivialität ausweichen. Das Emergente darf also trotz der vollständigen theoretischen Erfassung der unteren Ebene prinzipiell nicht herleitbar sein. Schliesslich stellt sich ein weiteres Problem: Reduktionisten können im Angesicht vermeintlicher ontologischer Emergenz immer die Ansicht vertreten, die vollständige Theorie der unteren Stufe sei eben noch nicht gefunden worden, d.h.

⁸² Vergleiche dazu Davies (1989), S. 103.

⁸³ Als Beispiel siehe etwa Çambel (1993), S. 30-33.

behaupten, man sei lediglich mit epistemischer Emergenz konfrontiert. Diese Strategie ist natürlich nicht in jedem Fall glaubhaft.

Verständlichkeit: Als letztes grundlegendes Problem stellt sich die Frage, ob eine ontologische Emergenz überhaupt eine verständliche Position ist. Nehmen wir an, es gäbe tatsächlich emergente Phänomene in dem Sinn, dass man sie trotz der vollständigen Kenntnis der unteren Stufe nicht herleiten bzw. verstehen kann. Inwieweit ist diese Unerklärbarkeit aber *selbst* eine verständliche Position? Im Falle des Geruchs von Schwefelwasserstoff lässt sich das erläutern. Dort kann man verstehen, warum man aus dem Geruch der Grundsubstanzen nicht auf jenen von H_2S schliessen kann. Geruch ist eine sekundäre Eigenschaft des Gases, d.h. H_2S ist nur durch die Wechselwirkung mit dem Riechenden als übelriechend erkennbar. In der Geruchswirkung der Substanz sind also Eigenschaften des wahrnehmenden Organismus involviert. In anderen Fällen erscheint das Unerklärbare des Emergenten unverständlich. Manche Emergentisten plädieren deshalb dafür, das Emergente sei als Naturtatsache hinzunehmen.

Ein weiterer schwer zu verstehender Aspekt ist das Verhältnis der Makrodetermination zur Kausalität der unteren Stufe. Ist eine solche gegeben und wirkt weiter kein Einfluss von aussen, ist schwer verständlich, was denn die Ursache von Makrodetermination sein soll. Weiter stellt sich die Frage nach dem Angriffspunkt der Makrodetermination auf der unteren Stufe, ohne dass deren kausalen Gesetze verletzt werden. Emergentisten müssen also zeigen, wie überhaupt Makrodetermination konsistent zu denken ist.

Die Ausführungen Hoyningen-Huenes machen deutlich, wie wir weiter vorgehen müssen. Es ist zu klären, was innerhalb der Komplexitätsforschung als emergent angesehen wird. Daraus lässt sich auch folgern, mit welchem Begriff von Emergenz operiert wird und inwiefern sich die oben angesprochenen Probleme stellen. Dies wird in Teil IV, Abschnitt 2.1 geschehen.

4. Seitenaspekte der Komplexität

Es gibt eine ganze Reihe von Bereichen, in welchen Komplexität als eigenständiger Begriff erwähnt wird, die aber nicht Hauptgegenstand der vorliegenden Arbeit sind. Auf diese soll hier hingewiesen werden, wobei wir die einzelnen Themen nicht umfassend abdecken. In allen drei Aspekten ist die Rede von intuitiver Komplexität. Es wird deutlich werden, dass jeder Versuch zu einer Präzisierung des Komplexitätsbegriffs in diesen zu Problemen führt. Insofern sind die hier angesprochenen Seitenaspekte natürlich nicht unabhängig von den Hauptproblemen, die in der Arbeit besprochen werden. Entsprechende Bezüge werden wir markieren.

4.1. Komplexität als Klassifikationskriterium wissenschaftlicher Disziplinen

Die Naturwissenschaft ist in verschiedene Disziplinen gegliedert, welche sich mit unterschiedlichen empirischen Bezugfeldern beschäftigen. Um diese offensichtliche Tatsache zu erklären, wird gerne darauf hingewiesen, dass diese Bezugfelder von unterschiedlicher Komplexität sind. Man schichtet die empirische Welt gemäss ihrer Komplexität und ordnet diesen die entsprechende Wissenschaft zu: Die Physik hat sich mit Atomen und subatomaren Teilchen zu beschäftigen, die Chemie mit Molekülen, die Biologie mit Lebewesen usw.⁸⁴ Unter Verwendung der intuitiven Komplexität erscheint diese Klassierung gerechtfertigt.

W. Ross Ashby versteht in diesem Zusammenhang unter Komplexität Heterogenität in den Teilen und Reichtum der Wechselwirkungen zwischen diesen. Aus diesem Grund ist in komplexen Systemen (d.h. in

⁸⁴ Als Beispiel siehe West et al. (1987).

Systemen der komplexeren Ebene) die Informationsmenge, die zwischen System und Beobachter oder zwischen den Systemteilen selbst fließt, viel grösser als bei einfachen Systemen.⁸⁵

Michael Scriven wiederum etabliert unter Verwendung von Komplexität eine Unterscheidung zwischen Natur- und Sozialwissenschaften bzw. Psychologie.⁸⁶ Er geht davon aus, dass die einfachsten Phänomene in den Sozialwissenschaften bzw. in der Psychologie komplexer sind als in den Naturwissenschaften. Dies hat drei Gründe: „1. The basic generalizations are more complex, in the sense that more standing conditions must be specified for a functional relationship of comparable simplicity, and consequently more variables must be measured in obtaining the basic data to which the basic generalizations refer. 2. The useful concepts, i.e., those occurring in observation-statements and theory, include many from physics and mathematics as a proper subset. 3. The ordinary procedures for explaining behaviour that are embedded in our everyday language contain a considerable proportion of the low-level laws obtained simply as a result of long experience; thus, some of the cream has been skimmed from the subject in a way not possible in, e.g., spectrochemistry.“⁸⁷ Wir kommentieren Scrivens Ansatz nicht weiter. Kritisiert wird dieser etwa von *Lee McIntyre*⁸⁸.

Ausgehend von diesen Positionen wird weiter argumentiert, dass es auf der komplexeren Ebene neue Methoden braucht, um die dortigen Phänomene zu erklären. Die Schichtung der empirischen Welt in Komplexitätsebenen hat also einen Bezug zum Reduktionismus-Emergenz-Problem. Reduktionisten und Emergentisten sehen die Schichtung der Welt bezüglich verschiedener Komplexitätsstufen natürlich unterschiedlich. Erstere gehen von der Annahme aus, die Welt werde von verhältnismässig wenigen einfachen Grundbausteinen aufgebaut (ontologischer Reduktionismus). Die verschiedenen Komplexitätsebenen sind dann ein Abbild der komplexer werdenden Beziehungen zwischen diesen Teilen. Dabei wird weiter angenommen, dass die Teile letztlich durch die Gesetze der untersten Stufe erfasst werden und dass bei den verschiedenen Komplexitätsstufen keine neuen Gesetze auftreten. Komplexität erhält dabei einen theorierelativen Aspekt: Ein Organismus unter dem Blickwinkel der Elementarteilchenphysik erscheint komplexer als unter jenem der Morphologie. Der Komplexitätsunterschied ist dabei rein intuitiver Natur, und Emergenzkomplexität tritt natürlich nicht auf.

Emergentisten hingegen bringen diese Schichtung mit dem Auftreten emergenter Eigenschaften (oder Gesetze) in Beziehung. Ein Komplexitätsunterschied zwischen einer Entität der höheren Stufe und einer solchen der unteren Stufe ist also nicht rein eine Folge davon, dass mehr elementare Konstituenten verzwickter miteinander verknüpft sind. Es tritt Emergenzkomplexität auf.

Unabhängig von diesen Fragen ist die Unterteilung der Welt in verschiedene Komplexitätsebenen – und damit einhergehend die entsprechende Klassifizierung wissenschaftlicher Disziplinen – aber gar nicht so plausibel, wie sie zuerst erscheint. So sieht beispielsweise *Ernest Nagel* Probleme: „(...) It is by no means certain that they [the social phenomena] are in general more complex than physical and biological phenomena.“⁸⁹

Ausgehend von diesem Zweifel untersucht *Lee C. McIntyre* das „argument from complexity“, welches die Unmöglichkeit der Etablierung von Gesetzen in den Sozialwissenschaften belegen soll. Das Argument behauptet, aufgrund der Vielfalt der Variablen in den Sozialwissenschaften sei es nicht möglich, all diese so zu erfassen, dass eine Formulierung von Gesetzen erlaubt sei. Dieses Argument vergisst gemäss *McIntyre*, dass Komplexität durch den Beobachtungskontext geschaffen wird: „social phenomena are not complex *as such*, but only as *described and defined* at a given level of inquiry.“⁹⁰ Damit spricht er auf die Beobachter- und Theorierelativität des Komplexitätsbegriffs an. Es ist demnach nicht ausgeschlossen, dass vermeintlich komplexe Phänomene in einem theoretischen Rahmen untersucht werden können, welche diese einfach erscheinen lassen. Innerhalb dieses Rahmens lassen sich durchaus Gesetze finden.

⁸⁵ Ashby (1958b), S. 96. Auf dieser Beobachtung beruht auch Ashbys Warnung, Modelle von Physik und Chemie für das Studium komplexer Systeme einfach zu übernehmen.

⁸⁶ Scriven (1956).

⁸⁷ Scriven (1956), S. 332.

⁸⁸ McIntyre (1993).

⁸⁹ Nagel (1979), S. 505.

⁹⁰ McIntyre (1993), S. 210.

Komplexität setzt zwar sicher praktische Grenzen bezüglich der Suche nach Gesetzen, diese fallen aber nicht mit den Grenzen zwischen verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen zusammen, schliesst McIntyre seine Ausführungen.⁹¹

4.2. Wissenschaft als Projekt der Komplexitätsreduktion

Ähnlich plausibel wie die Schichtung der Welt gemäss verschiedenen Komplexitätsstufen erscheint die Idee, Wissenschaft reduziere die Komplexität der Welt.⁹² Die Suche nach Einfachheit, nach verallgemeinernden Grundgesetzen hat in der Tat das wissenschaftliche Streben der Menschen geleitet, und man ist sich weitgehend einig, dass die Welt – in einer modernen Terminologie gesprochen – algorithmisch kompressibel ist.⁹³

Einhergehend mit dieser „Kompression“ wird hingegen eine Zunahme der Komplexität der Wissenschaft behauptet.⁹⁴ Diese Aussage ist nicht einfach zu verstehen, denn bei der „Komplexität der Welt“ sprechen wir von empirischen Aspekten, bei der „Komplexität der Wissenschaft“ hingegen von Theoriensystemen.⁹⁵ Peter Caws hat auf diese Problematik hingewiesen und versucht, unter Einführung von vier Arten der Komplexität (bzw. durch die Angabe vier verschiedener Bezugfelder) diese genauer zu explizieren.⁹⁶ Er unterscheidet zwischen logischer Komplexität (von Theorien), phänomenologischer Komplexität (von Sinneswahrnehmungen bei Experimenten), physikalischer Komplexität (von Gegenständen der empirischen Welt) und mechanischer Komplexität (diese betrifft den sensorischen Apparat des Menschen). Für die genaue Begründung dieser Unterscheidung verweisen wir auf die Originalpublikation. In seinem Begriffsrahmen kommt er zum Schluss: „The development of science may be regarded as progressing in two ways: on one hand there is an increase in logical complexity, and on the other hand there is a decrease in the complexity of the world which the theory is trying to explain.“⁹⁷ Wir kommentieren die Ansichten Caws' hier nicht abschliessend. Sie scheint jedoch mit der Absicht zu kollidieren, die Welt mit einer möglichst einfachen Basistheorie zu erklären. Hier kommen wir erneut in das Spannungsfeld „komplexe Welt - einfache Theorie“. Gerade die Suche nach einer einfachen Basistheorie führt unserer Ansicht nach zum „Problem Komplexität“ im heute verstandenen Sinn (vgl. Teil II, Abschnitt 1.1). Das Problem liegt im Terminus „komplexe Welt“ (oder bei Caws „physikalische Komplexität“) verborgen. Man muss genau explizieren, was man damit meint. Wir können das Problem an dieser Stelle aber nicht weiter untersuchen.

Ein wichtiges, oben schon angesprochenes Problem bleibt gerade unter Berücksichtigung dieses Aspekts offen. Betrachtet man die Ebene der fundamentalen Gesetze der Physik einerseits und die empirische Welt andererseits, so stellt sich folgende Frage: Warum ist die Welt so offensichtlich komplex, wenn die Physik von verhältnismässig wenig Grundbausteinen und wenigen diese betreffenden Grundgesetzen ausgeht? Oder anders formuliert: Kann man allein aus der Kenntnis der fundamentalen Theorie der Physik überhaupt ahnen, dass eine Welt wie unsere entstehen könnte?⁹⁸ Dabei geht es nicht nur um den Kosmos im Grossen (d.h. die Entstehung von Sternen, Galaxien, Galaxienhaufen), sondern auch um

⁹¹ McIntyre (1993), S. 223.

⁹² Fogelman Soulié (1991) hält etwa fest: „L'histoire de la physique peut être vue comme une lutte constante pour éliminer, voir éviter la complexité des phénomènes naturels.“, S. 125.

⁹³ Davies (1990), S. 63. Es liesse sich sicher noch einiges dazu sagen, wie sich die Vorstellung des „einfachen Aufbaus der Natur“ im Laufe der Zeit gewandelt hat. Die ganze Debatte hängt übrigens einmal mehr mit dem Emergenzproblem zusammen. Die „einfache Welt“ eines Reduktionisten ist ganz anders organisiert als jene des Emergentisten. Auf diesen Aspekt wollen wir hier aber nicht weiter eingehen.

⁹⁴ So etwa ausgeführt von Yildirim (1970), S. 106.

⁹⁵ Man kann die „Komplexität der Wissenschaft“ auch anders verstehen, z.B. in einem wissenschaftssoziologischen Sinn. Darum geht es bei dieser Betrachtung hingegen nicht.

⁹⁶ Caws (1963).

⁹⁷ Caws (1963), S. 161.

⁹⁸ Einige Wissenschaftler fordern in diesem Zusammenhang ein „anthropisches Prinzip“. In seiner starken Form behauptet es, dass sich aus der Theorie zur Entstehung des Kosmos notwendig ableiten lassen muss, dass es dereinst Beobachter des Kosmos geben wird. Das schwache anthropische Prinzip hingegen ist an die Einsicht geknüpft, dass die Existenz des Menschen an einige

die Genese einer Evolution biologischer Systeme.⁹⁹ Poetisch gesprochen: Wo ist das Leben in den Grundgleichungen kondensiert? Diese ganz und gar nicht trivialen Probleme haben die Entstehung der Komplexitätsforschung entscheidend mitmotiviert. Die Frage nach der Entstehung der komplexen Welt ist gleichsam eine Leitfrage dieser neuen Forschungsrichtung.

4.3. Das Management einer komplexen Welt

Unsere Welt (bzw. unsere Gesellschaft) wird immer komplexer. Diese Standardvoraussetzung so mancher sozialwissenschaftlicher Diskussionen berührt einen weiteren Aspekt der Komplexität bzw. der Komplexitätsforschung. Zwei Problemkreise stehen dabei im Mittelpunkt. Zum ersten wird nach Grenzen des Menschen bezüglich des Umgangs mit Komplexität gefragt.¹⁰⁰ Zum zweiten bietet sich die Komplexitätswissenschaft als neue Leitdisziplin für Komplexitäts-Management an.¹⁰¹ Gerade der zweite Punkt ist ein wichtiges propagandistisches Element der Popularisierung der Komplexitätsforschung.

Generell geht man davon aus, dass die menschlichen Fähigkeiten für den Umgang mit (intuitiver) Komplexität beschränkt sind. Entsprechende Untersuchungen finden sich vor allem in der Psychologie, wobei für diese Arbeit in diesem Bereich kaum Recherchen getätigt worden sind. *Dietrich Dörner* ist ein bekannter Vertreter jener, die sich mit solchen Fragen beschäftigen. Mittels Computersimulationen bestimmter Realitätsbereiche – indem Versuchspersonen etwa als Bürgermeister die Geschicke einer Stadt zu lenken haben – versucht er, solche Grenzen offenzulegen und Gründe dafür zu finden (für die detaillierte Darstellung verweisen wir auf die Originalpublikation).¹⁰²

Diese sicher vorhandenen Probleme des Komplexitäts-Managements haben wissenschaftliche Disziplinen dazu motiviert, sich auch explizit dem Problem zu stellen, d.h. Theorien für einen effektiveren Umgang mit komplexen Systemen zu entwickeln.¹⁰³ Für die Systemtheorie ist dieser Aspekt ein wesentliches Element in deren Forschungsprogramm, wie noch deutlich werden wird. Schliesslich will auch die Komplexitätsforschung Beiträge zum Problem des Komplexitäts-Managements bieten.¹⁰⁴ Dies ist gleichsam eine Antwort auf den zunehmenden Anspruch der Gesellschaft, Wissenschaft solle Lösungen für anstehende Probleme liefern, wie *Frank Mussmann* ausführt.¹⁰⁵ Auf konkrete Vorschläge, wie ein solches Komplexitäts-Management vonstatten gehen soll, wollen wir hier nicht weiter eingehen. Dies auch deshalb, weil allgemeine Rezepte kaum zu erwarten sind. Die bisher einzige globale Aussage diesbezüglich ist wohl, dass in jedem komplexen System Grenzen der Einflussnahme bestehen, einhergehend mit Grenzen der Prognostizierbarkeit von dessen Verhalten.

notwendige Bedingungen geknüpft ist, die für die Struktur des sichtbaren Universums in der Vergangenheit und ebenso in der Zukunft gegeben sein müssen. Diese Einschränkung der Möglichkeiten, wie das Universum sein könnte, gilt es zu berücksichtigen. Vergleiche dazu Barrow (1991), S. 210f.

⁹⁹ In diesem Zusammenhang formuliert Henri Atlan (1991) folgendes Problem: Warum sind gerade jene Aminosäuren entstanden, welche zu den Lebenserscheinungen führen? Angenommen, ein Protein bestehe aus 100 Aminosäuren. Bei 20 verschiedenen Aminosäuren gäbe dies 20^{100} verschiedene Möglichkeiten, ein Protein zu bilden. Die Natur hatte bisher (d.h. seit dem Urknall gemäss dem derzeit vorliegenden kosmologischen Modell) aber nur etwa $4,7 \times 10^{20}$ Sekunden Zeit, diese alle durchzuprobieren. Welcher Mechanismus reduziert diese unglaubliche Anzahl von Möglichkeiten dergestalt, dass funktionale Einheiten entstehen konnten? (S. 10f).

¹⁰⁰ Dörner (1993). Siehe auch Kanitscheider (1993), S. 60; Brunner et al. (1971): „Furthermore, few political scientists would deny the proposition that we as human beings have only a limited capacity to deal with complex systems as wholes.“, S. 85.

¹⁰¹ Entsprechend äussern sich etwa Casti (1992), S. 11 oder Mainzer (1994), Introduction.

¹⁰² Dörner (1993), S. 131-137.

¹⁰³ Beispielsweise Baldwin (1975), Brunner et al. (1971), Gottinger (1983).

¹⁰⁴ Ein Beispiel liefern Allen et al. (1987), welche die Fischereiwirtschaft mit einem nichtlinearen dynamischen Modell simulieren. Das von ihnen verwendete Modell zeigt auf, dass menschliche Eingriffe relativ kleine Fluktuationen in der Fischpopulation zu grossen Veränderungen aufschaukeln können. Verhalten sich Fischer gemäss einer kurzfristigen Nutzenoptimierung, können die Fangquoten aufgrund dieses Effektes noch weit rapider sinken, als gemeinhin angenommen wird. Betrachtet man die grossen Probleme der heutigen Fischerei-Industrie, neue und ertragreiche Fischgründe zu finden, gewinnt dieses Modell sicher an Plausibilität.

¹⁰⁵ Mussmann (1995), S. 56/57.

Ein Aspekt soll schliesslich noch kurz angesprochen werden. Das Vorhandensein von Grenzen der Einflussnahme in komplexen Systemen hat auch Auswirkungen auf das Konzept der Verantwortlichkeit in der Ethik.¹⁰⁶ Dabei geht es natürlich nicht um eine Revision des Verantwortungsbegriffs, sondern lediglich um eine Einschränkung seines Anwendungsbereichs. Die Forderung nach einer „neuen Ethik“ im Angesicht komplexer Systeme – wie dies etwa *Klaus Mainzer* wünscht¹⁰⁷ – ist sicher verfehlt.

¹⁰⁶ Siehe dazu beispielsweise Lübbe (1994).

¹⁰⁷ Mainzer (1994), S. 13, 289-295.

Teil II

Wurzeln der Komplexitätsforschung

Die Komplexitätswissenschaft ist nicht einfach vom Himmel gefallen, sondern hat ihre Geschichte. Aufgrund ihrer zunehmenden Popularisierung haben sich in jüngster Zeit verschiedene Autoren mit ihren historischen Wurzeln befasst, namentlich erwähnt seien *Reiner Hedrich*, *Frank Mussmann*, *Rainer Paslak* und *M. Mitchell Waldrop*. Unter Aufzeigen dieser Entwicklung versuchen wir in diesem Teil eine erste Charakterisierung dieser Wissenschaft. Wir werden dabei die einzelnen Forschungsgebiete und Disziplinen, die zur heutigen Komplexitätsforschung geführt haben, nicht umfassend darstellen. Dies wurde an anderer Stelle genügend getan, so dass wir für Interessenten auf die Originalarbeiten verweisen.

Weiter wird sich zeigen, dass verschiedene Disziplinen zur Komplexitätswissenschaft zusammengefasst werden, die sich in ihren Forschungsgebieten unterscheiden. Aus diesem Grund sprechen manche Autoren lieber von Komplexitätswissenschaften.¹⁰⁸ Wir werden uns diesem Sprachgebrauch aber nicht anschließen. Wir werden im weiteren vor allem die Entwicklung in den USA untersuchen und uns dabei auf das Santa-Fe-Institut konzentrieren. An diesem lassen sich wesentliche Aspekte des neuen Forschungsgebietes zeigen. Auch ein wichtiges Paper von *Warren Weaver*, das in den 40er Jahren dieses Jahrhunderts geschrieben wurde, soll vorgestellt werden. Programmatisch und exemplarisch zugleich definiert es Forschungsbereich, Methoden und Ziele der Komplexitätswissenschaft. Teil II endet mit der Überlegung, inwieweit man beim Aufkommen dieser neuen Wissenschaft von einem Paradigmenwechsel sprechen kann.

1. Genese der Komplexitätsforschung

Im Folgenden werden wir die Entwicklung der Komplexitätsforschung in unserem Jahrhundert vorstellen. Unsere Darstellung richtet sich nach der Arbeit von *Reiner Hedrich*,¹⁰⁹ ergänzt durch Recherchen weiterer Autoren.¹¹⁰

1.1. Komplexität als Problem der modernen Naturwissenschaft

Die Problematisierung von Komplexität im Sinn der Komplexitätsforschung ist ein Kind der modernen Naturwissenschaft. Die Suche und Ausformulierung einer Theorie der „untersten Stufe“ (Teilchenphysik) hat zur Frage geführt, in welchem Verhältnis „komplexe Entitäten“ (so etwa Lebewesen) zu dieser untersten Stufe stehen. Dass ein Tier als komplexes Phänomen verstanden werden kann, hängt eng damit zusammen, dass man eine Vorstellung von dessen molekularbiologischen Feinbau hat. Weiter ist die Frage nach der „Entstehung von Komplexität“ erst dann aktuell geworden, als die Theorie der untersten Stufe einigermaßen ausformuliert werden konnte. Dies geschah im wesentlichen erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Die Komplexitätsforschung ist also ein Produkt der wissenschaftlichen Entwicklung

¹⁰⁸ Cheetham (1993), S. 301.

¹⁰⁹ Hedrich (1994).

¹¹⁰ Mussmann (1995) liefert eine mit Hedrich vergleichbare Strukturierung (siehe Abschnitt 5.5). Paslack (1991) zählt bezüglich der Selbstorganisationsforschung (in seinem Sinn mit unserer Komplexitätsforschung weitgehend identisch) sieben Konzepte auf, die wir mit einer Ausnahme ebenfalls behandeln: Die Theorie dissipativer Strukturen (Prigogine), die Synergetik (Haken), die Theorie autokatalytischer Hyperzyklen (Eigen), diverse Chaostheorien (u.a. Lorenz, Mandelbrot), systemtheoretisch-kybernetische Ansätze (Von Foerster), autopoetische Ansätze (Maturana) und Theorien „elastischer“ Ökosysteme. Letzterer Punkt passt unseres Erachtens nicht in unsere Systematik.

der letzten hundert Jahre. Sie versteht sich gewissermassen als die „nichtreduktionistische Antwort“ auf die Erklärung der Welt mittels Teilchenphysik, wie wir noch sehen werden.

Auch Versuche zu einer Quantifizierung von Komplexität sind erst in diesem Jahrhundert zu finden.¹¹¹ Als diesbezüglich einer der frühesten Ansätze gilt eine Untersuchung von Wrinch und Jeffreys im Jahre 1921. Ausgehend von der Annahme, jedes physikalische Gesetz lasse sich in Form einer Differentialgleichung mit endlicher Ordnung (Ordnung: Zahl der höchsten vorkommenden Ableitung), mit endlichem Grad (Grad: Zahl der höchsten vorkommenden Potenz) und ganzzahligen Koeffizienten formulieren, definierten sie die Komplexität einer solchen Gleichung als Summe der Ordnung, des Grades und des Absolutwertes der Koeffizienten.¹¹² In der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts folgten dann zahlreiche weitere Versuche zu einer Präzisierung des Komplexitätsbegriffs (vgl. Teil III).

1.2. Entwicklung einer Theorie der dynamischen Systeme – Mathematik als Ausgangspunkt

Die ersten Impulse in Richtung einer modernen Komplexitätsforschung kommen aus der Mathematik und gründen im Zweifel am starken Determinismus. Dieser wurde gegen Ende des letzten Jahrhunderts vor allem vom französischen Mathematiker *Jules Henri Poincaré* formuliert.

Determinismus: Als „deterministisch“ kann man Gesetze, Theorien oder Systeme bezeichnen. In unserem Fall sind deterministische Systeme relevant. Ein System heisst deterministisch, wenn dessen Dynamik durch eine Differentialgleichung gegeben ist, d.h. jeder Zustand zu einer beliebigen Zeit t eindeutig bestimmbar ist. Im Fall eines klassischen Systems ist dies gleichbedeutend mit der Geltung des Kausalprinzips, d.h. Ursachen haben eindeutig bestimmbare Wirkungen. Der starke Determinismus bzw. die starke Kausalität behauptet, dass ähnliche Ursachen ähnliche Wirkungen haben. Die Geltung des starken Determinismus ist für die Prognostizierbarkeit der Dynamik von Systemen entscheidend, da sich die Genauigkeit von Messwerten nur auf ein endliches Intervall einschränken lässt.¹¹³

Die Zweifel entzündeten sich im schon lange schwelenden Problem der Stabilität des Sonnensystems, das mechanisch als Vielkörperproblem formuliert wurde. Im Jahr 1885 liess König Olaf II. von Schweden einen Preis zu dessen Klärung aussetzen. Diesen gewann schliesslich Poincaré, der mit seiner Arbeit gleichzeitig den Grundstein für die Theorie dynamischer Systeme legte. Wesentliches Element seiner Arbeit ist dabei, dass das Stabilitätsproblem für Dreikörperprobleme (und für $n > 3$ sowieso) in der Tat sehr schwierig ist, da die Bewegung sensitiv von minimalen Unterschieden in den Anfangsbedingungen abhängt. Dieser Sachverhalt erhielt später unter dem Namen „Schmetterlingseffekt“ Berühmtheit.¹¹⁴ Poincaré entwickelte Methoden im Umgang mit solchen Systemen, die noch heute Geltung haben.¹¹⁵

Dynamisches System: Im Folgenden geben wir nur eine kurze Charakterisierung der Theorie dynamischer Systeme. Dabei werden primär Begriffe eingeführt, die im Laufe der Arbeit wieder auftauchen werden, vor allem im Zusammenhang mit dem deterministischen Chaos. Präzise mathematische Definitionen können an dieser Stelle aber nicht gegeben werden. Für eine umfassende Einführung siehe vor allem Arrowsmith et al. (1994) und Eubank et al. (1990).

Ein System heisst dynamisch, falls sich sein Zustand mit der Zeit t verändert. Man unterscheidet Systeme mit *diskreter* Zeit ($t \in \mathbb{Z}$) von solchen mit *kontinuierlicher* Zeit ($t \in \mathbb{R}$). Im Falle eines konti-

¹¹¹ Entsprechend äussert sich Hedrich (1994), der den Schwerpunkt der Komplexitätsforschung zeitlich in die letzten dreissig Jahre einordnet; S. 2.

¹¹² Aus Sahal (1976), S. 6.

¹¹³ Die Ausführungen beruhen u.a. auf von Kutschera (1981), S. 279f und Lambert et al. (1991), S. 242f.

¹¹⁴ Populär ist dabei meist die Rede von einem Schmetterling, etwa in Südamerika lebend, der mit seinem Flügelschlag einen Wirbelsturm in Chicago auslösen könne (z.B. in Lewin (1993), S. 23). Damit wird die Metapher aber falsch verstanden. Vielmehr können zwei Wettersysteme, deren Anfangswerte sich nur minim voneinander unterscheiden, sich im Laufe der Zeit ganz unterschiedlich entwickeln. Poetisch gesprochen könnte der Unterschied von einem Flügelschlag eines Schmetterlings verursacht worden sein. Die Metapher ist also epistemisch zu verstehen, nicht kausal.

¹¹⁵ So beispielsweise der Poincaré-Schnitt, vgl. etwa Schuster (1989), S. 14f.

nuierlichen Zeitparameters wird das System in Form einer Differentialgleichung beschrieben, die Werte in einem (meist euklidischen) *Phasenraum* annimmt. Ein Fluss oder ein dynamisches System auf ein Gebiet $G \in \mathbb{R}^n$ ist eine stetige Abbildung $\phi: \mathbb{R} \times G \rightarrow G$ mit $\phi(0, x) = x \quad \forall x \in G$ und $\phi[s, \phi(t, x)] = \phi(s+t, x) \quad \forall x \in G, \forall s, t \in \mathbb{R}$. Eine *Flusslinie* eines Punktes $x \in G$ ist die durch den Fluss gegebene Bewegungskurve von x . Die Flusslinien bilden das *Phasenportrait* der Differentialgleichung. Bleibt ein festes Phasenraumvolumen im Laufe der Zeit konstant, spricht man von einem *konservativen* dynamischen System, ansonsten von einem *dissipativen* System. Eine Teilmenge $F \subset G$ kann im Laufe von t invariant sein (F kann auch ein einzelner Punkt sein, d.h. ein Fixpunkt). Diese Invarianten können sich als *Attraktoren* erweisen, d.h. Flusslinien aus Punkten der Umgebung von F nähern sich für wachsendes t beliebig nahe dem Attraktor. Mögliche Attraktoren sind Fixpunkte, Grenzyklen, ein Torus oder sogenannte seltsame Attraktoren, die zugleich auch Fraktale sind. Mittels solcher Attraktoren lassen sich dynamische Systeme klassifizieren. Durch Variation von Parametern des Flusses lassen sich qualitative Änderungen dergestalt erreichen, dass bestimmte Attraktoren verschwinden oder ihre Qualität ändern (z.B. wenn der Attraktor instabil wird). In diesem Fall spricht man von einer *Bifurkation*. Die Stabilität eines dynamischen Systems lässt sich mit Hilfe des *Liapunov-Exponenten* untersuchen. Dieser ist ein Mass dafür, wie sich benachbarte Flusslinien bei wachsendem t voneinander entfernen.

Weiter ist in diesem Zusammenhang *Aleksandr M. Liapunov* zu nennen. Die Stabilitätsanalysen des russischen Mathematikers haben die Theorie dynamischer Systeme entscheidend weitergebracht. Er gab schliesslich dem Liapunov-Exponenten seinen Namen.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass der Ursprung der modernen Komplexitätsforschung im mathematischen Bereich liegt, obwohl die Fragestellungen physikalisch motiviert wurden. Durch die Schaffung einer Theorie dynamischer Systeme wurde eine wichtige mathematische Voraussetzung für die Komplexitätswissenschaft geschaffen. Das Konzept der Selbstorganisation spielte zu jener Zeit noch keine Rolle.

Obwohl zu Beginn des Jahrhunderts damit wesentliche Grundlagen geschaffen wurden, fristete die Theorie dynamischer Systeme bald ein Schattendasein. Hauptgrund war das Nichtvorhandensein von Rechenkapazitäten. Die mathematischen Probleme dieser Theorie waren meist furchtbar kompliziert und mit Papier und Bleistift kaum zu bewältigen. An analytische Lösungen war meist nicht zu denken.

Poincarés Arbeiten wurden in erster Linie vom US-amerikanischen Mathematiker *George David Birkhoff* fortgeführt. In jener Zeit verabschiedete sich auch die Physik nahezu vollständig von den Fragestellungen, welche die Theorie dynamischer Systeme motivierten. Die Physiker waren mit der Entwicklung und Ausformulierung der Relativitäts- und Quantentheorie viel zu beschäftigt. Dies obwohl physikalische Probleme, wo die Theorie dynamischer Systeme Anwendung finden konnte, durchaus vorhanden waren – etwa das Problem der Turbulenz. Die Theorie dynamischer Systeme fristete ihr Dasein bis zu ihrer „Wiederentdeckung“ in der Mathematik. Interessanterweise war es vor allem die sowjetische Mathematik, welche bis in die 50er Jahre wichtige Beiträge lieferte. Zu nennen ist da etwa das KAM-Theorem, fundiert in einer Arbeit der Mathematiker *Andrej N. Kolmogorov*, *Wladimir Arnold* und *Jürgen Moser*.¹¹⁶

1.3. Der Zweite Weltkrieg und die Entwicklung „atypischer Disziplinen“

Eine eigentliche Vervielfältigung der Wurzeln der Komplexitätsforschung begann Mitte dieses Jahrhunderts. Dies hat auch einen Zusammenhang mit den Erfordernissen des Zweiten Weltkriegs, wo sich vermehrt interdisziplinäre Teams mit spezifischen, durch den Krieg gegebenen Problemen auseinandersetzen. Das Überschreiten von Disziplinengrenzen wurde erstmals in grösserem Umfang praktiziert. So entstand autonom eine Reihe von Forschungsfeldern, die ausserhalb der üblichen Disziplinen liegen und deren Bedeutung für die Komplexitätsforschung erst später sichtbar wurde. Diese sollen hier kurz vorgestellt werden, für weiterführende Angaben verweisen wir auf die Literatur.

¹¹⁶ Vergleiche Hubbard et. al. (1994).

- **Kybernetik.** Als Begründer der Kybernetik gilt der österreichische Wissenschaftler *Norbert Wiener*, der diese 1948 als „Wissenschaft der Systemregelung“ etablierte.¹¹⁷ Motivierender Grundgedanke waren festgestellte Analogien in der Regelung von Prozessen in technischen und biologischen Systemen. Zentral ist dabei der Begriff der Information, welche in kybernetischen Systemen umgewandelt wird. Die Aufnahme, Übertragung, Nutzung und Transformation von Information wird als unabhängig von entsprechenden Prozessen mit Energie und Materie angesehen. Eine allgemeingültige Bestimmung des Begriffs Kybernetik fehlt aber auch heute noch.¹¹⁸

Den Einbezug des Selbstorganisationsansatzes leistete vor allem der österreichisch-amerikanische Physiker *Heinz von Foerster*. Als Folge dieser Entwicklung kann schliesslich die erkenntnistheoretische Sichtweise des radikalen Konstruktivismus gesehen werden, der von von Foerster in den 80er Jahren zusammen mit dem österreichisch-amerikanischen kognitiven Psychologen und Kybernetiker *Ernst von Glasersfeld* entwickelt wurde. Ausgangspunkt dieses Ansatzes war die Annahme, dass Sinneswahrnehmungen als Produkt eines zerebralen Verrechnungsmechanismus anzusehen sind. Der Organismus schafft sich gewissermassen seine „Aussenwelt“ selbst und wird erst bei einem Scheitern seines Modells zu Anpassungen gezwungen. Auf die Diskussion um den radikalen Konstruktivismus soll hier nicht weiter eingegangen werden.

- **Informationstheorie.** Die Informationstheorie untersucht die Kodierung von Information in einen Zeichenträger, dessen Senden unter Einbezug möglicher Störungen (Rauschen), dessen Empfang und Identifikation. Die Informationstheorie lieferte damit zum ersten Mal eine quantitative Bestimmung des Informationsbegriffs. Als Begründer der Informationstheorie gilt der Mathematiker *Claude Shannon*, der sich ursprünglich mit der Frage der Informationsübertragung durch einen Kanal mit Rauschen befasste.¹¹⁹ Informationstheorie im engeren Sinn ist die Theorie der Signalübertragung.

Im Laufe der Zeit zeigten sich Analogien mit der statistischen Mechanik, insbesondere zwischen der thermodynamischen und der informationstheoretischen Entropie (Shannon-Entropie). So kann die Zunahme von thermodynamischer Entropie eines Systems als Abnahme des Informationsgehaltes des Systems interpretiert werden. *Karl-Erik Eriksson et al.* sehen in der statistischen Mechanik sogar lediglich eine Anwendung der Informationstheorie.¹²⁰ Die in der Informationstheorie entwickelten Konzepte erlangten später in der Komplexitätsforschung grosse Bedeutung.¹²¹

- **Automatentheorie.** Die Automatentheorie untersucht die Mathematik der Verarbeitung von Input-Signalen zu Output-Signalen, vor allem bezüglich der Konstruktion von Rechenautomaten. Diesbezüglich bahnbrechend waren die Arbeiten von *Alan M. Turing* und *John von Neumann*. Die Automatentheorie soll dabei beliebige Entitäten umfassen, deren Verhalten von der Umgebung abhängt (Input) und die auf die Umgebung einwirken (Output).

Die Automatentheorie war für die Entwicklung der Komplexitätswissenschaft in zweierlei Hinsicht zentral. Einerseits wurde der Computer geboren, deren unabdingbares Werkzeug, wie sich noch zeigen wird. Andererseits führte die Automatentheorie und damit einhergehend die Entwicklung der Informatik zur spezifischen I-Komplexitätstheorie,

¹¹⁷ In diesem Jahr erschien das erste Standardwerk der Kybernetik, Wiener (1948). Eine weitere Einführung liefert Ashby (1958a).

¹¹⁸ Vergleiche dazu Mittelstrass (1984) und Ritter (div. Jahrgänge), jeweils unter Stichwort „Kybernetik“.

¹¹⁹ Shannon et al. (1949).

¹²⁰ Eriksson et al. (1987), S. 1. Vergleiche auch Zurek (1990a).

¹²¹ Eriksson et al. (1987) sehen in den Konzepten der Informationstheorie die zentralen Mittel für die Erforschung von Struktur- bildung. (Introduction).

die sich mit dem Ressourcenaufwand für Berechnungen beschäftigt. In dieser wurden zentrale Konzepte für das allgemeine Projekt der Komplexitätsforschung bereitgestellt. Schliesslich wurden damals die Grundlagen für zelluläre Automaten geschaffen. Auf all diese Aspekte werden wir genauer eingehen.

- **Systemtheorie.** Die Systemtheorie ist sicher keine abgeschlossene Disziplin im klassischen Sinn. Vielmehr ist sie Ausdruck eines programmatischen Systemdenkens, das in den Natur- und Geisteswissenschaften gleichermaßen Anklang gefunden hat. Das Verhältnis zwischen Systemtheorie und Komplexitätsforschung ist schwierig zu bestimmen. Historisch tritt erstere früher auf, während inhaltlich auf der praktischen Ebene (d.h. hin zu einem Management der Komplexität) gleiche Ziele verfolgt werden.¹²² Auch ist die Systemtheorie ebenfalls auf der Suche nach einem Komplexitätsmass, wie wir noch sehen werden. Vom Programm her finden sich weitere Gemeinsamkeiten: Man spricht generell von einer „holistischen Methode“ bzw. einem „antireduktionistischen Ansatz“,¹²³ Metaphern, die sich auch bei der Komplexitätsforschung immer wieder finden. Ausserdem wird in beiden Gebieten das Forschungsfeld sehr weit abgesteckt und reicht bis in die Sozialwissenschaften hinein. Inwieweit also beide Forschungsgebiete unter einen Hut zu bringen sind oder als Konkurrentinnen aufzufassen sind, ist schwierig zu beurteilen.¹²⁴ Diese Frage benötigt eine umfassende Untersuchung der Systemtheorie, was an dieser Stelle aber nicht geleistet werden kann.¹²⁵

Ausgangspunkt der modernen Systemtheorie war die Theorie offener Systeme des theoretischen Biologen *Ludwig von Bertalanffy*, welche in den 30er Jahren dieses Jahrhunderts formuliert wurde. Strukturelle Gemeinsamkeiten zwischen verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen liessen ihn eine neue interdisziplinäre Strukturwissenschaft ins Leben rufen, die heute als Allgemeine Systemtheorie (General System Theory) bezeichnet wird. Die ersten Veröffentlichungen des Programms der Allgemeinen Systemtheorie erschienen im Jahr 1945 – interessanterweise vor dem Aufkommen der Kybernetik. Für neuere Entwicklungen in der Systemtheorie vergleiche Teil III, Abschnitt 2.7.

All diese Forschungsgebiete entstanden in den 30er und 40er Jahren dieses Jahrhunderts. Bis 1960 wurden sie unabhängig voneinander weiterentwickelt, wobei aber die Systemtheorie immer mehr begann, Gemeinsamkeiten dieser Gebiete aufzunehmen und in ihr Programm einzubeziehen.

1.4. Der Computer, Chaos und Selbstorganisation – die Rückkehr der Physik

Im Laufe der 60er Jahre entwickelten sich neue Forschungsgebiete, welche als direkte Vorläufer der Komplexitätswissenschaft zu werten sind bzw. als Bestandteil dieser gelten können. Zu nennen ist vor allem die Entwicklung der Chaostheorie. Zudem entstanden neue Selbstorganisationstheorien, welche die

¹²² Vergleiche dazu Vemuri (1978), Van Gigch (1987a).

¹²³ Vergleiche dazu Checkland (1976), S. 130-133 und Schwegler (1992).

¹²⁴ So wollen etwa Allen et al. (1982) zwischen beiden Gebieten unterscheiden: „Middle-number systems [entsprechen organisiert-komplexen Systemen im Sinne Weavers] need a different approach, that of general system theory.“ S. xii. Solche Unterscheidungen sind immer entscheidend davon abhängig, was unter Systemtheorie bzw. Komplexitätsforschung verstanden wird.

¹²⁵ Nur nebenbei bemerkt: Der Systembegriff ist sicher in einem ähnlichen Ausmass unklar wie jener der Komplexität und wird auch entsprechend freigiebig verwendet. Generell verstehen wir darunter ein von einer Umwelt abgegrenztes Gebilde von Elementen und Wechselwirkungen zwischen diesen. Das Kriterium der Abgrenzung ist willkürlich, wird aber meist von praktischen Überlegungen gegeben. Klir (1985) sagt dazu: „A system is a way of looking at the world“, S. 132. Auf die Schwierigkeiten des Systembegriffs wollen wir aber nicht weiter eingehen. Ausserdem kann man sich auch fragen, welche Beziehung zwischen einem *komplexen System* und dem Begriff *Komplexität* allgemein besteht. Vergleiche dazu Keeley et al. (1993), S. 617, welche beides unterschieden haben möchten. Wir machen diese Unterscheidung hingegen nicht, da die Rede von Komplexität unabhängig von dessen Realisierung keinen Sinn macht. Der Systembegriff ist umfassend genug, um jede Art von Komplexität zu untersuchen.

zunehmende Bedeutung physikalischer Fragestellungen dokumentieren.¹²⁶ Zentral ist schliesslich das Aufkommen der Computer: Praktisch nicht lösbare Gleichungssysteme konnten jetzt numerisch berechnet werden, was etwa für die Turbulenzforschung wichtig war.¹²⁷ Allgemein kann man die 60er Jahre als das Jahrzehnt der Theorie dynamischer Systeme ansehen. Die Erforschung von komplexem, irregulärem und chaotischem Verhalten in der Lösung nichtlinearer Differentialgleichungen erlebte in dieser Zeit ihren entscheidenden Durchbruch. Im Rahmen der allgemeinen Theorie dynamischer Systeme stellte beispielsweise der „Hufeisen“-Diffeomorphismus des US-amerikanischen Mathematikers *Steven Smale* eine absolute Innovation dar: Es handelt sich um das erste Beispiel eines struktural stabilen, hingegen dynamisch instabilen Systems, was für die sich entwickelnde Chaosforschung von grosser Bedeutung war.¹²⁸ Als eine der ersten Anwendungen dieses Modells ist die Analyse des Turbulenzübergangs durch die Wissenschaftler *David Ruelle* und *Floris Takens* zu nennen. Die beiden prägten auch den Begriff des „seltsamen Attraktors“, der bei einer chaotisch geprägten Dynamik auftritt. Als wegweisend gelten im weiteren die Untersuchungen des Meteorologen *Edward Norton Lorenz*, dessen seltsamer Attraktor als „Lorenz-Attraktor“ bekannt wurde. Er hatte diesen bei der Untersuchung eines von ihm entwickelten Wettermodells entdeckt. In den 60er Jahren wurde also der Weg zur Chaosforschung vorbereitet.

Neben diesen Entwicklungen fanden weitere Forschungsgebiete ihre Ausprägung, die hier sehr kurzgefasst präsentiert werden sollen. Für eine umfassender Einführung verweisen wir auch hier auf weiterführende Literatur. All diese Gebiete bemühten sich um eine präzisere Fassung von Selbstorganisations-Phänomenen.

- **Nichtgleichgewichts-Thermodynamik.** Die sogenannte Brüsseler Schule um den belgischen Chemiker *Ilya Prigogine* leistete Wesentliches für die moderne Komplexitätsforschung. Prigogine ging es im wesentlichen um die Beschreibung irreversibler Vorgänge fern vom thermodynamischen Gleichgewicht. Dazu postulierte er eine Erweiterung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik entsprechend des von ihm entwickelten „Theorems der minimalen Entropieproduktion“. In den 60er Jahren formulierte Prigogine den Begriff der „dissipativen Struktur“. Damit werden Ordnungsstrukturen benannt, die in offenen Systemen fern vom thermodynamischen Gleichgewicht entstehen und durch stetige Energie- und Materieflüsse aufrechterhalten werden. Als paradigmatisches Beispiel solcher Strukturen dienen die „Bénard-Zellen“ oder bestimmte chemische Reaktionen.¹²⁹ Für eine umfassende Einführung siehe Nicolis et al. (1989) oder Prigogine (1988). Die Ideen der Nichtgleichgewichts-Thermodynamik fanden Auswirkungen auch in anderen Bereichen.¹³⁰
- **Autopoiese.** Das Konzept der Autopoiese wurde vom chilenischen Neurophysiologen *Humberto R. Maturana* entwickelt. Diesem liegt die Frage zugrunde, was die Besonderheit lebender Systeme ausmacht. Um 1969 definierte Maturana lebende Systeme erstmals als solche, die durch die Zirkularität ihrer Komponentenproduktion gekennzeichnet sind.

¹²⁶ Mussmann (1995) sieht in der Selbstorganisationsforschung ein Teilprojekt einer allgemeinen „Wissenschaft vom Komplexen“, der systematisch höchsten Stufe; S. 170. Dieser Darstellung können wir uns anschliessen.

¹²⁷ Damit ist übrigens keinesfalls gesagt, dass es einfacher geworden ist, das Problem der Turbulenz mathematisch zu lösen. Gary Doolen (zur Zeit in Los Alamos tätig, einem Institut, das sehr grosses Vertrauen in die Leistungskraft von Computern legt) hat sich in einem Vortrag am „Lattice Gas '94“ in Princetown dahingehend geäussert, dass durch hohe Reynolds-Zahlen charakterisierte Turbulenzen *für immer* einer numerischen Berechnung standhalten könnten. Diesen Hinweis verdanke ich Matt Davison.

¹²⁸ Wir verzichten auf eine mathematisch exakte Einführung dieser Abbildung. Vergleiche dazu beispielsweise Nicolis et al. (1989), S. 121-123.

¹²⁹ Dabei sind verschiedene Arten der Strukturbildung zu unterscheiden: Es gibt rein räumliche Strukturen ohne Änderungen in der Zeit, raum-zeitliche Strukturen (sich bewegende geometrische Muster) und rein zeitliche Strukturen (chemische Oszillatoren). Genaueres in Eriksson et al. (1987), Kap. 5. Eine Einführung in oszillierende chemische Reaktionen bieten Epstein et al. (1989).

¹³⁰ Ein Beispiel liefern Feistel et al. (1989). Diese sehen basierend auf der Nichtgleichgewichts-Thermodynamik die Möglichkeit der Etablierung einer „Physik der Evolution“. Diese soll sich mit der Frage auseinandersetzen, welche physikalischen Randbedingungen für das Anlaufen eines evolutiven Prozesses hinreichend bzw. notwendig sind (S. 9).

Lebende Systeme produzieren ihre Bestandteile also laufend selbst. Diese Selbst-Erzeugung wird Autopoiese genannt.¹³¹

- **Molekulare Selbstorganisation.** Als weiteres Modell innerhalb der Biologie, um das Phänomen der Selbstorganisation zu fassen, gilt die Idee der „Hyperzyklen“. Dieses Konzept wurde vom biochemisch tätigen Physiker *Manfred Eigen* entwickelt. Der Selbstorganisationsprozess gilt dabei als evolutionärer Auswahlprozess biologischer Makromoleküle. Das Modell kann hier aus Platzgründen nicht weiter vorgestellt werden.¹³²
- **Synergetik.** Die Stuttgarter Schule um den Physiker und Mathematiker *Hermann Haken* hat das interdisziplinäre Selbstorganisationskonzept der Synergetik entwickelt. Die Synergetik sucht nach universellen Prinzipien verschiedener Systeme, welche Strukturbildung hervorbringen. Damit umfasst die Synergetik zumindest einen Teil der Zielsetzungen der Komplexitätsforschung. Charakteristisch ist vor allem eine Hierarchisierung der Wechselwirkungen im Vielteilchensystem, welche dessen Beschreibung mittels weniger Parameter überhaupt ermöglicht. Als paradigmatisches Beispiel dient der Laser, an welchem Haken seine Ideen expliziert.¹³³

1.5. Die verschiedenen Ansätze treffen sich – Entwicklung der Komplexitätsforschung

Im Verlauf der 70er und 80er Jahre erfolgt ein Zusammenwachsen der verschiedenen Gebiete, wobei vermehrt auch der Begriff Komplexitätswissenschaft („science of complexity“) auftritt.¹³⁴ In dieser Zeitspanne entstanden aber auch weitere Forschungsfelder, die im Rahmen der beginnenden Komplexitätsforschung zu nennen sind:

- **Chaostheorie.** Seit Mitte der 70er Jahre ist explizit von der Chaostheorie die Rede, die sich mit speziellen Fragestellungen der Theorie dynamischer Systeme beschäftigt.¹³⁵ Die Chaosforschung sucht eine Beschreibung einer komplexen Dynamik auf der Grundlage einfacher, deterministischer Grundgleichungen. Damit motiviert die Chaostheorie auch das Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft. Das Chaos ist im übrigen auch ein Vorreiter der Komplexität auf dem Gebiet der populärwissenschaftlichen Literatur (vgl. Teil IV, Abschnitt 4.1).
- **Fraktale Geometrie.** Im Jahr 1975 prägte der Mathematiker *Benoît B. Mandelbrot* den Begriff des „Fraktals“ und leitete damit die Entstehung der fraktalen Geometrie ein. Diese untersucht geometrische Gebilde (eben Fraktale), die durch eine nichtganzzahlige Dimension charakterisiert sind. Dimension wird dabei nicht durch die Anzahl Parameter zur Charakterisierung eines mathematischen Objektes charakterisiert, sondern die sogenannte Hausdorff-Besicovitch-Dimension (für die Definition verweisen wir auf die Literatur) wird verwendet. Eine wesentliche Eigenschaft von Fraktalen ist deren Selbstähnlichkeit. Dies bedeutet, dass bestimmte Strukturen skaleninvariant sind und in verschiedenen Größensordnungen immer wieder auftreten. Fraktale waren schon vor Mandelbrot bekannt

¹³¹ Für eine Einführung vergleiche Musmann (1995), S. 298-312.

¹³² Eine umfassende Einführung liefert Eigen et al. (1979).

¹³³ Für eine umfassende Einführung konsultiere Haken (1990).

¹³⁴ Wer zum erstenmal von einer „Komplexitätswissenschaft“ sprach, liess sich nicht eruieren. Der Begriff wurde vor allem von der populären Literatur verbreitet, so zuerst von Pagels (1988).

¹³⁵ Explizit brauchte offenbar James Yorke (1975) den Ausdruck „Chaos“ zum ersten Mal in seiner Publikation „Period Three Implies Chaos“, zitiert nach Gleick (1987), S. 69.

(etwa die Kochsche Kurve oder die Cantor-Menge). Sie galten aber wegen mathematisch äusserst unangenehmen Eigenschaften als „Monster“.

Vorläufer der fraktalen Geometrie waren unter anderem die Ideen des französischen Mathematikers *Gaston Julia*, der das Verhalten reellwertiger Abbildungen der komplexen Ebene auf sich selber untersuchte. Diese lassen sich als Iterationen auffassen mit äusserst komplex anmutenden Konvergenzmengen. Die Gesamtheit dieser Julia-Mengen bildete die Mandelbrot-Menge, das als ästhetisch sehr schönes „Apfelmännchen“ die Popularisierung der fraktalen Geometrie und verwandter Gebiete ständig begleitet hat. Für eine umfassende Einführung in dieses Gebiet verweisen wir auf das Standardwerk von Mandelbrot.¹³⁶ Die fraktale Geometrie ist insofern für die Komplexitätswissenschaft interessant, da Fraktale oft als geometrische Sprache für komplexe Strukturen bezeichnet werden.¹³⁷

- **Katastrophentheorie.** In den späten 60er Jahren kristallisierte sich um die Arbeiten des Mathematikers *René Thom* ein wissenschaftliches Gebiet heraus, das ebenfalls ein grosses populäres Echo hervorrief: die Katastrophentheorie. Diese untersucht und klassifiziert grundsätzlich qualitative, topologische Änderungen des Verhaltens geometrischer Strukturen unter Variation bestimmter Parameter.¹³⁸ In den 70er Jahren erfolgte ein populärwissenschaftlicher Sündenfall, indem die Katastrophentheorie Anwendung in den verschiedensten Bereichen (bis hin zur Erklärung von Gefängnisrevolten und zur Beantwortung der Frage, wann man von einem Hund gebissen wird) finden sollte. Dies gipfelte im Zusammenbruch der „allumfassenden Katastrophentheorie“ im Jahr 1977/78, eingeleitet unter anderem durch einen Aufsatz von *Gina Bari Kolata*: „The Emperor Has No Clothes“.¹³⁹ Das Schicksal der popularisierten Katastrophentheorie gilt gleichsam als Mahnmal für nachfolgende Versuche, für ein neues Forschungsgebiet allumfassende Ansprüche zu formulieren. Dabei muss aber festgehalten werden, dass die Katastrophentheorie in ihrer ursprünglichen, rein mathematischen Form natürlich auch heute ihre Berechtigung hat.

Die Entstehung der eigentlichen Komplexitätswissenschaft lässt sich mit der Gründung des Santa-Fe-Institutes (SFI) in Zusammenhang bringen. Seit dessen Entstehung im Jahr 1984 wird in Publikationen des Instituts explizit und konstant von einer „Science of Complexity“ gesprochen. Das SFI zeigt exemplarisch den Weg hin zu einer Institutionalisierung der Komplexitätswissenschaft.¹⁴⁰ Natürlich ist es falsch, die Komplexitätsforschung mit einem einzigen Institut in Verbindung zu bringen. Entsprechend zu den vorgestellten Wurzeln haben sich in den verschiedenen Universitäten schon vorher Abteilungen gebildet, die vom Forschungsgegenstand her in die Komplexitätswissenschaft einzuordnen sind. *Murray Gell-Mann* nennt unter anderem folgende weitere Institute:¹⁴¹ Die Ecole Normale Supérieure in Paris, das

¹³⁶ Mandelbrot (1982a).

¹³⁷ Ausgeführt ist dieser Gedanke beispielsweise in Jürgens et al. (1989). Es gibt hingegen auch Kritiker, die vor einer zu engen Verbindung zwischen fraktaler Geometrie und Komplexitätsforschung warnen. Bennett (1988a) glaubt beispielsweise nicht, dass Selbstähnlichkeit ein Merkmal komplexer Strukturen sein soll. Dies deshalb, weil selbstähnliche Strukturen sehr einfach mittels einer Iteration erzeugt werden können und deshalb sein „slow growth law“ verletzen (S. 222). Gemäss diesem zeichneten sich komplexe Strukturen gerade durch ihre lange „Geschichte“ aus (siehe auch Teil III, Abschnitt 2.2). Weiter stellt sich ein grundsätzliches Problem mit der Selbstähnlichkeit, da die Natur sich ab einer bestimmten Grössenordnung (d.h. auf der Ebene der Quantentheorie) sehr anders präsentiert. Selbstähnlichkeit ist nur innerhalb eines bestimmten Grössenintervalls zu erwarten.

¹³⁸ Vergleiche Thom (1989).

¹³⁹ Kolata (1977).

¹⁴⁰ Vergleiche dazu etwa Anderson (1992), Gell-Mann (1994) und Waldrop (1992). Letzterer liefert einen geschichtlichen Abriss zur Entstehung des Institutes.

¹⁴¹ Gell-Mann (1994), S. 26/27.

Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen (*Manfred Eigen*); das Institut für Theoretische Chemie (*Peter Schuster*) und das Institut für Angewandte Systemanalyse, beide in Wien; die University of Michigan (*Arthur Burks, Robert Axelrod, Michael Cohen, John Holland*); die Universität Stuttgart (*Hermann Haken*); die Freie Universität Brüssel (*Ilya Prigogine*); die Universität Utrecht; den Fachbereich Reine und Angewandte Wissenschaften der Universität Tokio; die Zentren für das Studium nichtlinearer Phänomene an mehreren Zweigstellen der University of California; die University of Arizona; das Center for Complex Systems Research am Beckmann Institute der University of Illinois; und das Institut für den Wissenschaftlichen Austausch in Turin.

Zusammenfassend gelangen wir zu einer ersten Charakterisierung der Komplexitätswissenschaft: Als eigentlicher Nährboden gilt die Theorie dynamischer Systeme, insbesondere die Chaostheorie. Ein enges, im Detail schwierig zu klärendes Verhältnis besteht zur Systemtheorie. Da, wie wir noch sehen werden, der Computer mehr als ein Werkzeug der Komplexitätsforschung ist, ist auch die Automatentheorie bzw. die Informatik ein wichtiger Ideenlieferant. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang insbesondere die in der Informatik entwickelte I-Komplexitätstheorie. Die verschiedenen Selbstorganisationstheorien wiederum lassen sich als Teilprojekte der Komplexitätsforschung verstehen. Weitere solche Teilprojekte finden sich in der Physik und der Biologie, wie wir in Teil III feststellen werden. Zum eigentlichen Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft werden wir uns in Teil IV äussern. Schliesslich hat gegen Ende der 80er Jahre eine eigentliche Popularisierungskampagne der Komplexitätsforschung begonnen. Diese zeigt sich auch dadurch, dass die entwickelten Konzepte der Selbstorganisation u.a. vermehrt auch in sozial- und geisteswissenschaftlichen Disziplinen Anklang fanden und geradezu begierig aufgenommen wurden.¹⁴² Auf diesen Aspekt werden wir ebenfalls in Teil IV eingehen.

1.6. Die „Summer Schools“ des Santa-Fe-Institutes – eine Annäherung an die Komplexitätsforschung

Das Santa-Fe-Institut versteht sich als eine führende Institution für die Propagierung und Verbreitung der Komplexitätswissenschaft. Seit 1988 finden im SFI regelmässig sogenannte „Summer Schools“ statt. An diesen treffen sich verschiedene Wissenschaftler, um Klarheit über Zielsetzung, Methoden und Forschungsgebiete der Komplexitätswissenschaft zu erlangen.¹⁴³ Anhand der jeweils erschienenen Publikation lässt sich sehr schön die Entwicklung der Komplexitätsforschung aufzeigen, beginnend mit einem grossen Enthusiasmus, der allmählich einer gewissen Ernüchterung weicht. Um dem Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft auf die Spur zu kommen, bietet sich demnach eine Analyse dieser Publikationen an:

Gründung: Im Jahr 1984 fand der Gründungs-Workshop des SFI statt.¹⁴⁴ Schon damals formulierte *Murray Gell-Mann*, einer der Initiatoren des SFI, in seinem Beitrag das eigentliche Ziel der Komplexitätsforschung: Oberflächenkomplexität soll mittels Tiefeneinfachheit erklärt werden. Eine Reihe verschiedener Disziplinen hat bereits versucht, bestimmte komplexe Phänomene auf diese Weise zu verstehen. Gell-Mann nennt namentlich die Synergetik, die Theorie nichtlinearer Systeme oder Selbstorganisationstheorien. Das SFI soll den Rahmen bieten, diese verschiedenen Gebiete unter die eine, erwähnte Zielsetzung zu stellen. Ein interdisziplinäres Vorgehen ist dabei ein Muss, und Gell-Mann prophezeit, dass sich die universitären Strukturen dereinst an diese Entwicklung anpassen werden.

¹⁴² Siehe dazu etwa Reed (1992). Selbst die Philosophie in der ehemaligen DDR erkennt da wichtige Defizite, so sagt etwa Stöhr (1989): „Ich halte es deshalb für eine dringende Aufgabe, Komplexität verstärkt in den Blickpunkt einer intensiven philosophischen Erörterung zu rücken, damit unsere Philosophie auch diesem Problemkreis weltanschaulich und heuristisch ihrer Kritikfähigkeit gerecht wird.“ Zu spät, wie wir heute wissen.

¹⁴³ Unter anderem folgende Wissenschaftler sind in das Umfeld des SFI anzusiedeln bzw. gehören dem Institut an: Philip W. Anderson; Kenneth J. Arrow; W. Brian Arthur; Per Bak; David K. Campbell; George A. Cowan; Doyne Farmer; Murray Gell-Mann, John H. Holland; Stuart A. Kauffman; Christopher G. Langton; Norman H. Packard und David Pines. Quelle: Jen (1990), Nadel et al. (1991/1992/1993), Stein (1989a), Waldrop (1992).

¹⁴⁴ Pines (1988).

Die damals an diesem Workshop vorgestellten Gebiete vermitteln einen Überblick über das empirische Bezugsfeld der neuen Komplexitätsforschung: So spielt die nichtlineare Dynamik eine wichtige Rolle. Weiter wird die zentrale Bedeutung des Konzeptes „Evolution“ hervorgehoben, die mittels Computersimulation erforscht werden soll. Eine wichtige Rolle spielen auch die Computerwissenschaften selbst, so etwa die Theorie zellulärer Automaten. Schliesslich finden sich auch Beiträge über Theorien zur Entstehung des Lebens, über kognitive Wissenschaften, über das Hirn-Geist-Problem und schliesslich auch über historische Entwicklungen, etwa über die Pueblo-Indianer in den Südweststaaten der USA. Eine erstaunliche Breite an Phänomenen, die mit einem einzigen Forschungsprogramm untersucht werden sollen!

1988: Im Jahr 1988 fand die erste „Complex Systems Summer School“ im SFI statt.¹⁴⁵ Thematisiert wurde dabei die Bedeutung des Begriffs „complex system“, wobei Einigkeit über dessen Verwendung nicht erreicht wurde. Vielmehr gilt bezeichnenderweise: „Complexity is almost a theological concept (...)“.¹⁴⁶ Generell wird aber davon ausgegangen, dass Irreduzibilität ein entscheidendes Merkmal komplexer Systeme sein soll. Schon damals zeigen sich also Hinweise auf Emergenzkomplexität.

Entsprechend wird die Methode charakterisiert, mit welcher komplexe Systeme untersucht werden soll. Es ist die Rede von einem „synthetischen Ansatz“, den man auch als Top-down-Strategie verstehen kann. Komplexe Systeme sollen also nicht einfach in Teile zerlegt werden. Vielmehr sollen Teile gemäss einem festgelegten Organisationsschema zusammengefügt werden und das erreichte Ganze (bzw. Modell) mit dem zu untersuchenden System verglichen werden. Daher ergibt sich auch die entscheidende Rolle des Computers als Mittel zu dieser Synthese bzw. Simulation. Diese Methode wird im weiteren auch als „nichtreduktionistisch“ bezeichnet.

Aus folgenden Gebieten finden sich Beiträge: „Nichtlineare“ Wissenschaften (vor allem die Theorie dynamischer Systeme); Physik von Flüssigkeiten, insbesondere Turbulenz; Spingläser; neuronale Netzwerke; Evolution, Anpassung und Selektion; und sogar Theorien über die Ausbreitung der Aids-Epidemie.

1989: Im Jahr 1989 ist dann schon die Rede von einer „Weltanschauung Komplexität“.¹⁴⁷ Die Wichtigkeit des Computers als zentrales Forschungsinstrument wird erneut betont. Folgende drei Themen sollte der Workshop abdecken: So soll eine akzeptable Definition von Komplexität (eine Art quantitative Komplexität mit emergenter Note) gefunden werden. Weiter soll das Verhalten komplexer Systeme spezifiziert und eine Reihe typischer bzw. paradigmatischer Beispiele gefunden werden. Schliesslich sollen auch Techniken für den Umgang mit komplexen Systemen erarbeitet werden.

Entsprechend diesen Zielen versuchen auch eine Reihe von Beiträgen, ein Mass für Komplexität einzuführen. Als Beispiele nennen wir ein Mass für Berechnungs-Komplexität, den algorithmischen Informationsgehalt und Seth Lloyds thermodynamische Tiefe (vgl. Teil III). Weitere Beiträge stammen aus den Gebieten zelluläre Automaten und theoretische Immunologie.

1990: Im folgenden Jahr macht sich dann langsam Ernüchterung breit.¹⁴⁸ Der immer noch vorhandene Mangel einer brauchbaren Komplexitätsdefinition wird beklagt. Konsens besteht lediglich darüber, dass Emergenz dabei eine zentrale Rolle spielen muss.

Die Beiträge stammen aus einem überaus weiten Feld: Von der informations-basierenden Komplexität (siehe Teil III, Abschnitt 2.2) und der Theorie der Modellierung komplexer Systeme reichen sie über Abhandlungen über Flüssigkeitsdynamik bis hin zur Kontrolle von Zungenbewegungen oder zum Zusammenhang von Sex und Evolution.

¹⁴⁵ Stein (1989a).

¹⁴⁶ Stein (1989a), S. xiii.

¹⁴⁷ Jen (1990).

¹⁴⁸ Nadel et al. (1991).

1991 Auch in diesem Jahr sind bezüglich der Suche nach einer überzeugenden Komplexitätsdefinition noch keine Fortschritte zu vermelden.¹⁴⁹ Beiträge stammen aus den Gebieten der neuronalen Netzwerke, des künstlichen Lebens, der Musterbildung in biologischen Systemen und der Theorie zellulärer Automaten. Der Schwerpunkt liegt klar in den Computerwissenschaften.

1992 In diesem Jahr wird schliesslich der Mangel an einer Komplexitätsdefinition gar nicht mehr erwähnt.¹⁵⁰ Beiträge stammen aus den Gebieten der genetischen Algorithmen, der Simulation ökologischer Systeme mittels Computer (sog. „computational ecology“) und der Strukturkomplexität. Auch hier sind die Computerwissenschaften klar dominant.

Was macht dieser kurze Überblick deutlich? Erstens zeigt sich, dass die Bemühungen zur Etablierung eines allgemein akzeptierten Komplexitätsbegriffs bisher gescheitert sind. Als einigendes Element wird betont, dass ein solcher Begriff den emergenten Charakter eines komplexen Systems irgendwie erfassen muss. Zweitens zeigt sich die Bedeutung des Computers in zweifacher Hinsicht. So wird einerseits explizit betont, welches zentrale Werkzeug diese Maschine für die Erforschung der Komplexität ist. Andererseits stammt auch der überwiegende Anteil der vorgestellten Arbeiten aus dem Bereich der Computerwissenschaften. Dies ist ein Hinweis darauf, dass der Computer mehr ist als nur ein Werkzeug, sondern gewissermassen die untersuchte Realität mitkonstituiert, wie wir noch sehen werden.

2. Warren Weavers „Science and Complexity“

Warren Weaver, zusammen mit Claude Shannon Mitbegründer der Informationstheorie, hat mit „Science and Complexity“ ein für die Komplexitätsforschung in mehrfacher Hinsicht programmatisches und visionäres Paper geschrieben.¹⁵¹ Diverse Autoren verweisen auf diese Bedeutung des Textes,¹⁵² so dass wir an dieser Stelle näher auf Weavers „Science and Complexity“ eingehen werden. Geschrieben wurde der Aufsatz im Jahr 1948, also zu einer Zeit, als sich die ersten Wurzeln der Komplexitätsforschung zu entwickeln begannen.

Drei Aspekte machen den visionären Charakter des Textes aus, die im Folgenden klarer gefasst werden sollen: Er bringt erstens eine erste grobe Charakterisierung eines nichttrivialen Komplexitätsbegriffs und damit gleichzeitig eine Definition des Forschungsgebiets. Zweitens präsentiert er die Methoden, derer sich eine solche Komplexitätswissenschaft grundsätzlich bedienen sollte. Drittens schliesslich verbindet er mit seinem Projekt grosse Ansprüche, die auch heute das Projekt der Komplexitätsforschung begleiten.

Zum Text liessen sich auch manche kritische Anmerkungen beifügen, sind doch einige der dargestellten Aspekte vom wissenschaftstheoretischen Standpunkt nicht koscher. Insbesondere die Weaversche Charakterisierung von Wissenschaft erscheint etwas naiv. Diese Probleme sind aber angesichts des programmatischen Charakters des Papers sicher zweitrangig und finden deshalb im Folgenden keine Beachtung.

¹⁴⁹ Nadel et al. (1992).

¹⁵⁰ Nadel et al. (1993).

¹⁵¹ Die folgenden Ausführungen beruhen auf Weaver (1948).

¹⁵² So etwa Brunner et al. (1971), S. xiv.; Cheetham (1993), S. 298; Flood (1987), S. 183; Von Hayek (1972), Fussnote 8; Keeley et al. (1993), S. 617; Klir (1985), S. 135/136; Luhmann (1990), S. 158; Morin (1991), S. 283; Sahal (1976), S. 7; Simon (1962), Fussnote 4;

2.1. Charakterisierung des Forschungsfeldes – die „organisierte Komplexität“

In einer groben Dreiteilung charakterisiert Weaver das empirische Forschungsfeld der künftigen Komplexitätswissenschaft.¹⁵³ So gibt es zum ersten die Probleme des Einfachen („Problems of Simplicity“). Hier handelt es sich gewissermassen um die ersten Probleme überhaupt, mit welchen sich die Naturwissenschaft seit Beginn der Neuzeit konfrontiert sah und mit denen sie sich bis ins 19. Jahrhundert hinein beschäftigt haben soll. Er spricht allgemein von „Zwei-Variablen-Problemen“. Es sind also solche, welche mit verhältnismässig einfachen mathematischen Hilfsmitteln behandelt werden können. Natürlich handelt es sich um eine sehr grobe Charakterisierung solcher Probleme. Weaver klammert etwa aus, dass schon sehr einfache Systeme komplexes Verhalten zeigen können.¹⁵⁴ Was Weaver mit seinen „Problems of Simplicity“ meint, erscheint intuitiv klar, ist bei genauerem Hinsehen aber nicht unproblematisch.

Neben Problemen, die sich durch eine sehr geringe Zahl von Variablen auszeichnen, gibt es auch solche mit entsprechend immenser Grössenordnung. Diesbezüglich als Paradedisziplin gilt die Thermodynamik bzw. statistische Mechanik. Fragestellungen aus diesen Gebieten gelten bei Weaver als Probleme der desorganisierten Komplexität („Problems of Disorganized Complexity“). Bei solchen lassen sich statistische Techniken anwenden. Dies unter der Bedingung, dass der Zufallscharakter des Systems erhalten bleibt. Dabei ist es nicht unbedingt notwendig, dass die Kausalität der Mikroebene bekannt ist. Im Fall von Lebensversicherungen beispielsweise lassen sich durchaus statistische Berechnungen bezüglich Sterberaten und dergleichen machen, ohne dass man weiss, warum bestimmte Einzelpersonen sterben, so Weavers Beispiel.

Die beiden beschriebenen Problemfälle lassen hingegen ein grosses Feld unberührt. Bezüglich der Anzahl Variablen werden nur die Extreme erfasst: sehr wenige und sehr viele. Im mittleren Bereich versagen aber die bisherigen Methoden, vor allem deshalb, weil die Organisation der Systemkomponenten eine entscheidende Rolle spielt. In diesem Fall spricht Weaver von Problemen der organisierten Komplexität („Problems of Organized Complexity“).¹⁵⁵ Danach stellt Weaver eine ganze Reihe von Beispielen vor, die man heute zum grossen Teil der Molekularbiologie und der Genetik zuordnen würde.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass Weaver mit seiner Dreiteilung das Forschungsgebiet der heutigen Komplexitätswissenschaft nur grob umreisst.¹⁵⁶ Hingegen charakterisiert er eine Klasse von Problemen, bei welchen die Organisation der Systemkomponenten entscheidend für deren Verstehen wird. Dazu werden neue methodische Ansätze benötigt, eine Behauptung, die auch im Rahmen der Komplexitätsforschung immer wieder auftaucht.

2.2. Unabdingbare Methoden – Interdisziplinarität und der Computer

Der zweite visionäre Aspekt in Weavers Paper betrifft den methodischen Ansatz, mit welchem Probleme der organisierten Komplexität angegangen werden sollten. Da ist zum ersten die eminente Bedeutung elektronischer Berechnungsmethoden zu nennen. Erst mit den Berechnungs- und Speicherungsmöglichkeiten dieser Maschinen können solche Probleme überhaupt vernünftig angegangen werden, so Weaver. Man kann heute in der Tat sagen, dass die Komplexitätsforschung nicht in der heutigen Form (wenn

¹⁵³ Nur nebenbei bemerkt: Weaver verwendet den Terminus „Science of Complexity“ noch nicht.

¹⁵⁴ Als Paradebeispiele dienen etwa zelluläre Automaten (siehe etwa Wolfram 1984b), die zu jener Zeit aber noch nicht bekannt waren. Auf zelluläre Automaten gehen wir in Teil IV, Abschnitt 3.2 genauer ein.

¹⁵⁵ „Organisiert-komplexe Systeme“ können auch als „middle-number-systems“ (ein Begriff von Weinberg, zitiert nach Allen et al. (1982), S. xi) bezeichnet werden. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass das System zu wenig Teile besitzt, um deren Verhalten zu mitteln, hingegen zu viele, um deren Verhalten separat mit einzelnen Gleichungen zu beschreiben.

¹⁵⁶ Eine Dreiteilung des Gegenstandsbereichs der Naturwissenschaft findet sich übrigens auch heute: Davies (1989) sieht drei neue „frontiers: the very small, the very large and the very complex.“, S. 107 (siehe auch Grassberger (1988), S. 1). Für letzteren Bereich sei die Ausbildung einer „new physics“ (S. 108) durchaus denkbar. Kanitscheider (1991) spricht bei den Objekten der mittleren Grössenordnung vom „Reich des Komplexen“ (S. 753). Çambel (1993) hingegen ist der Ansicht, komplexe Phänomene seien auch im „ganz Grossen“, und „ganz Kleinen“ möglich und sieht deshalb folgende Kategorisierung: „(a) classical physics; (b) modern physics, i.e., relativistic and quantum physics; and (c) the science of complexity.“, S. 21.

überhaupt) existieren könnte, gäbe es keinen Computer. Wir werden aber zeigen, dass der Computer nicht nur ein unabdingbares methodisches Hilfsmittel ist. Vielmehr liefert er ein neues Bild der Realität – die Natur als Computer bzw. zellulärer Automat –, das in der Komplexitätsforschung oft beschworen wird.

Zum zweiten betont Weaver den interdisziplinären Rahmen, in welchem Probleme der organisierten Komplexität angegangen werden müssen. Dieser „mixed team approach“ gewann während des Zweiten Weltkriegs an grosser Bedeutung, wie er ausführt. Damals zeigte sich, dass interdisziplinäres Vorgehen funktionieren kann. Entsprechend sind sich Vertreter der Komplexitätsforschung heute einig, dass Interdisziplinarität eine Grundvoraussetzung für die Untersuchung komplexer Systeme ist. Institutionen wie das SFI sind explizit auf eine solche ausgerichtet.

2.3. Eine neue Welt – zum Status der Komplexitätswissenschaft

Weaver verbindet schliesslich mit der neuen Wissenschaft, welche sich mit der organisierten Komplexität beschäftigen soll, hohe Ansprüche.¹⁵⁷ Probleme der organisierten Komplexität werden in ihrer Schärfe zunehmen und die Wissenschaft wird sich mit diesen beschäftigen müssen, prophezeit er. Solche Probleme finden sich vor allem in Wissenschaften wie Medizin, Ökonomie und Politikwissenschaften, welche gemäss Weaver für die menschliche Zukunftsbewältigung wichtig werden.

Diese neue Wissenschaft wird aber nicht nur laufend an praktischer Relevanz gewinnen. Vielmehr sieht Weaver den Aufstieg eines neuen wissenschaftlichen Weltbildes: „(...) we must stop thinking of science in terms of gadgetry.“ Diese Absage an ein „newtonsches Wissenschaftsverständnis“ findet sich vor allem in den populären Schriften zur Komplexitätsforschung regelmässig, meist kombiniert mit einer (nicht ausgereiften) Kritik am Reduktionismus. Auf diesen „weltbildschaffenden Aspekt“ der Komplexitätsforschung werden wir noch ausführlich eingehen (Teil IV, Abschnitt 4).

3. Komplexität als neues Paradigma?

Sobald die Rede von grösseren Umwälzungen in den Wissenschaften ist, kommt man beinahe unweigerlich zum Begriff „Paradigmenwechsel“. Diesen trifft man auch in der Diskussion um die Komplexitätsforschung an, so dass wir uns zumindest der Frage stellen wollen, inwieweit das Aufkommen der Komplexitätsforschung eine wissenschaftliche Revolution im Kuhnschen Sinne darstellt. Dazu werden wir Kuhns Modell des wissenschaftlichen Wandels kurz skizzieren.¹⁵⁸ Die dabei gewonnenen Ergebnisse vergleichen wir mit den Untersuchungen anderer Autoren, die ebenfalls nach einer Antwort für obige Frage suchten. Ein abschliessendes Urteil erlauben wir uns hingegen nicht.

¹⁵⁷ Er ist im übrigen auch nicht der einzige, welcher schon zu jener Zeit der Erforschung der Komplexität einen solch bedeutenden Status zuerkennt. John von Neumann äussert sich in seinem posthum erschienenen Werk „The Theory of Self-Reproducing Automata“ (von Neumann, 1966) entsprechend: Die Komplexität habe im 20. Jahrhundert denselben Status wie die Entropie und die Energie (im Weaverschen Sinne Phänomene der unorganisierten Komplexität) im 19. Jahrhundert (zitiert nach Atlan (1991), S. 13). Ähnlich äussert sich Ashby (1958a), ein Pionier der Kybernetik: „But science today is also taking the first steps towards studying „complexity“ as a subject in its own right.“, S. 5.

¹⁵⁸ Kuhn-Experte Paul Hoyningen-Huene hat mich darauf aufmerksam gemacht, dass die Rohfassung des folgenden Abschnitts gravierende Mängel enthalten hatte. Ich hoffe, diese soweit behoben zu haben, dass die jetzige Darstellung meinen Zwecken genügt.

3.1. Kuhns Konzeption des wissenschaftlichen Wandels

Thomas S. Kuhn hatte in seinem 1962 erschienenen und berühmt gewordenen Buch „The Structure of Scientific Revolutions“ ein viel diskutiertes Modell des wissenschaftlichen Wandels präsentiert.¹⁵⁹ Wir können an dieser Stelle weder die Wirkungsgeschichte des Werkes noch dessen Kritiker umfassend darstellen. Wir bemühen uns, jene Punkte herauszuarbeiten, die für unsere Beurteilung wichtig sind. Dies beinhaltet vor allem eine Skizze des Kuhnschen Modells und eine Herausarbeitung jener Elemente des Modells, die einen „Paradigmenwechsel“ charakterisieren.

Grundthema des Buches (und auch der Wissenschaftsphilosophie Kuhns) ist eine Untersuchung der Wissenschaftsentwicklung,¹⁶⁰ basierend auf einer gründlichen wissenschaftshistorischen Analyse. Diese wiederum geht von der „neuen Wissenschaftshistoriographie“ aus, die versucht, vergangene Entwicklungen *nicht* unter dem heutigen Blickwinkel zu untersuchen und zu beurteilen. Vielmehr soll das damals vorherrschende Begriffssystem rekonstruiert werden und die historischen wissenschaftlichen Texte sind entsprechend auf hermeneutische Weise zu lesen. Eine derartige Untersuchung zeigt gemäss Kuhn auch auf, dass die Auffassung, der wissenschaftliche Fortschritt sei als kontinuierlicher Prozess der Wissensanhäufung zu verstehen, nicht haltbar ist. Die Entwicklung der Wissenschaft erweist sich als facettenreicher, als eine Abfolge „normalwissenschaftlicher“ Phasen und „wissenschaftlicher Revolutionen“.

Insgesamt lassen sich drei Phasen unterscheiden: In einer „*vornormalen Phase*“¹⁶¹ streiten sich verschiedene Schulen um die richtige Behandlung eines noch unklar umrissenen Gegenstandsbereichs. Es herrscht kein Konsens über die Grundlagen des Fachgebiets. Die sich konkurrenzierenden Schulen beschäftigen sich deshalb auch stark mit grundsätzlichen Fragen. Kuhn erläutert dies anhand verschiedener historischer Beispiele, unter anderem mit den Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektrizität.¹⁶²

Im Lauf der Entwicklung setzt sich eine dieser Anschauungen gegenüber den anderen durch. Typischerweise dadurch, dass eine der Schulen einen entscheidenden Fortschritt macht, der von den meisten anderen Wissenschaftlern auf diesem Gebiet als solcher erkannt wird. Diese wissenschaftliche Leistung muss ihre Konkurrenten hinsichtlich ihrer Qualität übertreffen und den Eindruck erwecken, dank ihr seien die wesentlichen Probleme des Fachgebietes gelöst. Sie muss schliesslich einen derartigen Beispielcharakter haben, dass man eine Forschungstradition auf sie aufbauen kann.

Diese Forschungsleistungen nennt Kuhn ursprünglich *Paradigmen*, d.h. „anerkannte wissenschaftliche Leistungen, die für eine gewisse Zeit einer Gemeinschaft von Fachleuten massgebende Probleme und Lösungen liefern“.¹⁶³ Mit dem Begriff des Paradigmas haben sich einige Probleme ergeben, wie viele Kritiker und auch Kuhn selbst festgestellt haben.¹⁶⁴ Wir können hier den Wandel des Paradigmenbegriffs nicht darstellen und verweisen dazu auf die Arbeit von Hoyningen-Huene.¹⁶⁵ Wir verstehen grob unter einem Paradigma jene Auffassungen, Methoden und Zielsetzungen, welche eine Wissenschaft in einer bestimmten Periode prägen. Diese Prägung geschieht unter anderem dadurch, dass paradigmatische Problemlösungen als Modelle für die darauf aufbauende Forschungstradition dienen.

Nach der Etablierung eines Paradigmas beginnt die sogenannte „*normale Wissenschaft*“. Diese lässt sich grundsätzlich dadurch kennzeichnen, dass bestimmte Elemente des wissenschaftlichen Wissens

¹⁵⁹ Kuhn (1976).

¹⁶⁰ Hier muss man weiter differenzieren: So geht es Kuhn um eine Untersuchung von „basic science“, d.h. reine Wissenschaft im dem Sinn, dass die Wahl der Forschungsthemen durch innerwissenschaftliche Überlegungen bestimmt ist. Der englische Ausdruck „science“ ist im Übrigen nicht äquivalent zum deutschen Term „Wissenschaft“. Ersterer bezeichnet insbesondere die Natur- und (systematischen) Sozialwissenschaften. Weiter will Kuhn die Entwicklung der Wissenschaft im epistemischen Sinn untersuchen. Grob könnte man sagen, dass die epistemische Wissenschaft durch den Inhalt wissenschaftlicher Publikationen charakterisiert ist. (vgl. Hoyningen-Huene (1989), S. 15-19).

¹⁶¹ Kuhn verwendete ursprünglich den Begriff „vorparadigmatische Phase“. Da die Verwendung des Paradigmenbegriffs durch Kuhn einigen Veränderungen unterlag, verwenden wir den Sprachgebrauch von Hoyningen-Huene, der diese Phase als „vornormal“ bezeichnet (Hoyningen-Huene (1989), S. 185-189).

¹⁶² Kuhn (1976), S. 28/29.

¹⁶³ Kuhn (1976), S. 10.

¹⁶⁴ Kuhn (1976), Postskript.

¹⁶⁵ Hoyningen-Huene (1989), Kap. 4.

nicht zur Disposition stehen. Oder bildlich gesprochen: der durch das Paradigma vorgegebene Rahmen wird nicht verlassen. Kuhn verwendet für die Tätigkeit des Wissenschaftlers in der normalen Phase die Analogie des Rätsellösens. Das Paradigma konstituiert gewissermassen die Reglementierung, mit welcher das Forschungsgebiet untersucht werden soll. Es garantiert ausserdem, dass der Forscher erwarten kann, dass die untersuchten Probleme eine Lösung haben. Deshalb die Analogie zum Rätsellösen.¹⁶⁶ Während der normalen Phase werden im entsprechenden Gebiet grosse Fortschritte erzielt in dem Sinn, dass die vorherrschende Theorie präzisiert und ausgefeilt wird. Hingegen ist es nicht das Ziel, die leitende Theorie im Popperschen Sinn zu falsifizieren. Gerade dieser Punkt wurde Kuhn vor allem zu Beginn der Debatte um Kuhns Modell von „Popperianern“ vorgeworfen. Auf die genaue Kritik gehen wir aber nicht ein.

Während des Forschungsprozesses in der Normalwissenschaft tauchen nach dem Modell von Kuhn sogenannte *Anomalien* auf, d.h. Situationen, die den bestehenden Erwartungen zuwiderlaufen. Dies ist an sich eine undramatische Begleiterscheinung des Forschungsprozesses, denn jede Theorie ist mit solchen Anomalien konfrontiert. Es gibt nun Gründe, die einige Forscher den Schluss ziehen lassen, dass die Anomalien zu grundsätzlichen Problemen für das entsprechende Gebiet führen, z.B. wenn quantitative Diskrepanzen auftreten oder wenn Anomalien den Forschungsanstrengungen auch bedeutender Fachleute widerstehen. Einige Forscher beginnen dann, das vorherrschende Paradigma in Frage zu stellen, das Paradigma gerät in eine Krise. Meistens sind es Leute, die jünger sind bzw. noch nicht so lange im entsprechenden Gebiet arbeiten, und deshalb eher bereit sind, das vorherrschende Paradigma in Frage zu stellen. Es beginnt die Phase der ausserordentlichen Wissenschaft, nicht selten geprägt durch unerwartete Entdeckungen.¹⁶⁷ Diese kann auf drei Arten zu Ende gehen: So können sich die Anomalien innerhalb der geltenden Reglementierungen als auflösbar erweisen. Weiter kann sich zeigen, dass man die Anomalien vorläufig schubladisieren kann, im Vertrauen darauf, dass sie sich dereinst auflösen lassen. Schliesslich kann es zu einem Wechsel der leitenden Theorie kommen, einem „*Paradigmenwechsel*“ oder einer „*wissenschaftlichen Revolution*“.

Während dieser „*Revolution*“ muss man sich gewissermassen zwischen zwei Theorien entscheiden. Die ältere (bzw. das ältere Paradigma) hat zwar für viele Probleme Lösungen gefunden, muss sich aber mit wesentlichen Anomalien herumschlagen. Die neuere Theorie¹⁶⁸ verheisst Lösungen für diese Anomalien und muss zumindest auch plausibel machen, dass sie mit den bereits bekannten (durch die ältere Theorie gelösten) Problemen umgehen kann. Dennoch ist nicht gesagt, dass die noch nicht ausgearbeitete, neue Theorie wirklich „besser“ ist, als die alte. In dieser Situation ist es also nicht „irrational“, an der alten Theorie festzuhalten. Der Diskurs zwischen den Anhängern der verschiedenen Theorien ist aber mit einigen Schwierigkeiten behaftet. Zentral ist dabei die von Kuhn behauptete „*Inkommensurabilität*“ der Theorien. Kuhns Konzeption dieses sehr kontrovers diskutierten Begriffs hat sich im Laufe der Zeit geändert.¹⁶⁹ Heute bringt er diese offenbar mit einer behaupteten Nichtübersetzbarkeit zweier Theorien in Verbindung.

Eine wissenschaftliche Revolution führt schliesslich zur Etablierung eines neuen Paradigmas und damit zu einer neuen Normalwissenschaft. Vergleicht man diese mit der vorherigen, so zeigt sich die von Kuhn geforderte Inkommensurabilität in drei Aspekten: Erstens ändert sich der Bereich der notwendigerweise bzw. legitimerweise zu bearbeitenden Probleme. Zweitens ändern sich bestimmte experimentelle oder theoretische Verfahren und einige zentrale Begriffe. Drittens schliesslich ändert sich mit einer Revolution auch die Welt, in der Forscher ihre Wissenschaft betreiben. Vor allem der letzte Punkt hat Widerspruch hervorgerufen, den wir hier aber nicht weiter erläutern können. Kuhn argumentiert damit für eine „*Pluralität der Erscheinungswelten*“, wobei die Erscheinungswelten durch die vorherrschenden

¹⁶⁶ Die Analogie besteht insgesamt aus fünf Aspekten, wie Hoyningen-Huene (1989) darlegt (S. 168-177).

¹⁶⁷ Die „*ausserordentliche Wissenschaft*“ lässt sich mit einer Reihe von Symptomen charakterisieren, vgl. dazu Hoyningen-Huene (1989), S. 228.

¹⁶⁸ Die Rede von einem „*neuen Paradigma*“ scheint zu diesem Zeitpunkt noch nicht angemessen, da beide Theorien unterschiedlich ausgearbeitet sind.

¹⁶⁹ Vgl. dazu Hoyningen-Huene (1989), S. 202-217.

Paradigmata mitbestimmt sind. Die Unterscheidung zwischen Erscheinungswelt(en) und Welt an sich ist für das Verständnis der Kuhnschen Position zentral.

Trotz dieser Inkommensurabilität sind zwei Aspekte zu beachten: Erstens ist damit nicht gesagt, dass die Anhänger verschiedener Paradigmen überhaupt nicht miteinander sprechen können und der Übergang zwischen zwei Paradigmen nur mittels Propaganda, Bekehrung und dergleichen geschieht.¹⁷⁰ Es existieren aber eine Reihe von Schwierigkeiten, die diesen Diskurs prägen.¹⁷¹ Zweitens ist damit nicht gesagt, dass es keinen wissenschaftlichen Fortschritt gibt. Im Gegenteil, die vorgeschlagene neue Theorie muss die Problemlösekapazität der alten im wesentlichen reproduzieren, damit sie überhaupt eine Chance hat, von der Wissenschaftlergemeinschaft akzeptiert zu werden. Auch im Kuhnschen Modell gibt es also einen wissenschaftlichen Fortschritt. Hingegen lässt sich gemäss Kuhn nicht sagen, dass sich die Wissenschaft immer mehr der „einen wahren Theorie“ annähert.

Im Unterschied zum früheren Gebrauch des Begriffs „wissenschaftliche Revolution“ (z.B. der Übergang zum kopernikanischen Weltbild zu Beginn der Neuzeit) sieht Kuhn solche schon bei Änderungen in relativ kleinen wissenschaftlichen Gemeinschaften. Wissenschaftliche Revolutionen können also schon dann auftreten, wenn ein Fachgebiet betroffen ist, in welchem nur wenige Forscher arbeiten.¹⁷² Dieser Punkt erscheint uns nicht sehr plausibel, wir können an dieser Stelle aber nicht weiter darauf eingehen.

Die Thesen Kuhns haben eine grosse Debatte angestiftet, die wir hier nicht weiter ausführen können. Für unsere Ziele stellt sich jetzt die Frage, inwieweit die Entstehung der Komplexitätsforschung in das Kuhnsche Modell der Wissenschaftsentwicklung eingepasst werden kann.

3.2. Kein Paradigma Komplexität?

Dass mit dem Aufkommen der Komplexitätswissenschaft eine „wissenschaftliche Revolution“ stattgefunden hat, wird von verschiedener Seite behauptet. Betrachten wir dazu die Ansichten einiger Autoren, die sich der Frage, inwieweit Komplexität als neues Paradigma gelten könne, gestellt haben.

Reiner Hedrich sieht in der Entstehung der Komplexitätsforschung eine „strukturwissenschaftliche Revolution“.¹⁷³ Diese könne aber nicht vollständig im Kuhnschen Rahmen verstanden werden, vor allem weil es sich bei der Komplexitätsforschung nicht um ein homogenes Feld handelt. Hedrich sieht vielmehr einen Gestaltwechsel in den strukturwissenschaftlichen Grundlagen der empirischen Wissenschaften. Damit ist gemeint, dass nichtlineare Zusammenhänge in der Mathematik (in der Terminologie von Hedrich eine Strukturwissenschaft) an Bedeutung gewonnen haben, einhergehend mit der Revision des starren Determinismus.

Frank Mussmann sieht zwar ebenfalls einen Paradigmenwechsel im Sinne von Kuhn, von einer eigentlichen „wissenschaftlichen Revolution“ könne aber nicht gesprochen werden.¹⁷⁴ Mussmanns Wortwahl ist in diesem Zusammenhang übrigens heikel, denn im Sinne Kuhns ist ein Paradigmenwechsel nichts anderes als eine wissenschaftliche Revolution. Gemäss Mussmann ist das neue (Selbst-organisations-) Paradigma¹⁷⁵ als Ergänzung des bisherigen naturwissenschaftlichen Programms anzusehen. Demnach ist die Revolutionsmetapher auch systematisch unangemessen, da die verschiedenen Selbstorganisationstheorien an den Rändern ihrer jeweiligen Fächer entstanden sind. Es werden primär neue Phänomenklassen untersucht, nicht die bisherigen in einem neuen Licht gesehen, so Muss-

¹⁷⁰ Feyerabend (1983) hingegen betont diesen Punkt viel stärker.

¹⁷¹ Vgl. dazu Hoyningen-Huene (1989), S. 245-251.

¹⁷² Kuhn (1976), S. 62f.

¹⁷³ Hedrich (1994), S. 150-155.

¹⁷⁴ Mussmann (1995), S. 339/340.

¹⁷⁵ Wir erinnern hier daran, dass Mussmann verschiedene Selbstorganisationstheorien untersucht hat, die gemäss unserer Terminologie in das Projekt Komplexitätsforschung eingebunden sind. Der Gebrauch des Terminus „Selbstorganisation“ führt also nicht zu Problemen.

mann. Aufgrund dieser Charakterisierung ist es aber fraglich, warum Mussmann überhaupt noch behauptet, es handle sich beim Aufkommen der Selbstorganisationsforschung um einen Paradigmenwechsel im Sinn Kuhns. Unseres Erachtens lassen seine Argumente gerade den gegenteiligen Schluss zu.

Rainer Paslak schliesslich sieht im Aufkommen einer Wissenschaft vom Komplexen einen Paradigmenwechsel von kopernikanischem Ausmass, vom Status her höher einzuschätzen als die physikalische Revolution zu Beginn dieses Jahrhunderts mit der Entwicklung der Relativitäts- und der Quantentheorie.¹⁷⁶ Er bringt die Metapher von einer „neuen Sicht der Natur“ im Zusammenhang mit der Entstehung der Selbstorganisationsforschung (in unserer Terminologie ein Teilprojekt der Komplexitätsforschung) und scheint damit eine Bedingung für die Adäquatheit der Redeweise von einem Paradigmenwechsel zu erfüllen. Im Zentrum liegt die Idee des sich spontan selbstorganisierenden Universums. Wir können an dieser Stelle Paslaks Ansichten nicht umfassend kritisieren. Unserer Ansicht ist sie aber an mehreren Stellen problembeladen. So ist es falsch zu behaupten „die Suche nach universellen Gesetzmässigkeiten (...) [werde bei der Selbstorganisationsforschung] zweitrangig“.¹⁷⁷ Die Explikation des Prinzips Selbstorganisation führt unserer Ansicht nach ja gerade zu einer universellen Gesetzmässigkeit. Die Rede von einer „Revolution kopernikanischen Ausmasses“ erscheint bei Paslak als Element der Propaganda.

Diese drei Positionen machen deutlich, dass über das Ausmass der „wissenschaftlichen Revolution“ beim Aufkommen der Komplexitätsforschung Unklarheit herrscht. Vor allem populäre Schriften propagieren die Wichtigkeit des neuen Paradigmas Komplexität (vgl. auch Teil IV, Abschnitt 4). Andererseits scheinen die verhältnismässig umfassenden Untersuchungen von Hedrich und Mussmann darauf hinzuweisen, dass entsprechende Vorstellungen relativiert werden müssen.

Auch wir sind der Ansicht, dass die Rede von einer wissenschaftlichen Revolution unangemessen ist. In erster Linie ist es zu früh, abzuschätzen, welcher Wandel innerhalb des wissenschaftlichen Weltbildes durch das Aufkommen der Komplexitätsforschung tatsächlich zustande kommen wird. Dazu ist die Situation derzeit noch zu widersprüchlich, wie sich auch bei der Analyse des Forschungsprogramms der Komplexitätswissenschaft (Teil IV, Abschnitt 1.2) zeigen wird. Wir schlagen deshalb vor, derzeit von einem „Paradigma Komplexität“ noch nicht zu sprechen.

¹⁷⁶ Paslack (1991), S. 1, 85, 181/182. Ähnliche Ansichten vertritt auch Eilenberger (1990).

¹⁷⁷ Paslak (1991), S. 2.

Teil III

Konzepte von Komplexität

Die Suche nach einer präziseren Charakterisierung von Komplexität und insbesondere nach einem Mass für Komplexität ist nicht ein Privileg der Komplexitätsforschung. Vielmehr finden sich in verschiedenen „klassischen“ naturwissenschaftlichen Disziplinen entsprechende Versuche. Solche Definitionen einer quantitativen Komplexität sind dabei meist auf einen präzisen Anwendungsbereich zugeschnitten. In der Systemtheorie hingegen sucht man nach einem möglichst universal brauchbaren Komplexitätsbegriff; ein Anliegen, das später auch die Komplexitätsforschung aufnimmt. Dabei ist auch erstmals von Emergenzkomplexität die Rede.

In Teil III stellen wir möglichst umfassend verschiedene Konzepte von Komplexität vor. Unter dem Begriff „Konzept“ verstehen wir dabei sowohl das Komplexitätsmass selbst als auch die Charakterisierung der Umstände, unter welchen dieses angewendet werden soll. Auf den Komplexitätsbegriff der Komplexitätsforschung werden wir explizit erst in Teil IV eingehen. Weiter muss auf das schon angesprochene Abgrenzungsproblem hingewiesen werden. So lassen sich manche der hier vorgestellten Forschungsgebiete durchaus auch der Komplexitätswissenschaft zuordnen.

1. Ein kurzer Blick auf die Philosophie

In verschiedenen philosophischen Disziplinen hat man sich um ein besseres Verständnis des Komplexitätsbegriffs bemüht bzw. die Möglichkeit der Anwendung dieses Konzeptes untersucht. Es herrscht Konsens, dass „Komplexität“ und „Einfachheit“ als gegensätzliches Begriffspaar verwendet werden sollen. Neben Fragestellungen, die der analytischen Philosophie zuzuordnen sind, finden sich auch wissenschafts- bzw. erkenntnistheoretische Probleme. Dabei geht es einerseits um das Verhältnis von einfachen bzw. komplexen Theorien zu deren Wahrheitsgehalt. Andererseits wird die Frage gestellt, inwieweit Komplexität mit Grenzen des menschlichen Erkenntnisvermögens zusammenhängt. Um all diese Fragen umfassend zu beantworten, müsste ein Aufwand geleistet werden, der hier nicht erbracht werden kann. Es geht hier in erster Linie darum, die in der Philosophie diskutierten Probleme anzuschneiden. Dies lässt sich damit rechtfertigen, dass die hier angesprochenen Problemkreise nicht direkt mit der Komplexitätsforschung zusammenhängen.

Bunges grundlegende Unterscheidung: Während es die Aufgabe der Naturwissenschaften ist, empirische Aspekte der Welt zu untersuchen, hat die Philosophie nach dem „linguistic turn“ zu Beginn dieses Jahrhunderts ihr Augenmerk vermehrt auf die Sprache geworfen. Entsprechend dieser Feststellung unterscheidet *Mario Bunge* zwischen zwei Arten von Komplexität: ontologische Komplexität (jene materialer Objekte) und semiotische Komplexität (jene idealer Objekte wie Begriffe und Theorien).¹⁷⁸ In den ersten Bereich fallen die Bemühungen der Naturwissenschaft, ein Mass für Komplexität zu suchen. Der zweite hingegen ist die Domäne der analytischen Philosophie. In dieser hat seit den 50er Jahren eine Diskussion um die Begriffe „Komplexität“ bzw. „Einfachheit“ begonnen. Eigentlich lässt sich auch die Diskussion um den Komplexitätsbegriff in der Mathematik in den Bereich der semiotischen Komplexität zuordnen, versteht man Mathematik als formale Sprache. Diese Disziplin behandeln wir jedoch separat im folgenden Abschnitt.

¹⁷⁸ Siehe Bunge (1962), S. 113 und Bunge (1963), S. 52. Bunge spricht im übrigen von ontologischer bzw. semiotischer *Einfachheit*. Da Komplexität und Einfachheit als Begriffspaar verwendet werden, können wir problemlos den ersten Terminus benutzen.

Gliederung der semiotischen Komplexität: Die Diskussion um die semiotische Komplexität muss gemäss *Mario Bunge* vier Bereiche unterscheiden: Die logische (syntaktische) Komplexität betrifft den formalen Aspekt der verwendeten Sprache, die semantische Komplexität den Aspekt der Bedeutung, die epistemische Komplexität gibt den Grad der Abstraktheit einer Aussage bezüglich der entsprechenden Sinneswahrnehmung an, und die pragmatische Komplexität schliesslich betrifft Komplexität unter dem Aspekt einer ökonomischen Arbeitsweise.¹⁷⁹ Bunge unterscheidet im weiteren verschiedene Untersuchungsobjekte. So differenziert er einerseits zwischen Termen, Propositionen, „proposals“ (es ist uns nicht klar geworden, was genau er mit diesem Begriff meint) und Theorien, andererseits spricht er davon, dass eine Untersuchung der (logischen) Komplexität mit der Analyse von Prädikaten beginnen soll.¹⁸⁰ Bunes Unterscheidung erscheint in seinem System plausibel. Andere Autoren verwenden hingegen eine abweichende Systematisierung, falls sie eine solche überhaupt einführen.

Diverse Autoren zu Komplexität: Im Folgenden geben wir einen Überblick zu verschiedenen Ansichten bezüglich der Charakterisierung der semiotischen Komplexität. Wir werden diese Zusammenstellung aus den erwähnten Gründen nicht kommentieren.

Nelson Goodman ist der Ansicht, dass ein Mass für Einfachheit (und damit für Komplexität) möglich ist und dass es keine prinzipiellen Einwände dagegen gibt, ein solches zu suchen.¹⁸¹ Er beschäftigt sich in seinem Paper mit der Einfachheit von Prädikaten. Generell ist für Goodman eine Menge von Prädikaten komplexer als eine andere, falls man mit dieser mehr ausdrücken kann. Goodmans Ansatz wurde von *John G. Kemeny* weiterentwickelt.¹⁸²

Mario Bunge beginnt seine Untersuchung ausgehend von der von ihm eingeführten Unterscheidung. Er macht eine Reihe von Vorschlägen, den Begriff „Komplexität“ zu quantifizieren, die wir hier nicht ausführen. Wesentlich ist, dass er schliesslich alle verwirft. Bunge ist der Ansicht, dass die Bestimmung der semiotischen Komplexität in allen Fällen mit diversen Schwierigkeiten verbunden ist. Oder in seinen Worten: „In short, ‘simplicity’ [und damit ‘complexity’] is a multivocal term, not all kinds of simplicity are desirable or even compatible with one another, and the theory of simplicity, though still in a very rudimentary stage, threatens to become highly complex. Moreover, the search for a single measure of over-all complexity does not seem to make much sense.“¹⁸³

I.J. Good hingegen versuchte einen neuen Ansatz zur Messung der Komplexität von Propositionen.¹⁸⁴ Er identifiziert die Komplexität einer Proposition mit der Informationsmenge, die diese enthält. Damit nimmt er den Ansatz des algorithmischen Informationsgehaltes (Teil III, Abschnitt 2.2) vorweg. Auch dieser sieht einen Zusammenhang zwischen Komplexität und Informationsmenge, wobei aber der Informationsbegriff ein anderer ist.

Mehrere Autoren haben sich zur Frage nach der Bestimmung der Einfachheit bzw. Komplexität von Theorien geäussert. *Henry E. Kyburg Jr.* etabliert diesbezüglich eine Unterscheidung zwischen der Einfachheit von Tatsachenaussagen und jener von Theorien, welche diese Fakten kodieren.¹⁸⁵ Sein Konzept sieht vor, dass die Komplexität einer Theorie durch die Anzahl der Quantoren bestimmt wird, welche in der Menge der Aussagen der Theorie vorkommen.

Diese Überlegung wird von *Robert Ackermann* angegriffen, der auf eine Reihe von Schwierigkeiten hinweist. Neben Inplausibilitäten in Kyburgs Gegenargument zu Nelson Goodmans Begriff der Einfachheit weist er auf die grundlegende Schwierigkeit hin, die Theorie für ein bestimmtes Phänomen mit mi-

¹⁷⁹ Wir gehen nicht darauf ein, inwieweit diese Unterscheidung gerechtfertigt ist bzw. ob sich Probleme stellen. Eine ausführliche Darstellung der Unterscheidung findet sich in Bunge (1962) und Bunge (1963), S. 51-84.

¹⁸⁰ Bunge (1962), S. 114. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass diese Unterscheidung vom philosophischen Standpunkt abhängig ist. So wird etwa diskutiert, ob es überhaupt sinnvoll ist, von Propositionen zu sprechen. Auf diese Diskussion wollen wir nicht weiter eingehen.

¹⁸¹ Goodman (1955), S. 709.

¹⁸² Kemeny (1955).

¹⁸³ Bunge (1962), S. 135.

¹⁸⁴ Good (1968) und Good (1974).

¹⁸⁵ Kyburg Jr. (1961).

nimaler Anzahl Quantoren tatsächlich zu finden: „(...) no decision procedure for determining when we have theories expressed with their minimal number of quantifiers seems available (...)“¹⁸⁶.

Karl Popper schliesslich bestimmt die Komplexität einer Theorie durch die Mindestzahl der zur Widerlegung dieser Theorie erforderlichen atomaren Sätze.¹⁸⁷ Damit kann man die Einfachheit einer Theorie mit ihrem Falsifizierungsgrad in Beziehung setzen, obgleich er damit Einfachheit nicht definiert haben möchte, wie er selbst feststellt.¹⁸⁸

Komplexität und Wahrheit: Die Komplexität – oder in diesem Kontext wohl besser die Einfachheit – von Theorien hat auch einen Zusammenhang mit der Frage nach deren Wahrheit. So gilt einmal das bereits vorgestellte methodologische Prinzip, dass einfachere Theorien gegenüber komplexeren vorgezogen werden sollen, wenn beide gleich gut empirisch bestätigt sind. *John G. Kemeny* etablierte in diesem Zusammenhang eine „rule of simplicity“, welche die Richtigkeit dieses Prinzips begründen soll.¹⁸⁹

Dass Einfachheit ein *Kriterium* für Wahrheit sein soll, wird aber meist bestritten. *Willard van Orman Quine* macht deutlich, dass die Einfachheit einer Theorie über deren Wahrheit nichts aussagt und dass ausserwissenschaftliche Gründe oft für die einfachere Theorie sprechen. Er sieht „four causes for supposing that the simpler hypothesis stands the better chance of confirmation. There is wishful thinking. There is a perceptual bias that slants the data in favor of simple patterns. There is a bias in the experimental criteria of concepts, whereby the simpler of two hypothesis is something opened to confirmation while its alternative is left inaccessible. And finally there is a preferential system of scorekeeping, which tolerates wider derivations the simpler the hypothesis.“¹⁹⁰

Entsprechend äussert sich auch *Mario Bunge*: Einfachheit kann kein Test für die Wahrheit einer Theorie sein. Wissenschaftler neigen höchstens dazu, Einfachheit als ein Symptom einer wahren Theorie zu sehen. Es gilt aber: „The simpler the theoretical model, the coarser or more unrealistic it will be.“¹⁹¹

Peter Turney will hingegen Einfachheit so definiert sehen, dass diese in der Tat als Hinweis für die Wahrheit von Theorien gelten kann. Er versucht dies, indem er eine Verbindung zwischen einer Theorie und einem Algorithmus schafft. Dieser soll dann als einfach gelten, wenn der gerichtete Graph, welcher den Algorithmus modelliert, stabil ist.¹⁹²

Dieser kurze Überblick macht deutlich, dass man eine klare Vorstellung über den Begriff der Einfachheit bzw. der Komplexität einer Theorie haben muss, will man die Beziehung zwischen einer einfachen und einer wahren Theorie untersuchen.

Komplexität und die Grenze des Erkennbaren: Schliesslich stellen sich manche Autoren im Zusammenhang mit dem Begriff der Komplexität (in diesem Fall ontologische Komplexität) die Frage nach der Grenze des wissenschaftlichen Erkenntnisvermögens überhaupt. Dabei muss man sehen, dass mit dieser Frage sehr schwierige Probleme verbunden sind, die an dieser Stelle keinesfalls alle angesprochen werden können. Wir stellen hier lediglich die Ansichten einiger Autoren vor, ohne abschliessend auf den Zusammenhang zwischen Komplexität und Grenzen der Erkenntnis einzugehen.

Der Kybernetiker *W. Ross Ashby* meint, es sei gar nicht möglich, komplexe Systeme in einem üblichen Sinn zu verstehen, „for if ‘understanding’ a system means having available a model that is isomorphic with it (...)“¹⁹³. Entsprechend kann es auch nicht das Ziel der Erforschung komplexer Systeme sein, diese

¹⁸⁶ Ackermann (1962), S. 238.

¹⁸⁷ Popper (1989), S. 100/101, 330.

¹⁸⁸ Einen weiteren Autor wollen wir an dieser Stelle noch kurz erwähnen: *Ludwig Wittgenstein* trifft in seiner Ontologie die Unterscheidung zwischen „atomaren“ und „komplexen“ Sachverhalten. Letztere bezeichnet er auch als „Sachlage“. Die Explikation der Wittgensteinschen Terminologie können wir hier aber nicht leisten, vergleiche dazu Stegmüller (1989), S. 529f.

¹⁸⁹ Kemeny (1953).

¹⁹⁰ Quine (1964), S. 49/50.

¹⁹¹ Bunge (1963), S. 112.

¹⁹² Turney (1989).

¹⁹³ Ashby (1958b), S. 97. Damit formuliert er ein sehr restriktives Kriterium für das Verständnis eines Systems. Isomorphie im strengen Sinn ist nur selten gegeben.

in diesem Sinn zu verstehen. Vielmehr geht es um die Suche nach Kontrollmöglichkeiten für solche Systeme, stellt Ashby fest.¹⁹⁴

Ähnlich äussern sich auch *William Bechtel* und *Robert C. Richardson*: Wissenschaftler, die komplexe Systeme analysieren, suchen nicht nach allgemeinen Gesetzen, sondern versuchen vielmehr, kausale Komponenten solcher Systeme zu finden, welche für das Verhalten des Systems verantwortlich sind.¹⁹⁵ Dieses Unterfangen wird in komplexen Systemen dadurch erschwert, dass die funktionale Abhängigkeit der Komponenten schwer zu durchschauen ist. Oder noch schlimmer: „Complex Systems are computationally, as well as psychologically unmanageable for humans.“¹⁹⁶ Gerade in solchen Systemen ist man deshalb geneigt, von Emergenz zu sprechen. Das Nichtverstandene wird als das Emergente eingeführt.

Friedrich Cramer führt im Zusammenhang mit der Schranke des Erkennbaren die „fundamentale Komplexität“ ein. Er bringt diese mit einer nicht vorhandenen Prognostizierbarkeit des Systems in Beziehung.¹⁹⁷ Ein System ist fundamental-komplex, wenn die Anzahl der zu bestimmenden Parameter grösser wird als die Möglichkeit, diese zu messen.¹⁹⁸ Weiter sind fundamental-komplexe Systeme „mehr als die Summe ihrer Teile“; wir sind also erneut mit der Emergenzproblematik konfrontiert. Wir werden später sehen, dass eine Verbindung von Nichterklärbarkeit und Emergenz schwierige Probleme mit sich bringt. Vor allem ist unklar, ob Emergenz in diesem Fall überhaupt ein verständliches Konzept darstellt.

Heinz Pagels sieht im Zusammenhang mit dem Hirn-Geist-Problem eine „Komplexitätsbarriere“.¹⁹⁹ Damit meint er, dass das Gehirn nur durch sich selbst simultabel sei, eine sehr schwer verständliche Aussage. Selbst wenn die vollständige Hirntheorie bekannt sei, kann man keine Voraussagen über das Verhalten des Gehirns machen, so Pagels. Für das Hirn-Geist-Problem ist deshalb ein „epistemischer Dualismus“ angebracht. Wir müssen aber feststellen, dass die Argumentation alles andere als ausgereift ist. So bringt Pagels als Beispiel eines nichtsimulierbaren Systems das Wetter, da dessen chaotische Dynamik Vorhersagen ab einem bestimmten Punkt verunmöglicht. Inwiefern müssen wir aber bei diesem Phänomen „epistemische Dualisten“ sein? Weiter gibt seine Komplexitätsbarriere keinen Aufschluss über das Verhältnis von Hirn und Geist bzw. wie letzteres aus ersterem entsteht. Das ist der Kern des Hirn-Geist-Problems und nicht die Voraussagbarkeit des Hirnverhaltens (und damit jene des Geistes).

F. Eugene Yates ist der Ansicht, dass Komplexität primär aus praktischen Gründen der Erkennbarkeit Grenzen setzt. Die Limitierungen durch die Komplexität eines Systems sind von den fundamentalen Limitierungen – etwa gegeben durch die Heisenbergsche Unschärferelation oder Gödels Unvollständigkeitstheorem – zu unterscheiden. Um Komplexität selbst zu charakterisieren, liefert Yates hingegen eine Auswahlendung, von Nichtlinearität bis hin zum Auftreten emergenter Eigenschaften. Da stellen sich sofort ganz verschiedene Fragen: Nichtlinearität etwa hat primär Auswirkungen auf die Prognostizierbarkeit der Dynamik. Erklärbarkeit und Prognostizierbarkeit sind aber voneinander zu unterscheiden. Bei den „emergenten Eigenschaften“ stellt sich sofort die Frage nach dem verwendeten Emergenzbegriff. Yates versöhnliche Schlussfolgerung: „I conclude that our understanding of complexity will continue to be what it now is – a mixture of detailed facts, conflicting viewpoints, evolving theories, simulations, models, and ultimate limitations that are either absolute in principle, or insurmountable in practice.“²⁰⁰

¹⁹⁴ Ashby sieht im übrigen in einem von ihm formulierten „law of requisite variety“ eine Grenzsetzung für das Verständnis komplexer Systeme. Dieses Gesetz besagt, dass eine grosse Anzahl von Wechselwirkungen eines Systems mit seiner Umwelt nötig ist, um die Vielfalt der verschiedenen Umweltbedingungen auf die kleinere Zahl erlaubter Systemzustände zu reduzieren. Je weniger Systemzustände erlaubt sind, desto mannigfaltigere Arten der Wechselwirkung eines Systems mit seiner Umwelt muss es geben. Näheres dazu in Ashby (1958b).

¹⁹⁵ Bechtel et al. (1993), S. xi.

¹⁹⁶ Bechtel et al. (1993), S. 27.

¹⁹⁷ Cramer (1988), S. 223. Siehe auch Cramer (1979). Neben der fundamentalen Komplexität differenziert Cramer zwischen einer subkritischen und einer kritischen Komplexität. Subkritische Komplexität liegt in Systemen vor, in denen zwar eine gewisse Vielfalt herrscht, die jedoch durch mathematische Gesetze so vereinfachbar sind, dass die Systeme deterministisch verstanden werden können. Bei kritischer Komplexität sind Strukturbildungen erkennbar. Der Prognostizierbarkeit sind zwar praktische, aber keine fundamentalen Beschränkungen gesetzt. (Cramer, 1988, S. 279/280).

¹⁹⁸ Cramer (1979), S. 138.

¹⁹⁹ Pagels (1988), Kapitel 10.

²⁰⁰ Yates (1978), S. R203.

Friedrich August von Hayek schliesslich hat in einer bekannt gewordenen Arbeit ebenfalls auf Grenzen der Erkenntnis bei komplexen Systemen hingewiesen. Wir stellen diese im Folgenden genauer vor:

Friedrich August von Hayek und das komplexe Phänomen:²⁰¹ Die von *Friedrich August von Hayek* ursprünglich 1961 verfasste Untersuchung „The Theory of Complex Phenomena“ gehört zu den ersten Arbeiten, die den Begriff der Komplexität auf einer grundsätzlichen Ebene untersucht. Von Hayek beginnt diese, indem er die Bedeutung von Mustern (bzw. Regelmässigkeiten, engl. „pattern“) bei bestimmten Naturphänomenen betont, die für die Ausformulierung von wissenschaftlichen Fragestellungen notwendig sind. Abgesehen von sehr einfachen Fällen bedarf es immer einer Art theoretischer Idee eines Musters, um Phänomene als solche klassifizieren zu können.²⁰² Eine Theorie definiert eine Klasse von Mustern, wobei die Randbedingungen dann zu den entsprechenden individuellen Phänomenen führen. Diese bezeichnet von Hayek als Daten.

Um ein quantitatives Mass für die Komplexität eines Musters anzugeben, definiert von Hayek als Grad der Komplexität die Mindestanzahl der Elemente des Musters, aus der ein Einzelfall des Musters bestehen muss, um sämtliche charakteristischen Eigenschaften dieser Klasse von Mustern aufzuweisen. Die Komplexität bringt von Hayek im weiteren auch mit der „Organisation“ von Phänomenen in Verbindung, ohne diesen zweifellos wichtigen Gedanken auszuführen. Von Hayeks Ansatz zielt also in die Richtung, dass die benötigte Informationsmenge zur Beschreibung von Mustern als Mass der Komplexität dienen soll. In seiner Formulierung ist hingegen die praktische Anwendbarkeit des Komplexitätsmasses nur schwer ersichtlich.

Aufgrund dieser Begriffsbestimmung zeigt von Hayek auf, warum komplexe Phänomene vor allem in den Bereichen Biologie, Sozial- und Geisteswissenschaften auftreten. Dies liegt daran, dass die Basiselemente komplexer sind als etwa jene in der Physik. Physikalische Phänomene zeichnen sich dadurch aus, dass man sie mittels relativ einfacher Formeln ausdrücken kann. Von Hayek geht sogar so weit, jene Phänomene physikalisch zu nennen, die mittels einfacher Formeln ausdrückbar sind. Hier kann man von Hayek entgegenhalten, dass komplexe Phänomene auch dann auftreten können, wenn die Basiselemente einfach sind. Gerade diese Entdeckung war eine wichtige Motivation für die Komplexitätsforschung. Die zentralen wissenschaftlichen Ergebnisse dazu konnten von Hayek aber noch kaum bekannt sein, da die entsprechende Forschung erst in den 60er Jahren begann. Weiter weisen wir auf jene Autoren hin, die bezweifeln, dass beispielsweise die Basisphänomene in den Sozialwissenschaften wirklich komplexer sind als etwa in der Physik (vgl. Teil I, Abschnitt 4.1).

Bei komplexen Phänomenen ist die Mindestanzahl der charakterisierenden Elemente eines Musters sehr gross, so dass man zuweilen gar nicht sicher sein kann, ob man alle Daten gefunden hat. Gerade deshalb ist es gemäss von Hayek irrig zu glauben, dass eine Theorie komplexer Phänomene dieselbe Struktur haben kann wie etwa die Physik. Man muss annehmen, dass eine solche Theorie lediglich Prognosen über das Auftreten bestimmter Muster machen kann, während der konkrete Einzelfall bzw. das Phänomen nicht vorausgesagt werden kann. Mit anderen Worten lassen sich also die spezifischen Randbedingungen offenbar nicht prognostizieren, die zum individuellen Phänomen führen, bzw. die Theorie erfasst nicht alle relevanten Randbedingungen.

Als Paradebeispiel einer solchen Theorie komplexer Phänomene bezeichnet von Hayek die Evolutionstheorie. Diese beschreibt, wie die verschiedenen Phänomene (d.h. Arten) entstehen. Voraussagen aber, welche diese in Zukunft sein werden, sind nicht möglich.

Man kann dabei aber nicht vermeiden, dass der Grad der Falsifizierbarkeit bei Theorien komplexer Phänomene notwendigerweise abnimmt. Auch die Idee des Gesetzes – d.h. die Regel, welche zwei Phänomene aufgrund des Kausalitätsprinzips verbindet – findet in einer Theorie komplexer Phänomene keine Anwendung. Im Gegenteil, die Suche nach Gesetzen könnte sich in diesem Fall als schädliches methodologisches Prinzip erweisen. Die Argumentation erscheint unserer Ansicht nach in diesem Punkt aber zuwenig ausgeführt. Schliesslich ist auch gemäss von Hayek eine Anwendung statistischer Methoden im Bereich komplexer Phänomene mit Problemen beladen. Dies deshalb, weil die Statistik

²⁰¹ Folgende Ausführungen basieren auf von Hayek (1972).

²⁰² Im Sinn von Popper (1989) kann man auch – wie von Hayek selbst anführt – von einer theoriegeladenen Beobachtung sprechen: „Beobachtung ist stets *Beobachtung im Licht von Theorien*“, III Kapitel, 1. Anmerkung.

die Individualität und die Organisiertheit der Phänomene missachtet, was aber die Komplexität von Mustern wesentlich ausmacht.²⁰³

In von Hayeks Argumentation besitzt der Komplexitätsbegriff also letztlich die Funktion eines Trennungskriteriums zwischen Wissenschaften über einfache Phänomene und solchen über komplexe Phänomene. Die Aussagekraft von Theorien in letzteren sind prinzipiell unpräziser. Diese Trennungslinie zieht er gleichsam „klassisch“ zwischen Physik einerseits, Biologie, Soziologie und Wirtschaftswissenschaften andererseits. Heutzutage müssen wir erkennen, dass sich in allen Disziplinen einfache wie komplexe Aspekte im Sinne von Hayeks finden. Wesentlich an seinem Gedanken ist, dass Theorien über Komplexes einen anderen Status haben könnten als solche über Einfaches.

Unsere kleine Zusammenstellung ist sicher etwas unbefriedigend. Dies hängt damit zusammen, dass die Frage nach der Grenze des wissenschaftlich Erkennbaren sicher keine einfache ist. Der Einbezug der Komplexität verlangt sofort nach einer Explizierung dieses Begriffs. Dabei landet man bald einmal bei der Emergenzkomplexität und bei den mit der Emergenzfrage zusammenhängenden Problemen.

2. Wissenschaftliche Gebiete mit einem nichttrivialen Konzept von Komplexität

In den folgenden Ausführungen werden primär naturwissenschaftliche Disziplinen untersucht. Auf die Sozial- und Wirtschaftswissenschaften gehen wir nur am Rande ein. Weiter werden wir nicht alle vorgeschlagenen Komplexitätsmasse formal umfassend vorstellen. Abschnitt 2 dient in erster Linie dazu, die Heterogenität der verschiedenen Komplexitäts-Konzepte und deren Anwendungsbereich aufzuzeigen.

2.1. Mathematik

Formalwissenschaften wie die Mathematik haben den Vorteil, dass Fragestellungen meist exakt formuliert werden können. Entsprechend lässt sich auch das Konzept Komplexität meist problemlos einführen bzw. definieren. Innerhalb der Mathematik existieren für verschiedene Bereiche Definitionen für quantitative Komplexität, die wir im Folgenden aber nur kurz vorstellen. Details können in der angegebenen Literatur nachgeschlagen werden. Wir beschränken uns deshalb, weil die hier vorgestellten Komplexitätsmasse in der eigentlichen Komplexitätsforschung praktisch nicht auftreten. Auf die fraktale Geometrie haben wir schon in Teil II, Abschnitt 1.5 hingewiesen. Einen Anspruch auf einen vollständigen Überblick über Komplexitätsmasse in der Mathematik haben wir nicht.

Komplexität in der Mathematik: In der Katastrophentheorie ist die Rede von der *topologischen Komplexität* einer Form. René Thom hat diese als geometrisches Äquivalent zur Shannon-Entropie eingeführt. Die konkrete Umsetzung dieser Idee ist offenbar aber mit Schwierigkeiten verbunden. Thom meint: „Unfortunately it is difficult with the present state of topology, to give a precise definition of the complexity of a form.“ Wir haben nicht nachgeprüft, wie der derzeitige Stand in der Topologie bezüglich der Definition der topologischen Komplexität ist.²⁰⁴

A.A. Brudno arbeitet im Gebiet der dynamischen Systeme. Er definierte ein Mass für die *Komplexität einer Trajektorie* eines solchen Systems.²⁰⁵ Dieses gilt als Alternative für „klassische Masse“ wie die Kolmogoroff-Entropie (vgl. Einschub „Entropie“ in Abschnitt 2.3 in diesem Teil).

²⁰³ Modernere Ansätze benutzen zur Modellierung komplexer Systeme aber durchaus Mittel aus der Stochastik. Doering (1991) schreibt: It is often useful then, in the modelling process, to lump all of these unknown, uncontrollable, and essentially stochastic factors into some noise acting on the system. In this way, at least some of the overwhelming complexity of the whole is accounted for in the description of the parts. The cost of our parody of these effects as a random noise is the sacrifice of complete predictability.“, S. 4

²⁰⁴ Für formale Aspekte siehe Thom (1989), S. 126-130.

²⁰⁵ Brudno (1978).

Innerhalb der Beweistheorie spricht man von der *Komplexität eines Beweises*, welche grob gesagt ein Mass für die Schwierigkeit darstellt, einen solchen zu führen. Dazu existieren eine Reihe verschiedener Ansätze.²⁰⁶

Jeffrey Johnson formulierte einen Versuch, komplexe Systeme mittels einer mathematischen Struktur zu fassen. Seine Grundidee geht davon aus, dass ein komplexes System aus strukturierten Mengen besteht. Die Systemaktivität wird durch definierte numerische Abbildungen auf diese strukturierten Mengen gemessen. Die relationale Struktur der Mengen schliesslich bestimmt die Dynamik des Systems, ausgedrückt durch die zuvor definierten Abbildungen.²⁰⁷

Innerhalb der Stochastik wurde das Konzept der *stochastischen Komplexität* eingeführt. Damit wird im wesentlichen ein Mass für Redundanz von Daten angegeben, die statistisch untersucht werden sollen. Je grösser die stochastische Komplexität, desto kleiner die Redundanz der Daten. Dieses Mass ist relativ zum gewählten probabilistischen Modell.²⁰⁸

Schliesslich sei hier auch die Theorie der Netzwerke erwähnt, die vor allem in der Elektronik Anwendung findet. Ansätze zur Bestimmung eines Masses für die *Komplexität von Netzwerken* stammen von A. Mowshowitz, E. Balas und R.A. Kaiman, wie Devendra Sahal ausführt.²⁰⁹ Premysl Dastych bestimmt die Komplexität eines Netzwerkes durch die Anzahl Schleifen und Zweige eines solchen.²¹⁰

2.2. Informatik

In kaum einem anderen Bereich ist die begriffliche Schärfung und Quantifizierung des Komplexitätsbegriffs so weit fortgeschritten wie in der Informatik. Die Komplexitätsforschung schöpft aus den dort gewonnenen Konzepten, worauf einige Autoren auch explizit hinweisen.²¹¹ Weiter weisen wir einmal mehr auf die Bedeutung des Computers für die Komplexitätsforschung hin sowie auf die I-Komplexitätstheorie der Informatik, welche Masse für die Schwierigkeit der Berechnung von Algorithmen bereitstellt.²¹² Ein übergreifendes Komplexitätsmass hingegen findet sich auch in der Informatik nicht.

Die I-Komplexitätstheorie: Innerhalb der Informatik hat seit Beginn der 60er Jahre ein Gebiet starken Aufschwung genommen, das heute als Komplexitätstheorie bezeichnet wird.²¹³ Diese beschäftigt sich grundsätzlich mit der Frage, mit welchem Aufwand an Berechnungsressourcen bestimmte algorithmische Aufgaben bzw. Aufgabenklassen gelöst oder eben nicht gelöst werden können. Dieser Aufwand ist gleichsam die Komplexität eines Problems. Verschiedene Autoren haben sich in den letzten dreissig Jahren mit der Bestimmung eines Masses für Berechnungskomplexität beschäftigt. Heute besteht aber weitgehend Einigkeit über die zu verwendende Masse.²¹⁴ Die klassische I-Komplexitätstheorie beschäftigt

²⁰⁶ Siehe etwa Cellucci (1985) und Sickel (1977). Carlo Cellucci sieht in der Komplexität eines Beweises eine Möglichkeit zu deren Klassifizierung. Er stellt insgesamt sieben Methoden vor, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll (vgl. S. 175).

²⁰⁷ Näheres dazu in Johnson (1986) und Johnson (1991).

²⁰⁸ Vergleiche Rissanen (1986b).

²⁰⁹ Details siehe Sahal (1976), S. 8/9. Weitere Autoren haben Komplexitätsmasse für elektrische bzw. elektronische Realisierungen von Netzwerken vorgeschlagen, auf die hier nicht eingegangen werden soll. Meistens basieren diese auf der Bestimmung der Anzahl von Knoten, bestimmten Elementen usw., siehe Sahal (1976), S. 9-11.

²¹⁰ Dastych (1973).

²¹¹ Als ein Beispiel unter vielen ist Gottinger (1983) zu nennen: „The starting point [seiner Untersuchung] is the recognition, that *complexity* is a well-defined concept in mathematics (e.g. in topological dynamics), computer science, information theory and artificial intelligence“, S. ix.

²¹² In diesem Zusammenhang kann auch darauf hingewiesen werden, dass der Computer als vom Menschen konstruiertes komplexes System Anstoss zur Entwicklung neuer mathematischer Modelle und Konzepte gegeben hat. Vergleiche dazu Seidman (1991).

²¹³ Folgende Ausführungen stützen sich vor allem auf Börger (1992), Bovet et. al. (1994) und Schöning (1995). Wir verwenden, wie schon erwähnt, die Bezeichnung „I-Komplexitätstheorie“.

²¹⁴ Ältere Vorschläge finden sich in Sahal (1976), S. 11/12.

sich überdies meist mit diskreten Problemen (solche über ganze Zahlen, etc.), wie *Lenore Blum* feststellt.²¹⁵ Weiter bilden nur entscheidbare Probleme Gegenstand der I-Komplexitätstheorie:

Entscheidbares Problem:²¹⁶ Gegeben sei ein Alphabet Σ . Mit Σ^* wird die Menge aller möglichen Ketten mit Elementen von Σ bezeichnet. Eine *Sprache* L über Σ ist eine Teilmenge von Σ^* . L heisst erkennbar (recognizable), wenn eine Turingmaschine (vgl. folgenden Einschub) so existiert, dass die charakteristische Funktion χ_L von L berechenbar ist, d.h. die Berechnung hört nach endlich vielen Schritten auf. Die *charakteristische Funktion* $\chi_L: \Sigma^* \rightarrow \{0,1\}$ ordnet jeder Kette aus L den Wert 1 und dem Komplement den Wert 0 zu.

Ein *Entscheidungsproblem* Π ist ein „Ja-nein-Antwort-Problem“, bestehend aus einer Menge I_Π von Input-Instanzen (instances), welche die Problemstruktur charakterisieren (z.B. eine mathematische Gleichung) und aus einer Frage bezüglich dieses Problems, welche nur ein Ja oder ein Nein zulässt (z.B. besitzt eine gegebene Gleichung eine ganzzahlige Lösung?).

Um L über Σ mit Π zu assoziieren, muss jede Input-Instanz von Π in eine Kette von Σ^* übersetzt werden, d.h. eine *Kodierungsfunktion* (encoding function) $\phi: I_\Pi \rightarrow \Sigma^*$ existiert, welche Σ^* in drei disjunkte Teilmengen unterteilt: Jene Menge von Ketten, welche diejenigen Instanzen von Π kodieren, die Antwort ja haben, jene Menge, die Antwort nein haben, und jene Menge, welche nicht für Instanzen von Π kodieren. Die erste Menge heisst die Sprache *assoziiert* mit Π unter der Kodierung ϕ . Ein Problem Π heisst nun *entscheidbar*, wenn die assoziierte Sprache erkennbar ist.

Die I-Komplexitätstheorie sieht sich mit zwei Aufgaben konfrontiert. Zum ersten wird versucht, für konkrete Aufgaben möglichst effiziente Verfahren anzugeben. Damit wird – falls möglich – ein praktisch verwertbarer Algorithmus geliefert. Dieser bestimmt auch eine obere Schranke für die Komplexität eines Problems. Zum zweiten wird versucht, eine untere Schranke für die Komplexität anzugeben, wobei entsprechende Beweise meist viel schwieriger zu führen sind als bei der Suche einer oberen Schranke. Dies deshalb, weil das Beweisargument jeden Algorithmus – also auch bisher noch gar nicht gefundene – in Betracht ziehen muss.

Komplexität ist grundsätzlich eine Funktion der Wortgrösse eines Inputs und wird in Speicherplatz oder Rechenzeit gemessen. Demnach werden zwei verschiedene Arten von Komplexitätsmassen unterschieden: statische und dynamische. Erstere basieren lediglich auf der Struktur eines Algorithmus, als typisches Beispiel mag die Programmgrösse gelten. Dynamische Masse basieren auf dem Verhalten einer Berechnung, ein klassisches Beispiel ist die Zeit, welche eine Berechnung benötigt. Dabei ist klar, dass die Rechenzeit mit der Grösse des Problems korreliert, die zentrale Frage ist aber, *wie* die Zeit von dieser Grösse abhängt. Wichtig ist, dass die Masse maschinenunabhängig gewählt werden bzw. auf der universellen Turingmaschine abstützen:

Universelle Turingmaschine:²¹⁷ Anschaulich beschrieben besteht eine *Turingmaschine* (TM) aus einem potentiell unendlichen Band, das in Felder eingeteilt ist. Jedes Feld kann ein einzelnes Zeichen des Arbeitsalphabets der Maschine enthalten. Auf dem Band bewegt sich ein Schreib-Lesekopf der Maschine, der jeweils nur jene Zeichen verändern kann, auf dessen Feld sich der Kopf gerade befindet. Der jeweilige Zustand der Maschine bestimmt die Änderung des Zeichens. Nach dem Rechenschritt kann sich der Kopf maximal eine Position nach links oder rechts bewegen. „Nichtbesuchte“ Felder erhalten das Leerzeichen.

Formal ist eine TM ein 7-tupel $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \diamond, E)$. Z ist die endliche Zustandsmenge; Σ heisst Eingabealphabet; $\Gamma \supset \Sigma$ ist das Arbeitsalphabet; δ ist die Überföhrungsfunktion, die davon abhängt, ob die TM deterministisch ist oder nicht (bei einer nichtdeterministischen Maschine ist durch einen gegebenen Zustand z der künftige z' nicht eindeutig bestimmt, d.h. es existieren mehrere künftige Zustände); $z_0 \in Z$ ist der Startzustand; $\diamond \in \Gamma - \Sigma$ das Leerzeichen und $E \subseteq Z$ schliesslich die Menge der Endzustände. Befindet sich M im Zustand z und ist unter dem Schreib-Lese-Kopf das Zeichen a , so geht M im nächsten Schritt in den Zustand z' über, überschreibt a mit b und führt danach die Kopfbewegung x

²¹⁵ Blum (1990) stellt in seinem Paper neue Ansätze für kontinuierliche Probleme vor.

²¹⁶ Bovet et al. (1987), S. 104.

²¹⁷ Die Ausführungen dieses Einschubs beruhen vor allem auf Schöning (1995).

$\in \{L, R, N\}$ aus (L steht für links, R steht für rechts, N steht für neutral, also stehenbleiben). Eine Turingmaschine kann auch aus mehreren Bändern bestehen, man spricht entsprechend von Mehrband-Turingmaschinen. Für jede Funktion, die von einer Mehrband-Turingmaschine berechnet werden kann, gibt es eine Einband-Turingmaschine, welche diese ebenfalls berechnen kann.

Mit Hilfe der Turingmaschine lässt sich das Konzept des Akzeptierens einer Sprache und ein Berechenbarkeitsbegriff formal einführen, was wir an dieser Stelle nicht tun. Von zentraler Bedeutung ist die sogenannte „Church-Turing-These“. Diese besagt, dass die turing-berechenbaren Funktionen alle berechenbaren Funktionen umfassen. Eine Turingmaschine kann deshalb jeden Computer simulieren und wird aus diesem Grund universelle Turingmaschine genannt. Die These ist bisher nicht bewiesen worden, allgemein geht man aber von ihrer Gültigkeit aus.

Mit der Turingmaschine kann man auch den Entscheidungsbarkeitsbegriff formal fassen (siehe oben). Als berühmtes nichtentscheidbares Problem gilt das *Halteproblem*, das wir hier nicht darstellen. Aus diesem folgt, dass man irgendeinen funktionalen Aspekt einer Turingmaschine nicht algorithmisch bestimmen kann. Das Halteproblem ist eine Folge des Unvollständigkeitssatzes von Gödel.²¹⁸ Es ist demnach ein Beispiel einer prinzipiellen Grenze der Berechenbarkeit. Daneben existieren natürlich auch praktische Grenzen. Probleme, deren Berechnung Millionen Jahre dauern, erfreuen sich kaum grosser Beliebtheit.

In der I-Komplexitätstheorie werden entscheidbare Sprachen in Komplexitätsklassen eingeteilt. Bezüglich der Zeitkomplexität existiert eine Klasse von Funktionen, deren Berechnungszeit bezüglich der Länge n der Funktion polynomial von n abhängt. Diese Komplexitätsklasse wird mit P bezeichnet und umfasst gewissermassen die effizienten Algorithmen bzw. die traktablen Probleme. Als weitere wichtige Klasse gilt jene der NP-Probleme, welche schwieriger zu lösen sind als P -Probleme. Hier stellt sich seit etwa 20 Jahren das Problem, ob beide Klassen äquivalent sind (das sogenannte P -NP-Problem). Schliesslich gibt es auch Probleme, die ausserhalb der Klasse NP liegen bzw. bewiesenermassen intractabel sind.²¹⁹

Komplexitätsklassen.²²⁰ Im Folgenden stellen wir die Komplexitätsklassen P und NP bezüglich der Zeitkomplexität vor. Sei A eine Sprache, M eine Turingmaschine, p ein Polynom, $T(M)$ eine von M akzeptierte Sprache und $time_M(x) : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$ die Anzahl der Rechenschritte von M bei Eingabe von x . Die *Komplexitätsklasse* P ist definiert durch:

$$P = \{A \mid \exists M, p \text{ mit } T(M) = A \text{ und } time_M(x) \leq p(|x|)\} = \bigcup \text{TIME}(p(n))$$

Im Fall einer nichtdeterministischen Turingmaschine M wird $ntime_M(x)$ definiert durch das Minimum der Länge einer akzeptierten Rechnung von M bei Eingabe von x (für $x \in T(M)$, im Fall $x \notin T(M)$ ist $ntime_M(x) = 0$). Analog zur obigen Definition ergibt sich für eine nichtdeterministische Turingmaschine die *Komplexitätsklasse* NP :

$$NP = \bigcup \text{NTIME}(p(n))$$

Es gilt natürlich $P \subseteq NP$. Unbekannt ist aber, ob beide Klassen gleich sind. Dies ist das sogenannte *P-NP-Problem*, das grosse praktische Bedeutung hat. Viele wichtige Fragestellungen (z.B. das Problem des Handlungsreisenden, der n Städte mit möglichst kurzem Weg besuchen muss) liegen in NP , und ein polynomialer Algorithmus zu deren Lösung ist nicht bekannt. Wären die Klassen äquivalent, liesse sich ein solcher finden, und das entsprechende Problem wäre traktabel. Zudem sind die meisten NP-Probleme in einer Weise miteinander verknüpft (d.h. sie sind *NP-vollständig*), dass entweder alle diese Probleme polynomiale Algorithmen besitzen (falls $P = NP$) oder keines.

²¹⁸ Der Unvollständigkeitssatz von Gödel gilt als eine der wichtigsten Entdeckungen über die Grundlagen der Mathematik überhaupt. Kurz gefasst besagt er, dass es in jedem formalen System, das die Arithmetik enthält, wahre Aussagen gibt, die nicht beweisbar sind. Die Begriffe „Wahrheit“ und „Beweisbarkeit“ sind also zu unterscheiden, ein Ergebnis, zu dem auch der polnische Logiker Alfred Tarski unabhängig von Gödel gelangt ist. Damit zerschlug sich die Hoffnung der Mathematiker, dass sich für jedes mathematische Gebiet ein Axiomensystem aufstellen liesse, aus welchem man sämtliche wahren Sätze systematisch ableiten kann. Eine verständliche Einführung in Gödels Unvollständigkeitssatz findet sich in Nagel et al. (1992).

²¹⁹ Vergleiche dazu Bovet et al. (1994), Kapitel 7. Für weitergehende Klassierungen entscheidbarer Probleme bezüglich ihrer Komplexität siehe auch Stockmeyer (1987).

²²⁰ Die Ausführungen stützen sich vor allem auf Schöning (1995).

Wie schon angesprochen, beschäftigt sich die klassische I-Komplexitätstheorie mit diskreten Problemen. Viele Computeranwendungen betreffen aber kontinuierliche Probleme, etwa wenn Differentialgleichungen berechnet werden müssen. Man unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen einer *kombinatorischen* (combinatorial) und einer *informations-basierenden* (information-based) Komplexität.²²¹ Die kombinatorische Komplexität kommt zur Anwendung, wenn diskrete Probleme vorhanden sind, für welche die Information vollständig und exakt ist. Die Überlegungen zur Bestimmung von deren Komplexität folgen den bisher gemachten Ausführungen. Im zweiten Fall ist die vorhandene Information über ein bestimmtes Problem gar nicht vollständig gegeben, es handelt sich um unendlichdimensional-kontinuierliche Probleme, wie *J.F. Traub et al.* ausführen. Die informations-basierende Komplexität sucht also nach einem Mass bei Problemen der Approximation.

Innerhalb der Informatik werden bezüglich der Komplexität schliesslich auch Überlegungen angestellt, die jenseits der oben besprochenen liegen. *N.E. Fenton* unterscheidet zwischen „programming-in-the-small“, wo Berechnungskomplexität eine Rolle spielt, und „programming-in-the-large“, wo der Begriff der Komplexität mit der Schwierigkeit, ein grosses System zu konstruieren bzw. zu verstehen, verwendet wird. Die mit dem zweiten Problembereich verbundenen Schwierigkeiten sind bisher weitgehend übersehen worden, wie Fenton meint.²²² Schliesslich ergeben sich im Falle neuronaler Netzwerke weitere Schwierigkeiten, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.²²³

Übersicht über weitere Komplexitätsmasse: Neben den statischen und dynamischen Komplexitätsmassen, welche in der I-Komplexitätstheorie entwickelt wurden, existieren eine Reihe weiterer wichtiger Masse, auf die in der Komplexitätsforschung immer wieder verwiesen wird. Wir stellen diese im einzelnen hier vor:

- **Algorithmischer Informationsgehalt (Kolmogoroff-Komplexität).** Der sowjetische Mathematiker *Andrej N. Kolmogoroff* (1964) und der amerikanische Wissenschaftler *Gregory J. Chaitin* (1966) führten unabhängig voneinander ein Mass ein, das als algorithmischer Informationsgehalt bzw. Kolmogoroff-Komplexität bekannt ist (wir verwenden im Folgenden die gebräuchlichere erste Bezeichnung). Das Mass bestimmt die minimale Anzahl binärer Symbole, welche alle Informationen für die Rekonstruktion eines endlichen Objektes enthalten. Die formale Definition lautet wie folgt:

Algorithmischer Informationsgehalt:²²⁴ Gegeben sei eine universale Turingmaschine M und eine Menge aller selbst-anhaltenden (d.h. deren Berechnungszeit durch die Turingmaschine ist endlich), binär-kodierten Algorithmen A , welche auf M die Zeichenkette x erzeugen, d.h. $M(a) = x, \forall a \in A$. Der Ausdruck $|a|$ bezeichnet die Länge von $a \in A$, d.h. die Anzahl Binärzeichen. Der *algorithmische Informationsgehalt* $H(x)$ von x ist definiert durch: $H(x) = |a'|$ mit $|a'| \leq |a| \forall a \in A \wedge a' \in A$. a' ist also der kleinste Algorithmus, der x erzeugt. Eine Zeichenkette x heisst *kompessibel* um s Bits, falls die Länge des minimalen, x -erzeugenden Algorithmus a' um mindestens s kleiner ist als die Länge von x , d.h.: $|a'| \leq |x| - s$.

Der algorithmische Informationsgehalt ist von der Kodierung abhängig, die meist binär gewählt wird. Für jede binäre Zeichenkette x gibt es eine triviale obere Grenze für den algorithmischen Informationsgehalt: $H_{\max}(x) = |x| + |c|$, wobei c die Binärkodierung der Anweisung „drucke x “ darstellt. Zufällig erzeugte Zeichenketten lassen sich nicht

²²¹ Siehe dazu Packel et. al. (1987) und Traub et. al. (1991).

²²² Fenton (1991).

²²³ Nadal (1988) weist etwa darauf hin, dass zwischen der Komplexität einer Sequenz, die von einem neuronalen Netzwerk gelernt werden soll, und der Komplexität des Netzwerkes selbst eine Beziehung besteht.

²²⁴ Die Ausführungen dieses Einschubs richteten sich vor allem an Bennett (1988b), Chaitin (1979) und Zwonkin et al. (1970). Neuere Ansätze finden sich zudem in Daley (1976), der den algorithmischen Informationsgehalt mit „Minimal-program-complexity“-Massen in Beziehung setzt.

komprimieren, d.h. deren algorithmischer Informationsgehalt ist im wesentlichen gleich lang wie die Zeichenkette selbst. Hochgeordnete Ketten (z.B. 000....00000) haben einen sehr kleinen algorithmischen Informationsgehalt, da der Algorithmus zu deren Erzeugung sehr kurz ist. Ob eine Zeichenkette zufällig ist, lässt sich im allgemeinen nicht beweisen. Dies folgt aus dem Gödelschen Unvollständigkeitssatz, wie Chaitin bewies.

Mit Hilfe des algorithmischen Informationsgehaltes lässt sich auch die Komplexität einer geometrischen Struktur bestimmen, wie Chaitin vorgeschlagen hat. Dabei muss aber deren Auflösung berücksichtigt werden. Sei ein geometrisches Objekt X gegeben, das sich in k Partitionen mit Durchmesser $\leq d$ (d bestimmt die Auflösung) zerlegen lässt (nichtüberlappend): X_0, X_1, \dots, X_{k-1} . $H(X_i)$ sei die minimale Anzahl Bits zur Beschreibung von X_i . $H(\alpha)$ ist die Anzahl Bits der Zusammensetzungsanweisung. Unter Berücksichtigung aller möglicher Partitionen ist demnach die d -Komplexität der Struktur X gegeben durch: $H_d(X) = \min [H(\alpha) + \sum H(X_i)]$. Je schneller die Differenz zwischen $H_d(X)$ und $H(X)$ bei kleiner werdendem d zunimmt, desto strukturierter ist das Objekt X .

Ob der algorithmische Informationsgehalt wirklich ein gutes Mass für quantitative Komplexität ist, wird aber von manchen Autoren bestritten.²²⁵ In der Tat wird, wie oben ausgeführt, durch dieses Mass die Zufälligkeit einer Zeichenkette bestimmt.²²⁶ Damit widerspricht man gewissen Intuitionen, die man mit dem Komplexitätsbegriff in Verbindung bringt. So ist man sicher dazu geneigt, einen funktionierenden Computer als „komplexer“ zu bezeichnen als einen zu Staub zermahlenden, obwohl letzterer „zufälliger“ ist. Das Problem des algorithmischen Informationsgehaltes ist, dass der Aspekt der Organisation von Systemkomponenten nicht berücksichtigt wird.

- **Logische Tiefe.** Ein weiteres Komplexitätsmass stammt ursprünglich ebenfalls von Gregory Chaitin (eingeführt im Jahr 1977), wurde aber vor allem von *Charles Bennett* weiterentwickelt und als brauchbare quantitative Komplexität propagiert: die logische Tiefe.²²⁷ Diese ist gewissermassen ein Mass für die „Geschichte“ eines Objektes, d.h. für die benötigte Zeit, ein Objekt aus seiner minimalen Beschreibung zu generieren. Wir liefern im Folgenden eine formale Definition des Begriffs:

Logische Tiefe:²²⁸ Gegeben sei eine Zeichenkette x , der minimal-erzeugende Algorithmus a' von x , eine universelle Turingmaschine M und ein Signifikanz-Parameter s (dieser definiert den maximalen Unterschied zwischen der Länge zweier Algorithmen). $T(a)$ bezeichnet die Rechenzeit von a , $M(a)$ die von a erzeugte Zeichenkette. Die *logische Tiefe* $D_s(x)$ der Zeichenkette x bei Signifikanz-Stufe s ist gegeben durch:

$$D_s(x) = \min \{ T(a) : (|a| - |a'| < s) \wedge (M(a) = x) \}.$$

In Zusammenhang mit der logischen Tiefe formuliert Bennett ein „Gesetz des langsamen Wachstums“ (*slow-growth-law*), das besagt, dass logisch tiefe Objekte aus „flachen“ Objekten nicht schnell generiert werden können.

Moshe Koppel und *Henri Atlan* haben mit der sogenannten „*sophistication*“ ein weiteres Komplexitätsmass eingeführt. Die „*sophistication*“ formalisiert den Minimalaufwand für die Planung der Generierung einer Zeichenkette. Dieses Mass ist bis auf eine Konstante äquivalent zur logischen Tiefe.

Peter Grassberger schliesslich präsentiert eine „Vorhersage-Komplexität“. Diese misst im Unterschied zur logischen Tiefe, welche ein Mass für die Herstellungszeit liefert, die Prognostizierbarkeit einer Zeichenkette, die von einer Turingmaschine generiert wird. Wir stellen dieses Mass hier nicht weiter vor.

²²⁵ So etwa in Bennett (1989), S. 791, Grassberger (1986), S. 909 oder Hedrich (1994), S. 110.

²²⁶ Es gibt auch eine Reihe andere Masse für Zufall, vergleiche dazu Lindgren et al. (1988), S. 410-412.

²²⁷ Vergleiche dazu Bennett (1986), Bennett (1988a), Bennett (1988b), Bennett (1989) und Bennett (1990).

²²⁸ Der Einschub beruht auf Bennett (1988b), Grassberger (1988) und Koppel et al. (1987).

Die logische Tiefe findet innerhalb der Komplexitätsforschung mehr Zuspruch als der algorithmische Informationsgehalt. Dies betont vor allem Bennett selbst, der die logische Tiefe als vergleichsweise universales Komplexitätsmass ansieht. Grundsätzlich stellt sich aber das Problem, inwieweit Komplexitätsmasse, die primär auf binäre Zeichenketten angewendet werden, sich für physikalische Probleme eignen. Darauf gehen wir im folgenden Absatz ein.²²⁹

Problem der Simulation: Alle hier vorgeschlagenen Komplexitätsmasse beziehen sich auf formale Strukturen wie Zeichenketten oder Algorithmen. Es stellt sich dabei die Frage nach der Universalität dieser Masse, bzw. inwieweit sich diese auch für physikalische Problemstellungen eignen. Algorithmen dienen sehr oft zur Modellierung physikalischer Probleme²³⁰, doch es ist nicht gesagt, dass sich Überlegungen bezüglich der Komplexität solcher Probleme einfach übertragen lassen.

Seth Lloyd et al. stellen beispielsweise fest, dass sich diese Masse für physikalische Systeme, die sich nur schwer numerisch kodieren lassen, nicht eignen. Ausserdem können physikalische Systeme gewisse Prozesse leicht vollziehen, deren Simulation durch einen Computer aber sehr schwierig sein kann.²³¹

Grundproblem ist dabei, ob und inwieweit sich physikalische Sachverhalte formalisieren lassen. Dieses ist gleichbedeutend mit der Frage nach der Geltung der sogenannten *physikalischen Church-These*, welche besagt, dass eine universelle Turingmaschine jeden physikalischen Prozess simulieren kann.²³² Da stellt sich sofort ein praktisches Problem, denn jeder Computer kann physikalische Prozesse nur mit endlicher Genauigkeit simulieren. *Charles Bennett* ist der Ansicht, dass dieses der Geltung der physikalischen Church-These keinen Abbruch tut. Dies deshalb, weil die Darstellung physikalischer Systeme durch kontinuierliche Differentialgleichungssysteme vernachlässigt, dass das System in der Natur immer Fluktuationen unterliegt, welche die Genauigkeit ab einer bestimmten Kommastelle zur Illusion macht. Zudem sind auch die Messwerte selbst immer nur rationale Zahlen. Demnach ist eine endliche Genauigkeit bei der tatsächlichen Berechnung kein Hindernis.²³³ Probleme stellen sich dann aber bei chaotischen Systemen, wo es gerade diese kleinen Fluktuationen sind, welche die Dynamik instabil werden lassen.

Das grundsätzliche Problem des Unterschiedes zwischen der Simulation und dem Realen bleibt aber bestehen. *Ralph Hinegardner et al.* stellen fest: „The algorithm (directions) for generating real objects, such as the steps in the synthesis of a chemical compound, could be much longer than the description of the object. In other words, since parts have physical properties, the manipulation of the parts may not be the same as the manipulations of the symbols for the parts.“²³⁴

Ohne ein abschliessendes Urteil zu bilden, müssen wir erkennen, dass mit der Simulation physikalischer Prozesse auf Computern und entsprechenden Rückschlüssen von dieser auf die Natur schwierige Probleme verbunden sind. Auch die Untersuchung der Physik der Berechnung bzw. Informationsverar-

²²⁹ Bennett (1988a) schlägt im übrigen ein weiteres Komplexitätsmass vor, das er „mutual information“ nennt: „Subjectively organized objects generally have the property that their parts are correlated: two parts taken together typically require fewer bits to describe than the same two parts taken separately. This difference, the *mutual information* between the parts, is the algorithmic counterpart of the non-additivity of statistical or thermodynamic entropy between the two parts. In many contexts (...) the mutual information between a message and something else can be viewed as the „meaningful“ part of the message’s information (...).“, S. 220. Wir gehen auf diesen Vorschlag nicht weiter ein.

²³⁰ Agnes et. al. (1987) geben beispielsweise ein einfaches Schema an, um physikalische Problemstellungen mittels Algorithmen zu modellieren, wobei sie dann letztere brauchen, um Fragen der Komplexität zu untersuchen. So werden mit einem Algorithmus die physikalischen Gesetze und damit die Dynamik des Systems modelliert. Die Länge der binären Kodierung des Algorithmus summiert mit der Länge der binären Kodierung der gegebenen Ausgangslage (welche den physikalischen Anfangszustand repräsentiert) gilt als Komplexität des Systems. S. 4. Fontana (1991) will komplexe Systeme sogar rein durch funktionale Relationen darstellen, unabhängig von deren physikalischen Realisation.

²³¹ Lloyd et al. (1988), S. 189. Als Beispiel führen sie die Spin-Spin-Wechselwirkung zweier Elektronen an, ein physikalisch zwar einfacher Prozess, dessen Computersimulation aber sehr viele Schritte beinhalten kann, was auf eine vermeintliche Komplexität schliessen lässt. Vergleiche auch Pattee (1977), S. 261.

²³² Bennett (1988b), S. 251. Pagels (1988) spricht in diesem Zusammenhang auch von „the rise of the *computational viewpoint of physical processes*.“, S. 45

²³³ Bennett (1989), S. 794/795.

²³⁴ Hinegardner et al. (1983), S. 8.

beitung müsste wohl einbezogen werden.²³⁵ Einige diese Aspekte werden wir in Teil IV, Abschnitt 3.1 wiederaufnehmen.

2.3 Physik

Mit dem Aufkommen neuer Forschungsgebiete wie Nichtgleichgewichts-Thermodynamik oder Synergetik ist seit gut 20 Jahren Komplexität auch in der Physik explizit zum Thema geworden. Grössere Anstrengungen zur Suche nach einem Komplexitätsmass finden sich aber erst in den 80er Jahren.²³⁶ In der Physik neigt man generell dazu, das Wort „komplex“ für Strukturen zu verwenden, welche weder total zufällig noch total regelmässig sind, sondern eine schwierige, eventuell hierarchische Organisation aufweisen.²³⁷ Damit glaubt man, auch der Intuition bezüglich des Begriffs der Komplexität gerechter zu werden.²³⁸ Von einem allgemein befriedigenden Mass für Komplexität kann man aber auch heute noch nicht sprechen. Wir werden sehen, dass verschiedene Ansätze vorgeschlagen wurden, die für das jeweilige Gebiet durchaus brauchbar sind. Der Wunsch, der Komplexität einen ähnlich umfassenden Charakter wie der Entropie zu geben, ist bisher sicher nicht erfüllt worden.

Die schon vor gut zehn Jahren geäusserte Ansicht, man solle primär in einzelnen Gebieten nach einem Mass für Komplexität suchen,²³⁹ hat auch heute noch ihre Gültigkeit. So geht es um die Weiterentwicklung von Konzepten wie Selbstorganisation und Hierarchie, andererseits auch um die Suche nach Archetypen der Komplexität.²⁴⁰

Charakterisierung komplexer Systeme: Wenn es um die Charakterisierung komplexer Systeme in der Physik geht, werden eine Reihe von Vorschlägen gemacht. Diese beinhaltet sowohl Aspekte der Struktur und des Zustands des Systems als auch dessen Verhalten.

Folgende Strukturmerkmale komplexer Systeme werden vorgeschlagen: Sie bestehen generell aus einer grossen Anzahl interagierender Elemente.²⁴¹ Diese sind oftmals rückgekoppelt bzw. die Wechselwirkungen werden durch nichtlineare Gleichungen beschrieben.²⁴²

Nichtlinearität: Das Prädikat „nichtlinear“ ist ein notorischer Begleiter der Komplexitätsforschung. Diese wird sogar gleichsam als „nichtlineare Wissenschaft“ verstanden.²⁴³ In der populären Literatur

²³⁵ Eine kurze Zusammenfassung verschiedener Standpunkte zu dieser Thematik findet sich in Traub et al. (1991), S. 178-183. Sie argumentieren ausserdem dafür, dass untraktable Probleme prinzipiell nicht wissbar sein können. Dieser Ausflug in die Erkenntnistheorie gibt zu Spekulationen Anlass. Ist es etwa möglich, dass die Klasse der untraktablen Probleme (im Sinne der Informatik) auch gleich alle prinzipiell nicht wissbaren Probleme umfasst? Welchen Sinn geben wir dabei dem Begriff „wissbar“? Diese Reihe interessanter Fragen können wir an dieser Stelle leider nicht beantworten.

²³⁶ Ein Beispiel ist die Konferenz „Measures of Complexity“ in Rom im Jahr 1987, Peliti et. al. (1988).

²³⁷ Lindgren et al. (1988), S. 412.

²³⁸ Bennett (1990) sagt etwa: „An important part of this latter endeavor [generelle Prinzipien über die Entstehung von Komplexität zu finden] is the formulation of suitable definitions of complexity: definitions that on the one hand adequately capture intuitive notions of complexity, and on the other hand are sufficiently objective and mathematical to prove theorems about.“, S. 138.

²³⁹ Livi et al. (1987) schreiben: „Instead of posing quite generic questions as, *what is a complex system? which is the relation between a chaotic and a complex behaviour?* we prefer to follow a more constructive approach trying to understand how such concepts are *operatively* defined in relations with some specific problems.“, S. vi.

²⁴⁰ Nicolis et al. (1989) glauben, solche gefunden zu haben: „(...) physico-chemical systems giving rise to transition phenomena, long-range order, and symmetry breaking far from equilibrium can serve as an archetype for understanding other types of systems that show complex behaviour.“, S.217.

²⁴¹ Nicolis et. al. (1989), Serra et al. (1986).

²⁴² Çambel (1993), S. 1; Nicolis et. al. (1989), S. 218.

²⁴³ Vergleiche dazu Campbell (1989). Dieser formuliert drei Paradigmen für nichtlineare Wissenschaften: Chaos und Fraktale, Solitionen und kohärente Strukturen, Musterbildung und -auslese, S. 13-19.

schliesslich ist das Nichtlineare zuweilen schon fast das Gute, während der Begriff „linear“ Sinnbild einer alten, verbrauchten und ungenügenden Sicht der Natur ist.²⁴⁴

Wir wollen hier deutlich machen, dass Nichtlinearität lediglich als *mathematisches Konzept* sinnvoll verwendet werden kann. In einem nichtlinearen Gleichungssystem sind die Variablen eben nicht durch lineare Beziehungen miteinander verknüpft. Das Superpositionsprinzip gilt nicht. Nichtlineare Systeme sind solche, deren Dynamik durch nichtlineare Differentialgleichungssysteme beschrieben wird. Praktisch bedeutet Nichtlinearität, dass entsprechende Gleichungen meist nur numerisch gelöst werden können. Lokal lassen sich nichtlineare Gleichungen meistens durch lineare approximieren (vgl. auch Fussnote 27, Teil I).

Weiter muss man Nichtlinearität und *Rückkopplung* bzw. *Rekursivität* unterscheiden. Letzteres bedeutet, dass das Ausgangssignal einer Systemkomponente das Eingangssignal derselben Komponente beeinflusst. Wird dieses dadurch verstärkt, spricht man von positiver Rückkopplung, bei Abschwächung hingegen von negativer Rückkopplung.²⁴⁵

Bezüglich des Zustands komplexer Systeme wird oft gesagt, dass sie thermodynamisch im Nichtgleichgewicht sind.²⁴⁶ Damit wird auch zum Ausdruck gebracht, dass komplexe Systeme als offene Systeme zu verstehen sind.²⁴⁷

Die Dynamik komplexer Systeme schliesslich wird meist als unvorhersehbar bzw. schlecht prognostizierbar bezeichnet.²⁴⁸ Ausserdem sollen einem komplexen System eine grosse Anzahl von Freiheitsgraden offenstehen.²⁴⁹

Der Entropieansatz: Einige Versuche zur Bestimmung eines physikalischen Komplexitätsmasses laufen über den Entropiebegriff. Motiviert wird diese Idee dadurch, dass Entropie als Mass für Unordnung aufgefasst werden kann und man Komplexität gern im „Spannungsfeld“ von Ordnung und Unordnung ansiedeln möchte.

Entropie:²⁵⁰ Der Entropiebegriff ist für die Thermodynamik und die statistische Physik allgemein von zentraler Bedeutung. Wir werden an dieser Stelle lediglich die wichtigsten Begriffe einführen, die im Laufe dieser Arbeit auftauchen werden.

Das Entwickeln des Entropiebegriffs kann man als Versuch interpretieren, die in der Natur beobachtete Irreversibilität formal zu fassen. Dies geschah erstmals im Zusammenhang mit der Wärme. *Rudolf Clausius* definierte Entropie 1865 mit rein makroskopischen Variablen: $dS = \delta Q \cdot T^{-1}$ (S: Entropie, Q: Wärmeenergie, T: absolute Temperatur). Clausius zeigte weiter, dass in einem abgeschlossenen System die Entropie im Lauf der Zeit zunimmt oder konstant bleibt (*Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik*). *Ludwig Boltzmann* brachte die Entropie als Mass eines Makrozustandes mit den entsprechenden Mikrozuständen in Beziehung: Ist Ω die Anzahl der zugänglichen Mikrozustände eines abgeschlossenen Systems, so ist die Entropie S gegeben durch: $S = k \cdot \ln \Omega$ (k: Boltzmann-Konstante). In dieser Interpretation ist auch der zweite Hauptsatz einleuchtender: Er besagt, dass sich ein System im allgemeinen in Richtung eines wahrscheinlicheren Zustandes bewegt.

Claude Shannon entwickelte innerhalb der Informationstheorie einen Entropiebegriff, der als Mass den Informationsmangel über ein System angibt. Die Shannon-Entropie ist bis auf einen Faktor gleich der Boltzmann-Entropie.

Angewandt auf die Dynamik eines Systems entwickelte *Andrej N. Kolmogoroff* einen weiteren Entropiebegriff, der vor allem in der Chaostheorie von grosser Bedeutung ist. Die Kolmogoroff-Entropie misst den mittleren Informationsverlust von Trajektorien bei der Bewegung im Phasenraum. Da die

²⁴⁴ Exemplarisch findet sich diese Sichtweise bei Mainzer (1994), Einführung, oder Eilenberger (1990), S. 78-87.

²⁴⁵ Die Ausführungen richten sich u.a. nach Gellert et al. (1978).

²⁴⁶ Çambel (1993).

²⁴⁷ Serra et al. (1986).

²⁴⁸ Çambel (1993); Serra et al. (1986).

²⁴⁹ Cramer (1988): Dieser definiert durch den Logarithmus der Anzahl möglicher Zustände des Systems ein Mass für Komplexität. S. 275.

²⁵⁰ Die Ausführungen des Einschubs beruhen auf Çambel (1993), Eriksson et al. (1987), Fliessbach (1993) und Schuster (1989).

Dynamik chaotischer Systeme schwer prognostizierbar ist, ist entsprechend die Kolmogoroff-Entropie gross. Im eindimensionalen Fall entspricht die Kolmogoroff-Entropie dem Lyapunov-Exponenten.

Entropie wird oft als Mass für Unordnung aufgefasst. Als ein Mass für Ordnung wird zuweilen auch die *Negentropie* Σ eingeführt. Diese ist so definiert, dass gilt: $S + \Sigma = S_{\max}$.

Dass man Entropie direkt als Komplexitätsmass einsetzt, kommt vor allem bei dynamischen Aspekten vor. Dem liegt aber die bereits angesprochene Verwechslung zwischen chaotischer und komplexer Dynamik zugrunde: Die Kolmogoroff-Komplexität misst die Chaotizität der Dynamik und nicht deren Komplexität. Ansonsten wird Entropie indirekt eingesetzt, so etwa bei der thermodynamischen Tiefe, die wir noch vorstellen werden.²⁵¹

Die Kritik am Entropie-Ansatz folgt der gleichen Intuition wie jene am algorithmischen Informationsgehalt: Entropiemasse seien mehr mit der Zufälligkeit als mit der Komplexität eines Systems in Bezug zu setzen.²⁵²

Vorgeschlagene Komplexitätsmasse: In der Physik wurden eine Reihe von Vorschlägen zur Bestimmung einer quantitativen Komplexität gemacht, die wir im Folgenden vorstellen:

- **Thermodynamische Tiefe.** Dieses Komplexitätsmass wurde von *Seth Lloyd* und *Heinz Pagels* vorgeschlagen.²⁵³ Sie folgen dabei der Intuition, dass das Mass für extrem geordnete und extrem ungeordnete Strukturen verschwinden und ein Maximum „zwischen Ordnung und Chaos“ erreichen soll. Weiter soll das Mass möglichst universal sein und demnach als Funktion physikalischer Quantitäten definiert werden. Schliesslich darf das Mass nicht additiv sein in dem Sinn, dass zwei gleiche komplexe Systeme einen doppelt so hohen Wert ergeben. Vielmehr soll das Komplexitätsmass die Schwierigkeit messen, Bestandteile zu höheren Ordnungen zusammenzufügen. Mit der thermodynamischen Tiefe ist ein Mass gegeben, das diesen intuitiven Anforderungen genügt. Als Komplexitätsmass wird die erzeugte Entropiemenge während der Evolution des Systems hin zu einem bestimmten Zustand gemessen. Die formale Definition lautet wie folgt:

Thermodynamische Tiefe: Gegeben sei ein makroskopischer Zustand d eines Systems, der durch i Trajektorien im Phasenraum erreicht werden kann. Weiter ist p_i die Wahrscheinlichkeit, dass d durch die i -te Trajektorie erreicht wurde, und k eine beliebige positive Konstante. Die *Tiefe* D des Zustandes d ist definiert durch: $D(d) = -k (\ln p_i)$.

Gegeben sei weiter die grobkörnige Entropie S des Zustandes d (die thermodynamische Entropie des Zustandes) und die feinkörnige Entropie S' von d (Volumen im Phasenraum, welches der Trajektorie entspricht, der das System zum Zustand d hin gefolgt ist, multipliziert mit der Boltzmann-Konstante). Die *thermodynamische Tiefe* von d ist definiert durch: $D_T(d) = S - S'$.²⁵⁴

Die Tiefe $D(d)$ ist äquivalent zum Aufwand an Information, die benötigt wird, um die Trajektorie, der das System zum Zustand d hin gefolgt ist, zu spezifizieren. $D(d)$ und $D_T(d)$ sind im Fall von Hamilton-Systemen proportional. Das Mass $D_T(d)$ erfüllt die oben vorgestellten intuitiven Anforderungen und ist bis auf einen konstanten Faktor eindeutig.

²⁵¹ Einen anderen Ansatz verfolgen Patarnello et al. (1988). Sie etablieren eine Beziehung zwischen der Einfachheit eines Problems, das auf einem booleschen zellulären Automaten bearbeitet werden soll, und dessen Entropie. Entropie bedeutet in diesem Zusammenhang die Anzahl möglicher Problemrealisierungen.

²⁵² Entsprechend äussern sich etwa Bennett (1990), S. 139 und Grassberger (1988), S. 2.

²⁵³ Die Ausführungen stützen sich auf Lloyd et al. (1988). Vergleiche auch Landauer (1988).

²⁵⁴ Hier muss hinzugefügt werden, dass sowohl ich wie auch die Teilnehmer der erwähnten Veranstaltung „Komplexität – Probleme eines Paradigmas“, an welcher der Text von Lloyd et al. besprochen wurde, die Definition nicht wirklich verstanden haben. Sie scheint also mit Problemen behaftet zu sein. Leider fehlte die Zeit, um diese offenzulegen.

Charles Bennett kritisierte die thermodynamische Tiefe als systemrelativ. Triviale Zustände könnten durch grosse Entropieerzeugung erreicht werden, nichttriviale Zustände hingegen durch geringe Entropieproduktion.²⁵⁵ Die Kritik ist aber nicht weiter ausgeführt und deshalb schwer zu beurteilen.

- **Diversität:** *Bernardo A. Huberman* und *T. Hogg* entwickelten ein Komplexitätsmass, das ebenfalls der Intuition „Komplexität liegt zwischen Ordnung und Unordnung“ gerecht werden soll.²⁵⁶ Sie sehen vor allem in der Diversität der Wechselwirkungen in einem System dessen Komplexität. Das Mass basiert auf der Prüfung der Vielfalt einer gegebenen Struktur, festgelegt durch die Anzahl der verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Teilen. Dazu wird ein Mass für Diversität definiert, das auf diskrete Systeme angewendet werden kann.

Diversität: Gegeben sei die Struktur eines Systems in Form eines Baums T , der aus b Unterbäumen T_1, \dots, T_b besteht. Durch Zusammenfassen der isomorphen Unterbäume entsteht die Menge der nichtisomorphen Unterbäume T_1', \dots, T_k' mit $k \leq b$. Für jeden nicht-isomorphen Unterbaum lässt sich rekursiv die Anzahl möglicher Wechselwirkungen D_i (i von 1 bis k) innerhalb T_i' bestimmen. Zur Bestimmung von $D(T)$ (die Diversität von ganz T) muss jetzt noch die Anzahl N_k möglicher Wechselwirkungen zwischen den T_i bestimmt werden. Diese ist gegeben durch $N_k = 2^k - 1$. Damit ergibt sich schliesslich die Diversität als: $D(T) = (2^k - 1) \cdot \prod D(T_i')$

Die einfachste Struktur kennt nur eine Wechselwirkung. Diese soll Komplexität 0 haben, so dass die Komplexität C eines Baumes T definiert wird durch: $C(T) = D(T) - 1$.

Mit dem vorgeschlagenen Mass zeigen Huberman et al. auch, dass die anpassungsfähigsten Systeme gleichzeitig sehr komplex sind. Anpassung wird dabei verstanden als Fähigkeit des Systems, auf die Änderung äusserer Zwänge mit einem minimalen Wechsel der Struktur zu reagieren. Huberman et al. untersuchen vor allem Computerarchitekturen. Es könnte sich als schwierig erweisen, beliebige Systeme auf die formale Struktur zu bringen, welche die Anwendung des Masses Diversität benötigt.

- **Effektive Mess-Komplexität (effective measure complexity):** *Peter Grassberger* entwickelte eine Reihe von Komplexitätsmassen, die sich an der Shannon-Entropie orientieren und die Komplexität von Ensembles diskreter Muster (erzeugt etwa von zellulären Automaten) messen.²⁵⁷ Die einfachsten diskreten Muster sind Zeichenketten, von denen wir im Folgenden ausgehen. Die Grammatik solcher Zeichenketten bestimmt deren Struktureigenschaften, und man kann die Ketten gemäss ihrer Grammatik zu Mengen zusammenfassen. Grassberger stellt sich das Problem, dass man lediglich den Beginn einer solchen Kette kennt und herausfinden will, welche Grammatik diese Ketten bestimmt bzw. welcher dadurch definierten Menge sie angehören.

Im Zusammenhang mit diesem Problem stellt er vier Komplexitätsmassen vor: Die Mengen-Komplexität (set complexity) und die algorithmische Komplexität (algorithmic complexity) beziehen sich auf die Komplexität der Grammatik. Die wahre Mess-Komplexität (true measure complexity, TMC) und die effektive Mess-Komplexität (effective measure complexity, EMC) beziehen sich auf die optimale Vorhersage des unbekanntens Teils der gegebenen Zeichenkette. Im Folgenden stellen wir nur die EMC formal vor, da Grassberger diesem Mass die grösste physikalische Relevanz zuschreibt. Dies deshalb, weil einzig die EMC in Situationen messbar ist, in welchen man die Grammatik der Zeichenkette nicht kennt.

²⁵⁵ Bennett (1990), S. 142.

²⁵⁶ Huberman et al. (1986), vergleiche auch Huberman et al. (1989).

²⁵⁷ Grassberger (1986). Vergleiche auch Lindgren et al. (1988).

EMC: Gegeben sei eine Teilkette S der Länge N : $S = \{s_i, \dots, s_{i+N-1}\}$. N ist unabhängig von i gewählt. Mit $p(S)$ wird die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, S zu beobachten. Die Shannon-Entropie von S beträgt (summiert über S): $H_N = -\sum p_N(S) \log p_N(S)$. Für $N = 0$ wird definiert: $H_0 = 0$. Ist S gegeben, ist die zusätzlich benötigte Information zur Vorhersage von s_{i+N} gegeben durch: $h_N = H_{N+1} - H_N$. Die Bezeichnung h_N heisst Block-Entropie N -ter Ordnung. Der Grenzwert h von h_N für $N \rightarrow \infty$ ist die Shannon-Entropie pro Buchstaben. Die *EMC* ist definiert als (summiert von 0 bis ∞): $EMC = \sum (h_N - h)$

Für Ausführungen und Anwendungen der EMC bei eindimensionalen Abbildungen und eindimensionalen zellulären Automaten beachte die Originalpublikation.

Es erscheint uns schwierig, abzuschätzen, inwieweit sich dieses Mass für mehrdimensionale Muster eignet. Darauf weist auch Grassberger hin, der dieses Problem anschnidet, ohne eine plausible Lösung anzubieten.

- **Strukturkomplexität:** *Gad Yagil* hat ein Komplexitätsmass vorgeschlagen, das die rein geometrischen Aspekte einer Struktur erfasst.²⁵⁸ Die Komplexität einer räumlichen Struktur wird dabei durch die minimale Anzahl der numerischen Spezifikation der Strukturierung im Raum gegeben. Dabei muss unterschieden werden können, welche dieser Spezifikationen notwendig zur Struktur gehören und welche nur zufällig sind. Im Falle eines einfachen organischen Moleküls bedeutet dies beispielsweise, dass die Drehbarkeit einer C-C-Bindung (und damit einhergehend eine Vielzahl verschiedener räumlicher Anordnungen des Moleküls) den Wert der Strukturkomplexität nicht verändern soll. Die Strukturkomplexität folgt also der Intuition der minimalen Beschreibung der „wesentlichen“ Merkmale, angewendet auf räumliche Strukturen.

Yagil stellt eine Menge von Regeln auf, aufgrund welcher diese numerische Spezifikation bei gegebenem Koordinatensystem erfolgen soll. Dabei müssen etwa Symmetrien mitberücksichtigt werden, da sich damit die Anzahl der Variablen reduziert. Wir verzichten hier auf eine vollständige Darstellung dieses Regelsets, nicht zuletzt deshalb, weil Yagil selbst Zweifel bezüglich dessen Vollständigkeit hat.

Yagil hat sein Mass vorgeschlagen, um insbesondere bei biologischen Systemen zu einem besseren Verständnis von Komplexität, Ordnung und Regularität von Strukturen zu kommen. Im konkreten Fall wird aber die Berechnung der Strukturkomplexität ab einer bestimmten Grössenordnung ein überaus schwieriges Unterfangen. *Frank Papentin* hat für biologische Strukturen ein vergleichbares Mass vorgestellt, das wir im folgenden Abschnitt vorstellen.

Neben diesen vier präziser vorgestellten Vorschlägen existieren weitere, die wir hier nur kurz vorstellen wollen. *Giorgio Parisi* beispielsweise betrachtet Komplexität als Klassifikationsproblem.²⁵⁹ Damit ist gemeint, dass der Prozess der Klassierung einer Menge gegebener Muster mit der Komplexität dieser zusammenhängt. Sehr einfache Muster bzw. Zufallsmuster lassen sich kaum mehr als in eine Klasse einordnen, während bei einer Menge sehr komplexer Muster viele Klassen möglich sind. Parisi will demnach eine allgemeine Klassifikationstheorie entwickeln und präsentiert dazu eine Reihe von Ansätzen, die wir nicht weiter vorstellen.²⁶⁰

Schliesslich verweisen andere Physiker auf die Komplexitätsmasse, die in der Informatik entwickelt wurden. Auf die dabei auftretenden Probleme haben wir bereits hingewiesen.

²⁵⁸ Yagil (1985), vergleiche auch Yagil (1993).

²⁵⁹ Vergleiche Parisi (1987) und Parisi (1988).

²⁶⁰ Ein Weg führt über die Untersuchung von Spingläsern. Spingläser sind ein Musterbeispiel ungeordneter Systeme und gelten als paradigmatisches Beispiel für die Untersuchung von physikalischer Komplexität. Spingläser entstehen, indem man reine Metallgitter unregelmässig mit Fremdatomen dotiert. Dadurch entstehen Materialien mit einem äusserst komplizierten magnetischen Verhalten. Sherrington (1990) untersucht Komplexität anhand von Spingläsern. Für eine Einführung in die Thematik siehe Stein (1989b).

Einfache Physik – komplexe Welt? Wie in der Einführung schon angesprochen, befindet sich die moderne Physik in einer auf den ersten Blick eigenartigen, paradox anmutenden Situation: Die Physik beschreibt die fundamentalen Naturgesetze, und die Theorien dieser fundamentalen Stufe sind eigentlich einfach. Die Suche nach dieser Einfachheit, nach einer „Theorie für Alles“, hat die Wissenschaftler immer wieder angetrieben.²⁶¹ Wie erklärt die Physik aber die Komplexität unserer Welt relativ zur fundamentalen Physik?²⁶²

Eine klassische Erklärung ist der Bezug auf die Randbedingungen, welche zur Ausprägung der komplexen Welt geführt haben. *Bernd-Olaf Küppers* sieht in der Komplexität der Randbedingungen die eigentliche Ursache für die Komplexität von Systemen.²⁶³ Weiter sollen komplexe Systeme sensibel von diesen Randbedingungen abhängen, d.h. kleine Änderungen in diesen Bedingungen können für das System grosse Folgen haben. Deshalb sind, so Küppers, Randbedingungen für komplexe Systeme auch nicht-kontingente Quantitäten in dem Sinn, dass sie eng mit der Struktur des Systems verhängt sind und diese gleichsam mitdefinieren. Sein Sprachgebrauch erscheint an dieser Stelle aber unsauber, da Kontingenz eigentlich die Randbedingungen betreffen sollte. Diese sind als Auswahl einer meist sehr grossen Anzahl Möglichkeiten sicher kontingent.

Unklar ist bei Küppers schliesslich der Begriff Randbedingung selbst. Er verwendet in diesem Zusammenhang die Metapher eines Konstrukteurs einer Maschine, der durch seine Zielsetzungen die Randbedingungen für die Maschine festlegt. Diese können nicht aus den Gesetzen von Physik und Chemie abgeleitet werden, was einleuchtet, handelt es sich doch um ein teleologisches Erklärungsmodell. Die Randbedingungen sind teleologischer Natur, und insofern unterscheidet sich Küppers' Verwendung des Begriffs von der üblichen. Problematisch wird seine Argumentation insbesondere dann, wenn er die Maschinenmetapher auf Lebewesen überträgt. Wo ist da der Konstrukteur? Es ist zwar in der Tat so, dass biologische Organismen durch ihr Genom einer speziellen Randbedingung – einem Programm – unterworfen sind. Dies muss aber von der bewussten Zielsetzung durch den Maschinenkonstrukteur unterschieden werden.²⁶⁴

Die Erklärung von Komplexität mittels komplexer Randbedingungen sieht sich aber auch mit der Tatsache konfrontiert, dass sehr einfache Systeme (etwa zelluläre Automaten, wie wir noch sehen werden) mit einem einfachen Regelset komplexes Verhalten zeigen können.

Grundsätzlich muss man auch Klarheit darüber erlangen, was der komplexe Charakter von Randbedingungen überhaupt sein soll. Wahrscheinlich kommt man über intuitive Komplexität (viele verschiedene Randbedingungen) nicht hinaus.²⁶⁵ Inwieweit man diese mit einem Komplexitätsmass erfassen will, bleibt ein offenes Problem. Ein solches ist lediglich dann möglich, wenn ein Programm (z.B. das Genom eines Lebewesens) als Randbedingung involviert ist. Dieses kann man beispielsweise bezüglich seines algorithmischen Informationsgehaltes untersuchen, der dann als Komplexitätsmass gilt. Die Frage nach der Entstehung des Programms selbst ist eine andere.

²⁶¹ Barrow (1992) beschreibt die Suche nach dieser „Theorie für Alles“ und die damit verbundenen Probleme. Als neuste Kandidatin gilt heute offenbar die duale Stringtheorie, vergleiche dazu Mukerjee (1996).

²⁶² Ausgeführt wird dieses Problem in Lévy-Leblond (1991).

²⁶³ Küppers (1992), S. 248-252.

²⁶⁴ Für die Bezeichnung zielgerichteter Abläufe in Organismen verwendet man den Ausdruck „teleonomisch“. Ein teleonomisches Verhalten verdankt seine Zielgerichtetheit einem Programm. Vergleiche dazu Mayr (1979).

²⁶⁵ Feistel et al. (1989) gehen von dieser Ansicht aus und kommen zum Schluss, dass die im Laufe der Evolution entstandenen Strukturen durchaus komplexer sein können als die Randbedingungen, an welche sie sich anpassen, S. 14.

2.4. Biologie

Die Biologie ist gleichsam das Paradebeispiel einer „Wissenschaft des Komplexen“.²⁶⁶ In der Tat gelten Lebewesen als paradigmatische Beispiele komplexer Systeme,²⁶⁷ eine Ansicht, die sicher einleuchtet. Andere gehen noch weiter: *Gad Yagil* beispielsweise bezeichnet die Fähigkeit, Komplexität zu erzeugen, als eine Grundeigenschaft lebender Systeme.²⁶⁸ Auch wird im Zusammenhang mit biologischen Systemen oft von einer „Schwellenkomplexität“ gesprochen. So könne man erst ab einem bestimmten Schwellenwert der (quantitativen) Komplexität eines Systems von Leben sprechen. John von Neumann hat diese Idee als erster ausgeführt. Wir stellen sie im folgenden Einschub genauer vor:

John von Neumann und die Schwelle der Komplexität:²⁶⁹ *John von Neumann* hat in verschiedensten Gebieten bahnbrechende Arbeiten geleistet. Er gehört zu den Mitbegründern der Automatentheorie, an welcher er seit Beginn der 40er Jahre arbeitet. Dabei versteht er Automaten nicht unbedingt im heutigen Sinn. Vielmehr war seine Arbeit vom Gedanken geleitet, Gemeinsamkeiten von Lebewesen (verstanden als natürliche Automaten) und künstlichen Automaten in dieselbe Theorie zu fassen. Dies betrifft sowohl deren Struktur wie Organisation, die Rolle der Sprache und Information, sowie das Programm und die Kontrolle solcher Automaten. Das Problem der Komplexität tritt dabei vor allem in zwei Bereichen auf: Erstens geht es um die Zuverlässigkeit von Automaten, welche durch wachsende Komplexität reduziert wird. Zweitens geht es um die Fähigkeit der Selbstreproduktion, welche erst ab einer bestimmten Komplexität möglich sein kann.

Den Begriff der Komplexität selbst hat von Neumann nicht genau expliziert. Er ist zwar der Ansicht, dieser werde primär durch die Anzahl der Komponenten charakterisiert. Er glaubt aber, dass damit nicht der gesamte Bedeutungsumfang von Komplexität erfasst wird. So scheint es eine Eigenschaft komplexer Systeme zu sein, auf interne Fehler derart reagieren zu können, dass die Gesamtfunktion nicht beeinträchtigt wird. Komplexe Automaten können sich gewissermassen selbst betrachten und reorganisieren.

Von Neumann strebt den Bau selbstreproduzierender Automaten an. Drei Faktoren limitieren dieses Unterfangen: So darf die Grösse der Komponenten einen bestimmten Wert nicht überschreiten, da deren Vernetzung ansonsten schwierig werden wird. Auch darf deren Fehlerhaftigkeit das Funktionieren des Gesamtsystems nicht entscheidend stören. Schliesslich fehlt eine Theorie der logischen Organisation solcher Elemente. Von Neumann stellt sich vor allem dem dritten Unterfangen.

Um dieses durchzuführen, sind fünf Aspekte zu untersuchen: Erstens muss die Unterscheidung analog-digital analysiert werden. Organismen bedienen sich offensichtlich beider Prozesseigenschaften. Während beispielsweise das Genom ein digitaler Informationsspeicher ist, lässt sich der Stoffwechsel analog verstehen. Aber auch künstliche Automaten können analoge Elemente besitzen, z.B. einen Oszillograph-Output. Zweitens müssen die verwendeten Materialien in Betracht gezogen werden. Organische Komponenten eines Lebewesens besitzen (zumindest teilweise) die Fähigkeit der Selbstreparatur. Drittens muss die Komplexität des Automaten selbst betrachtet werden, was den zentralen Punkt des Unterfangens darstellt. Offenbar ist dessen Komplexität unterhalb einer bestimmten Schwelle degenerativ bzw. Selbstreproduktion bedarf einer minimalen Komplexität. Hier taucht erstmals die Idee der Schwellenkomplexität auf. Viertens muss die logische Organisation untersucht werden. Dabei muss die Organisation des Automaten selbst von der Organisation einer Berechnung unterschieden werden. Fünftens ist die Zuverlässigkeit in Betracht zu ziehen. Je grösser ein System ist, desto mehr Fehler können auftreten. Ein komplexes System, das keine Fehler machen kann, ist unmöglich, demnach muss ein solches eine gewisse Fehlertoleranz haben.

Zentral ist die Idee der Schwellenkomplexität.²⁷⁰ Dies insbesondere für die sogenannte „Complication“, d.h. die Fähigkeit des Automaten, etwas zu produzieren. So sind Automaten, deren Komplexität

²⁶⁶ So äussert sich beispielsweise Fogelman Soulié (1991): „On peut dire que, d’une certaine façon, la biologie est la science où la complexité est la plus présente.“, S. 185.

²⁶⁷ Küppers (1991b), S. 19.

²⁶⁸ Yagil (1983): „May it not be plausible to suggest that the capacity to generate and propagate complexity, and not just order, is a principal property where the biological world departs from the physical universe?“, S. 22.

²⁶⁹ Die folgenden Ausführungen basieren auf von Neumann (1966). Siehe auch von Neumann (1956).

²⁷⁰ Siehe dazu auch Kauffman (1993), der ein vergleichbares Konzept vertritt; S. 289. Kauffman setzt diese Schwelle auch in Beziehung mit emergenten Eigenschaften des Systems, die bei Überschreiten von dieser zutage treten; S. 337.

eine bestimmte Schwelle überschritten hat, nicht nur in der Lage, sich selbst zu reproduzieren. Vielmehr kann die Komplexität des Erzeugten sogar höher sein als jene des Erzeugers.²⁷¹ Als Paradebeispiele solcher Automaten gelten natürlich Lebewesen, die im Verlauf der Evolution komplexere Lebensformen hervorgebracht haben. Andererseits sind Automaten unterhalb dieser Komplexitätsschwelle degenerativ. So sind heutige Robotersysteme zwar durchaus in der Lage, ein Auto zum großen Teil selbst zu produzieren. Die Gesamtheit der Roboter ist aber komplexer als das produzierte Fahrzeug. Mit dieser Komplexitätsschwelle wird also zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Automatentypen differenziert, wie Henri Atlan feststellt.²⁷² Die Frage ist, wie dies erklärt werden kann.

Ein erstes Problem betrifft die Verständlichkeit des Komplexitätsbegriffs. Von Neumann hat diesen, wie erwähnt, nicht ausgearbeitet, was die Charakterisierung dieser „Schwelle“ erschwert. Sicher ist, dass mit dem erwähnten „Anstieg“ der Komplexität ein quantitatives Element involviert ist, das bei Überschreitung der Schwelle mit einem qualitativen Wechsel einhergeht. Lediglich die Anzahl der Komponenten als Mass kann die geforderten Bedingungen sicher nicht erfüllen. Ein solches wäre zu willkürlich von der Art der Komponenten abhängig. Klar ist also, dass eine präzise Charakterisierung einer solchen Komplexitätsschwelle auch ein Komplexitätsmass benötigt. Ausserdem muss der qualitative Aspekt erläutert werden. Von Neumann sieht diesen darin, dass Automaten, deren Komplexität diese Schwelle überschritten hat, ihre eigene Beschreibung enthalten müssen.²⁷³ Damit ist zwar ein notwendiges, aber kein hinreichendes Kriterium gegeben. So muss der Automat auch in der Lage sein, die Beschreibung so umzusetzen, dass er tatsächlich sein Duplikat reproduzieren kann.

Wir erkennen also, dass eine Präzisierung der Schwellenkomplexität mit einigen Schwierigkeiten verbunden ist. Wichtig ist das Konzept insofern, als dass es Komplexität und die Trennung von lebenden (d.h. sich selbst reproduzierenden) und nichtlebenden Systemen in einen Zusammenhang bringt. Inwieweit sich dabei das Problem der Emergenz stellt, bleibt als weitere Frage offen.

In der Biologie wird Komplexität unter den verschiedensten Gesichtspunkten thematisiert. Dabei geht es auch in dieser Disziplin um die Suche nach einer quantitativen Komplexität, denn erst mit einer solchen lassen sich die verschiedenen, zuvor teilweise angesprochenen Probleme überhaupt präzise formulieren.

Zentral ist dabei die Frage, was biologische Komplexität überhaupt sein soll. Dieses Problem wird vor allem bezüglich Organismen gestellt. Dabei spielen verwandte Konzepte wie Organisation und Ordnung eine wichtige Rolle.²⁷⁴ Interessanterweise stellt sich selten explizit die Frage nach einer Emergenzkomplexität.

Unterscheiden müssen wir diese vom „Argument der Komplexität“ des Vitalismus. Der Vitalismus bezeichnet eine Strömung der theoretischen Biologie und Naturphilosophie vor allem des 19. Jahrhunderts. Diese will das Vorhandensein von Leben auf ein Prinzip zurückführen, welchem die anorganische Materie nicht unterworfen ist. Der Vitalismus behauptet, dass die Komplexität biologischer Systeme nicht im Rahmen physikalischer oder chemischer Theorien erklärt werden kann, sondern dass diese Komplexität ein Ausdruck vitalistischer Prinzipien ist. Auch die Zunahme der Komplexität in der Evolution liesse sich aufgrund solcher Theorien nicht erklären.²⁷⁵ Der Bezug auf vitalistische Prinzipien unterscheidet

²⁷¹ Hinegardner et al. (1983) halten dieses Konzept für mangelhaft: „The complete system can never make something more complex than itself“ (S. 13). Vielmehr ist Einfluss von aussen notwendig, damit ein Organismus komplexere Nachkommen als er selbst erzeugen kann: „Without an outside source an organism cannot regularly produce offspring more complex than itself (...)“, S. 13. Diese Einflüsse von aussen bestimmen den Evolutionsprozess.

²⁷² Atlan (1991), S. 14.

²⁷³ Auch Pattee sieht in der Eigenschaft, dass ein System seine eigene Beschreibung enthält, ein grundlegendes Charakteristikum komplexer Systeme. Damit verfolgt er letztlich ein linguistisches Konzept von Komplexität: „The complexity therefore resides more in the constraints of the syntax and the writing, reading and executing mechanisms than in the dynamical „works“ of the system.“, S. 260

²⁷⁴ Die theoretische Biologie gilt gleichsam als Disziplin, die sich solche Fragen stellt. Aufschwung erlangte diese Fachrichtung in Zusammenhang mit den von C.H. Waddington in den Jahren 1968 bis 1971 organisierten Tagungen „Towards a Theoretical Biology“. Grundsätzlich geht es um die Suche nach generellen Prinzipien bezüglich Ordnung (Organisation und Komplexität) zur Charakterisierung lebender Systeme sowie um die Suche nach Prinzipien der Selbstorganisation, welchen die Entwicklungsprozesse unterliegen, und deren Beziehung zu den funktionalen Bedürfnissen des Organismus in seiner spezifischen Umgebung (Goodwin et al. 1989, S. XV).

²⁷⁵ Vergleiche dazu Bronowsky (1970).

diesen „vitalistischen“ Komplexitätsbegriff vom emergenten. Heutzutage gilt die vitalistische Position als erledigt, so dass wir uns hier nicht weiter damit beschäftigen werden.

Was ist biologische Komplexität? Die Behauptung, ein lebendes System sei komplex, ist intuitiv zwar einleuchtend, formal aber schwierig zu fassen. Ansätze in diese Richtung stützen oftmals auf den algorithmischen Informationsgehalt ab, d.h. die Schwierigkeit, einen Organismus zu beschreiben, soll grundsätzlich als Komplexitätsmass dienen.

Gregory J. Chaitin verwendet direkt das Konzept des algorithmischen Informationsgehaltes,²⁷⁶ während *Ralph Hinegardner et al.* lediglich die Grösse der minimalen Beschreibung (und nicht die Grösse des Algorithmus zur Erzeugung der Beschreibung) verwenden.²⁷⁷

Alle diese Ansätze sind mit einem grundsätzlichen relativierenden Manko behaftet: Sie sind von der Auflösung der Beschreibung abhängig. Ob man eine Zelle auf der Ebene der Atome, Moleküle oder Organelle beschreibt, macht bezüglich des Umfangs der Information einen grossen Unterschied.²⁷⁸

Andere Autoren kritisieren diesen informationstheoretischen Ansatz, da vor allem die Bedeutung von Information im biologischen Kontext beachtet werden muss.²⁷⁹ Ein Vertreter dieses „Bedeutungs-Ansatzes“ ist *Henri Atlan*. Seine Ideen stellen wir im folgenden Einschub genauer vor:²⁸⁰

Henri Atlan und die Bedeutung der Komplexität:²⁸¹ Der Mediziner und Biologe *Henri Atlan* hat sich in seinem Werk mit Themen wie Selbstorganisation und Komplexität auseinandergesetzt und dabei vor allem dem Problem der Bedeutung von Information im biologischen Kontext Beachtung geschenkt. Der Term „Bedeutung“ wird dabei nicht im Sinn der Semantik verwendet, wo dieser meist die Intension eines Begriffs bezeichnet. Vielmehr geht es um eine Eingrenzung des Shannonschen Informationsbegriffs, der rein syntaktisch definiert ist. Dieser ist deshalb beispielsweise für das Genom von Lebewesen nur schlecht anwendbar, da er nicht zwischen kodierenden und nicht-kodierenden DNA-Sequenzen zu unterscheiden vermag. Bedeutungsvolle biologische Information ist im Fall des Genoms eines Lebewesens jene, welche einen Zusammenhang zu physiologischen Funktionen hat. Bedeutungsvolle DNA kodiert also beispielsweise für ein Enzym. Die Semantik von biologischer Information ist für Atlan funktional gegeben. Damit ist nicht nur das Genom gemeint. So können bestimmte strukturelle Eigenschaften von Lebewesen einen Bezug zu deren Funktion haben, während andere Eigenschaften rein zufällig sind. Diese Unterscheidung in der Praxis zu treffen, ist aber ein überaus schwieriges Unterfangen.

Dieses Konzept der bedeutungsvollen Information hat auch einen Einfluss auf Atlans Bemühungen, ein Mass für Komplexität zu finden. Grundsätzlich versteht er unter der Komplexität eines (natürlichen) Systems die Schwierigkeit, dieses zu verstehen. Diese Aussage ist nicht leicht zu explizieren. So ist nicht klar, was mit „verstehen“ genau gemeint ist. Atlan setzt dieses Verstehen mit der Kenntnis über die Struktur eines Systems und mit jener über deren Verknüpfung mit der Funktion des Systems in Verbindung. Diese ist in Form von bedeutungsvoller Information gegeben. Je grösser die zu ermittelnde Menge solch bedeutungsvoller Information zu einem natürlichen System ist, desto komplexer ist dieses. So jedenfalls verstehen wir Atlans Ansatz. Zugegebenermassen bleiben eine Reihe von Fragen offen, die nicht beantwortet werden konnten. So schlägt Atlan als mögliches Komplexitätsmass die „Sophistication“ vor, welches bis auf eine Konstante mit Bennetts logischer Tiefe übereinstimmt (vgl. Abschnitt 2.2 in diesem Teil). Es ist uns nicht klar, warum dieses Mass die bedeutungsvolle Information im vorher erläuterten Sinn messen soll. Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Komplexität

²⁷⁶ Chaitin (1979).

²⁷⁷ Hinegardner et al. (1983), S. 8/9.

²⁷⁸ Es mag aber durchaus allgemein akzeptierte Ebenen der Auflösung geben, wie Hinegardner (1983) meint: „There are often what might be called „natural“ levels of resolution. These are identified by the consensus of investigators immersed in a given field.“, S. 9.

²⁷⁹ Buiatti (1987) hält informationstheoretische Ansätze in der Biologie gar für ganz verfehlt: „(...) biological information cannot be treated according to „classical“ information theory.“, S. 344.

²⁸⁰ Weitere solche Vertreter sind etwa Küppers (1991b) und Buiatti (1987). Koppel (1987) unterscheidet zwischen einer „totalen Komplexität“ und einer „bedeutungsvollen Komplexität“, wobei erstere im Sinne der Kolmogoroff-Komplexität zu verstehen ist. S. 1087.

²⁸¹ Die folgenden Ausführungen basieren auf Atlan (1987), Atlan (1988) und Atlan (1991).

eines Systems de facto erst dann quantitativ bestimmt werden kann, wenn das System verstanden ist. Wie man die Schwierigkeit messen soll, das System zu verstehen, erscheint nur so plausibel.

Weiter präsentiert Atlan eine Unterscheidung zwischen natürlichen und künstlichen Systemen, die auf seinen Komplexitätsbegriff einen Einfluss hat. Künstliche Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie unter definierten Bedingungen und Zielen entstanden sind. Ihre Finalität ist a priori gegeben, wie Atlan meint, und aus diesem Grund möchte er den Begriff der Komplexität auf Artefakte gar nicht anwenden. Die Kenntnis über deren Struktur ist von vornherein gegeben, so dass künstliche Systeme bezüglich deren *Kompliziertheit* (anstelle von Komplexität) klassifiziert werden sollten. Bei natürlichen Systemen ist die Situation anders. Dort ist man damit konfrontiert, dass deren „Konstruktionsplan“ erst ermittelt werden muss. Entsprechend will er den Begriff „komplex“ nur auf natürliche Systeme anwenden, wobei dieser wie angesprochen auf die Schwierigkeit zur Ermittlung von Kenntnissen über solche hinweist. Der Bezug dieser Verwendungsweise von „komplex“ zur quantitativen Komplexität, welche bedeutungsvolle Information messen soll, bleibt aber unklar.

Als weitere Vorschläge zur Bestimmung der Komplexität eines Organismus werden gehandelt: die Anzahl verschiedener Zelltypen²⁸² bzw. die Anzahl verschiedener Komponenten allgemein;²⁸³ morphologische Komplexität, d.h. Anzahl verschiedener Strukturelemente *und* deren Verknüpfung;²⁸⁴ der genetische Informationsgehalt;²⁸⁵ oder die Anzahl Homologen²⁸⁶. Weiter ist man sich einig, dass lediglich die Zunahme der Anzahl gleicher Komponenten die Komplexität eines Objektes nicht vergrössern soll.²⁸⁷

Probleme stellen sich auch bei der Ontogenese eines Organismus: Von aussen betrachtet erscheint ein ausgewachsenes Tier sicher komplexer als dessen befruchtete Eizelle. *Ralph Hinegardner et al.* sind aber der Ansicht, dass ein biologisch brauchbarer Komplexitätsbegriff diesen Unterschied vernachlässigen sollte: „(...) the adult can be only slightly more complex than the egg or the seed.“ Die befruchtete Eizelle enthält ja die Informationen zur Entwicklung des Organismus. Demnach will Hinegardner ein Komplexitätsmass, das potentielle Aspekte ebenso berücksichtigt wie aktuelle.²⁸⁸

Frank Papentin präsentiert schliesslich ein Mass für Strukturkomplexität biologischer Systeme (siehe auch Yagils Mass im vorhergehenden Abschnitt).²⁸⁹ Er unterscheidet zwischen organisierter und unorganisierter Komplexität (hier nicht im Sinne Weavers). Die organisierte Komplexität ist ein Mass für Invarianten der Struktur, gestützt auf gegebene Symmetrien und dergleichen, während die unorganisierte Komplexität ein Mass für die möglichen strukturellen Realisierungen basierend auf diesen Invarianten darstellt. Als Beispiel kann man ein Kohlenwasserstoffmolekül angeben, das durch Anzahl und Art der

²⁸² Bonner (1988) sieht in der Anzahl Zelltypen einen direkten Bezug zum Grad der Arbeitsteiligkeit eines Organismus, was als Komplexitätsmass dienen kann (S. 98/99). Dies gilt auch für Ökosysteme, wo Artenreichtum auf eine Arbeitsteilung in einem gewissen Sinn hinweist. Demnach könne die Komplexität einer Organismengemeinschaft durch die Anzahl der vertretenen Arten gemessen werden (S. 100/101). Grundlage dieser Quantifizierung der Komplexität bleibt dabei der Grad der funktionalen Differenzierung. Bei der Bestimmung der Anzahl Zellen beispielsweise stellen sich schwierige praktische Probleme, worauf Bonner selbst hinweist (S. 120). Dabei muss auch das Verhältnis der Organismengrösse zur Zelldifferenzierung beachtet werden (S. 121). Bonner kommt zum Schluss, dass grössere Organismen komplexer sind, wenngleich dieser Zusammenhang nur sehr grob ist (S. 221). Letztlich lässt sich eine „size-complexity-rule“ etablieren: Gemäss dieser nimmt die Anzahl Arten ab, je grösser die entsprechenden Organismen sind, während die Anzahl Zellen zunimmt (S. 224/225).

²⁸³ Thompson (1982), S. 258.

²⁸⁴ McShea (1991), S. 304.

²⁸⁵ Zum Beispiel in Küppers (1991b); Küppers (1992), S. 247; Saunders et al. (1981), S. 519. Dieses Unterfangen ist mit dem Problem konfrontiert, dass die rein quantitative Grösse des Genom (der DNA-Gehalt) sich überhaupt nicht dazu eignet, die Komplexität des Organismus zu bestimmen. Etwa Papentin (1982) weist darauf hin, dass je nach Organismus eine teils beträchtliche Menge DNA offenbar für kein Protein kodiert und in diesem Sinn redundant ist. Vergleiche auch Bonner (1988), der sogar bemerkt: „The general consensus is that there is no direct correlation between complexity and the genome size of an organism.“, S. 135. Weiter muss auch auf die Komplexität des Genoms selbst hingewiesen werden, denn einige Gene dienen lediglich der Kontrolle von Strukturgenen. Insofern stellen sich schwierige Probleme bezüglich der Zuschreibung von Informationseinheiten zu solchen Genen. Vergleiche dazu Buiatti (1987) und auch Koppel et al. (1991).

²⁸⁶ Riedl (1975), S. 163. Eine Homologie ist eine durch gemeinsame stammesgeschichtliche Herkunft verursachte Ähnlichkeit von Strukturen (z.B. Organen) von Organismen. Organismen mit der gleichen Anzahl homologer Strukturen wären demnach gleich komplex.

²⁸⁷ Hinegardner et al. (1983), S. 8.

²⁸⁸ Hinegardner et al. (1983), S. 13/14.

²⁸⁹ Papentin (1980).

Atome und Atombindungen gegeben ist (organisierte Komplexität), dessen genaue Form aber durch thermische Bewegungen variieren kann (unorganisierte Komplexität). Papentin bringt danach den Grad der Unordnung (primary disorder) mit der unorganisierten Komplexität in Beziehung, den Grad der Organisation (secondary order) mit der organisierten Komplexität.²⁹⁰ Weiter formalisiert er den Messprozess für die Bestimmung von Komplexität: Zuerst muss das gegebene Muster modelliert werden, üblicherweise durch einen endlichen, verbundenen (connected) Graphen, dieser wird in einem zweiten Schritt zu einer linearen Symbolanordnung kodiert, die danach komprimiert wird. Schliesslich wird die Komplexität der Symbolreihe gemessen, bei Papentin gleichbedeutend mit deren Länge. Der Prozess der Komprimierung erscheint aber willkürlich, worauf auch Papentin hinweist.²⁹¹ Sein Komplexitätsmass hat also einen inhärent subjektiven Charakter.

Es werden auch explizit Versuche gemacht, die Komplexität bestimmter Objekte anhand der vorgeschlagenen Masse zu berechnen, so etwa von organischen Molekülen²⁹² oder von Bakterien²⁹³.

Schwierigkeiten entstehen, wenn die vorgeschlagenen Komplexitätsmasse auf verschiedene Organismen angewendet werden sollen. *Carlos Castrodeza* weist darauf hin, dass ein Komplexitätsvergleich zwischen einer Bakterie und einem höheren Organismus durchaus seine Tücken hat.²⁹⁴ Was soll überhaupt verglichen werden? Das Bakterium mit einer Körperzelle oder mit dem Gesamtorganismus? Das Problem wurzelt dabei in den unterschiedlichen verwendeten Auflösungen.

Zusammenfassend können wir feststellen, dass eine Vielzahl von Versuchen zur Bestimmung biologischer Komplexität unternommen wurden. Manche von ihnen sind mit schwerwiegenden Problemen behaftet, die vor allem am praktischen Nutzen der Masse zweifeln lassen. Trotzdem laufen die Bemühungen weiter. Einige Autoren sind sogar der Ansicht, dass Überlegungen zur Komplexität biologischer Systeme wesentlichen Aufschluss über allgemeine Prinzipien zur Strukturbildung geben.²⁹⁵ Am extremsten entwickelte *Robert Rosen* diese Ansicht. Seine schwierig zu verstehenden Ideen skizzieren wir im folgenden Einschub:

Robert Rosen und die Überwindung des Newtonschen Paradigmas:²⁹⁶ Der theoretische Biologe *Robert Rosen* formuliert einen der radikalsten Vorschläge bezüglich einer wissenschaftlichen Untersuchung von Komplexität. Für ihn erfordert die Untersuchung komplexer Systeme eine völlig neue theoretische Welt mitsamt einer neuen Physik. Damit einhergehend soll das sogenannte Newtonsche Paradigma aufgegeben werden, das gewissermassen nur die einfachen Probleme zum Gegenstand hat und eine reduktionistische Methode fordert. Die Probleme mit diesem Paradigma, so Rosen, kristallisieren sich bei der Behandlung der Biologie heraus. Dies ist eine interessante Behauptung, wird doch Biologie in den vergangenen drei Jahrzehnten primär reduktionistisch verstanden, d.h. man will biologische Probleme auf der Stufe der Molekularbiologie lösen. Dieser Sachverhalt ist Rosen natürlich nicht unbekannt, er interpretiert ihn als das Eindringen des Newtonschen Paradigmas in die biologischen Wissenschaften. Rosen bezweifelt aber auf einer sehr grundsätzlichen Ebene den Nutzen dieses Paradigmas in der Biologie.

In einem ersten Schritt muss die Rede vom Newtonschen Paradigma expliziert werden. Rosen macht dazu einen Rückgriff auf die vier aristotelischen Kategorien der Kausalität: die Material-Ursache (z.B. das Haus ist, was es ist, wegen dem Holz usw., aus welchem es besteht), die Form-Ursache (das Haus ist die Realisierung eines Plans)²⁹⁷, die Wirk-Ursache (das Haus ist, wegen der Arbeit seiner Erbauer) und schliesslich die Zweck-Ursache (das Haus ist, weil jemand ein Dach über dem Kopf will). Drei

²⁹⁰ Details siehe bei Papentin (1980), S. 442/443.

²⁹¹ Genaueres siehe Papentin (1980), S. 430-438.

²⁹² Papentin (1982) führt dies für eine Reihe von Molekülen explizit durch.

²⁹³ Hinegardner et al. (1983) kommen in einer Mischrechnung von DNA-Komplexität und Strukturkomplexität zum Schluss, ein Bakterium mit Durchmesser von 1 μm habe eine Komplexität von 9×10^{16} Bits, S. 17-19.

²⁹⁴ Castrodeza (1978), S. 470.

²⁹⁵ Mittenthal (1989), S. 267.

²⁹⁶ Die folgenden Ausführungen basieren vor allem auf Rosen (1985b). Beachte aber auch Rosen (1986a) und Rosen (1987).

²⁹⁷ Hier begeht Rosen unserer Ansicht nach einen Fehler. Die Formursache im Sinne von Aristoteles bezieht sich auf die Form des Gegenstandes und nicht auf den Plan, aufgrund welcher der Gegenstand gefertigt wird. Rosen meint vielleicht die Urbild-Ursache (causa exemplaris), welche der platonischen Tradition entstammt.

dieser vier Kausalitäten finden ihren Widerhall im mathematischen Formalismus des Newtonschen Paradigmas: Die materiale Ursache geht einher mit dem Anfangszustand, die formale Ursache mit dem Genom (bzw. dem Programm) und die Wirkungsursache in einem Operator. Die teleologische Ursache hat in diesem Bild nichts zu suchen. Rosen hält fest, dass die Anwendung des Newtonschen Paradigmas verlangt, dass diese drei Kategorien der Kausalität in die vorgestellten, voneinander unabhängigen mathematischen Strukturen separiert werden können. Systeme, bei denen dies möglich ist, nennt Rosen „einfach“, andere Systeme sind „komplex“.

Rosen präsentiert weiter einen Vorschlag zum Verfahren der Modellbildung. So ist erstens ein natürliches System gegeben, dessen Verhalten durch Kausalität bestimmt ist, d.h. wir nehmen an, dass sich Gesetze finden lassen, die bestimmte Aspekte des Verhaltens des Systems festlegen. In einem Kodierungsprozess versuchen wir, ein formales „Äquivalent“ des natürlichen Systems zu finden, wobei die Kausalität durch Implikation innerhalb dieses Systems ersetzt wird. Schliesslich wird in einem Prozess der Dekodierung aus dem formalen System eine Voraussage über das natürliche System gewonnen. Im Versuch, eine Kongruenz zwischen der kausalen Ordnung im natürlichen System und der implikativen Ordnung im formalen System herzustellen, sieht Rosen den wahren Charakter des Naturgesetzes. Das formale System nennt Rosen Modell, das natürliche System die Realisation des Modells. Für bestimmte Arten vor Realisationen eignen sich bestimmte Modelle.

Rosen stellt sich nun folgende Frage: Was passiert, wenn sich die Kausalität der Realisation nicht im Sinne des Newtonschen Paradigmas auf das Modell übertragen lässt, d.h. sich in voneinander unabhängigen mathematischen Strukturen widerspiegelt?

Bei einem komplexen ist man gemäss Rosen mit folgenden Problemen konfrontiert: So könne man die kausalen Kategorien nicht separieren, da einige Elemente des Systems mehrere kausale Rollen spielen. Weiter können Modelle vom „Newtonschen Typ“ das natürliche System nur lokal und zeitlich begrenzt darstellen. So gibt es also eine Reihe einfacher Beschreibungen des Systems, die aber nicht zu einer einzigen, einfachen Beschreibung zusammengefasst werden können. Komplexe Systeme liegen ausserhalb des Rahmens der konventionellen Physik.

Rosen muss weiter zeigen, dass es komplexe Systeme in seinem Sinn überhaupt gibt und dass es auf der formalen Seite ein mathematisches System gibt, das sich zur Modellierung komplexer Systeme eignet. Für die erste Frage gibt er eine klare Antwort: Die Biologie ist voll solcher komplexer Systeme, die sich dem Newtonschen Paradigma entziehen. Für die Modellierung solcher Systeme schlägt er die Kategorientheorie vor, eine junge mathematische Disziplin, die als Brücke zwischen Algebra und Topologie verstanden werden kann.

Diese kurze Präsentation des Standpunkts von Rosen hinterlässt ein ungutes Gefühl. Seine Argumentation ist schwierig zu verstehen, was ein kritisches Eingehen auf diese sehr erschwert. Man sollte ihm wohl eine eigene Untersuchung widmen, um herauszufinden, mit welchen Implikationen der von ihm geforderte Wandel des Weltbildes verbunden ist und ob seine Argumentation überhaupt stimmig ist. Das kann hier aber nicht geleistet werden.

2.5. Evolutionstheorie

Die Evolutionstheorie ist eigentlich der Biologie zuzurechnen. Bezüglich Komplexität wird innerhalb der Evolutionstheorie eine eigene Fragestellung untersucht, so dass wir diese in einem separaten Abschnitt vorstellen. Primär geht es um den Zusammenhang von Komplexität und Evolution. Hauptstreitpunkt ist die Frage, ob man von einem notwendigen Zuwachs von Komplexität bei Evolutions-Prozessen sprechen kann oder ob eine solche Zunahme nur eine Nebenfolge der Evolution ist. Oder mit den Worten *John Tyler Bonners*: „Why has there been an evolution from the primitive bacteria of billions of years ago to the large and complex organisms of today?“²⁹⁸ Die Problemstellung berührt übrigens auch die Emergenzdebatte. So behauptet die Position der „emergenten Evolution“, dass im Evolutionsprozess neue Komplexitätsebenen (complex levels) entstanden sind, die sich durch neue, grundsätzlich nicht voraussagbare Qualitäten auszeichnen.²⁹⁹

²⁹⁸ Bonner (1988), S. ix.

²⁹⁹ Vergleiche etwa Pap (1952), S. 302.

Voraussetzung für die Diskussion ist dabei das Vorhandensein eines Masses für biologische Komplexität. Ansonsten macht die Rede von einer Komplexitätszunahme keinen Sinn. Erstaunlich ist dabei, dass dieser Aspekt meist nur am Rande gestreift wird. Dies erschwert Vergleiche zwischen den verschiedenen, vorgeschlagenen Theorien.

Komplexitätszunahme als Naturgesetz?: Man ist mit dem Faktum konfrontiert, dass die Komplexität biologischer Organismen – vergleicht man die ersten Lebensformen mit den jetzigen – im Verlauf der Evolution offensichtlich zugenommen hat. Diese Zunahme erscheint rätselhaft angesichts des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, der einen Trend in Richtung ungeordneter Strukturen postuliert, was Lebewesen ja nicht sind. Der Zweite Hauptsatz widerspricht dieser zwar nicht, da lebende Systeme offen sind und die Netto-Entropiezunahme, welche mit dem Aufbau geordneter Strukturen verbunden ist, an die Umgebung abgegeben werden kann. Trotzdem stellen sich einige Autoren die Frage, ob es neben dem Zweiten Hauptsatz nicht ein vergleichbares Naturgesetz gibt, das eine Zunahme von Komplexität unter bestimmten Randbedingungen postuliert.³⁰⁰ Dabei geht es nicht nur um die biologische Evolution allein, sondern um die Evolution des ganzen Kosmos.³⁰¹ Wir werden uns im Folgenden vor allem dieser Frage widmen, wobei wir uns auf die Biologie beschränken und die wichtigsten Positionen vorstellen.

Das Problem der Zunahme: Zuerst muss die Frage geklärt werden, inwiefern man überhaupt von einer Zunahme an Komplexität im Evolutionsverlauf sprechen kann. *John Tyler Bonner* sieht eine „extension of the upper limit of complexity during the course of evolution“.³⁰² Dies zeigt sich auf zwei Ebenen: Einerseits hat die Zelldifferenzierung zugenommen. Bei Tieren mit einem entwickelten Nervensystem hat sich zudem eine ganze Facette von Verhaltensmöglichkeiten entwickelt. Andererseits hat auch die Komplexität von Ökosystemen zugenommen, was durch eine Zunahme der Artenvielfalt gezeigt werde.³⁰³

Andere Autoren sind hingegen der Ansicht, dass die wesentliche Komplexitätszunahme im Kambrium erfolgte und danach kaum mehr von einer bedeutenden Zunahme der Komplexität gesprochen werden kann.³⁰⁴ Ausserdem gäbe es genügend Beispiele, die zeigen, dass die Komplexität von Organismen im Evolutionsverlauf auch wieder abnehmen kann.³⁰⁵

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Rede von einer Komplexitätszunahme unter Berücksichtigung der gesamten Zeitspanne der Evolution sicher gerechtfertigt ist. Es gibt aber genügend Hinweise auf sprunghafte Entwicklungen, wenn man die Komplexität mit der Anzahl Arten in Verbindung bringt. Die Forderung, dass ein „Naturgesetz der Komplexitätszunahme“ solcher Sprünge erklären soll, erschwert das Unterfangen, ein solches zu etablieren.

Theorien zum Zusammenhang Evolution-Komplexität: Wird ein notwendiger Zusammenhang zwischen Komplexitätszunahme und Evolution propagiert, lassen sich zwei Arten von Mechanismen unterscheiden

³⁰⁰ Diese Problemstellung diskutiert insbesondere Bronowski (1970), S. 229. Wicken (1979) sieht hier aber kein eigentliches Problem. Er setzt die Komplexität von Organismen mit deren Organisation in Beziehung. Der Zweite Hauptsatz aber wirkt nicht auf die Organisation: „The Second Law acts do dissipate order, not organization (...)“, S. 362.

³⁰¹ Davies (1989) schreibt etwa: „(...) the unidirectional advance of biological complexity is but one example of the general tendency of the universe as a whole to advance in complexity.“, S. 110. Auch Feistel et al. (1989) sehen „general trends of evolution to ‘higher levels’ or ‘more efficiency’ or ‘more complexity’.“, S. 11. Spätestens mit der Vorstellung einer universalen Komplexitätszunahme kommt man aber mit dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik in Konflikt. Dieser lässt eine solche Zunahme nur lokal zu. Kampis et al. (1987) sprechen in diesem Zusammenhang auch vom „Von-Neumann-Komplexitäts-Paradox“. Innerhalb ihrer Theorie sehen sie eine Lösung für dieses Paradox., S. 116-120.

³⁰² Bonner (1988), S. 220.

³⁰³ Dieses Argument vergisst aber, dass es im Laufe der Evolution gravierende Artensterben und auch explosionsartige Zunahmen der Anzahl Arten gegeben hat. Die Entwicklung ist also alles andere als monoton steigend.

³⁰⁴ So etwa Hinegardner et al. (1983): „There clearly have been complexity increases [during evolution], but we conclude that most of these would have occurred in the pre-cambrian. There is no compelling evidence that the overall process of evolution through the past 500 or so million years has been accompanied by continuing and progressive complexity increases.“, S. 16. Vergleiche dazu auch Levinton (1993).

³⁰⁵ Castrodeza (1978).

den, wie *Daniel W. McShea* ausführt:³⁰⁶ Internalistische Theorien sehen in der Komplexitätszunahme eine inhärente Eigenschaft komplexer Systeme. Externalisten sehen die Komplexitätszunahme im Zusammenhang mit dem Prozess der Selektion oder von Umwelteinflüssen.

Erstere Position wird von *P.T. Saunders* und *M.W. Ho* vertreten.³⁰⁷ Die Zunahme der Komplexität wird dabei als Konsequenz eines sich selbst organisierenden Systems gesehen, das seine Organisation unter dem Druck der Anpassung ändert. Das Komplexitätsmass für biologische Organismen definieren sie einfach: Das Mass ist gegeben durch die Anzahl der verschiedenen Arten von Komponenten.³⁰⁸ Auf die sicher vorhandenen praktischen Probleme zur Bestimmung dieser Anzahl gehen sie aber nicht weiter ein. Saunders und Ho postulieren zwei Gesetze der Evolution, „survival of the fittest“ und „increase in complexity“.³⁰⁹ In einem später erschienenen Paper haben sie auf die Relativität des Komplexitätsbegriffs bezüglich einen Beobachter hingewiesen und ein „principle of minimum increase in complexity“ formuliert.³¹⁰ Dieses besagt im wesentlichen, dass je unwahrscheinlicher das Auftauchen einer Eigenschaft im Evolutionsprozess ist, desto höher der resultierende Komplexitätszuwachs bei deren Auftauchen ist.³¹¹ Die Begründung für dieses Prinzip erscheint aber nicht unproblematisch, worauf wir an dieser Stelle nicht weiter eingehen können.

Als Beispiel einer externalistischen Position nennt McShea *John Tyler Bonner*.³¹² Dieser argumentiert, dass komplexere Organismen effizienter sind und demnach bevorteilt selektioniert werden. *C.H. Waddington* wiederum sieht die Komplexitätszunahme im Zusammenhang mit den zunehmenden Anforderungen, welche ökologische Nischen an Organismen stellen.³¹³

Andere Autoren verneinen generell einen notwendigen Zusammenhang zwischen Komplexität und Evolution. Als Beispiel nennen wir *J. Wynne McCoy*, der gegen Saunders und Ho argumentiert.³¹⁴ Gemäss McCoy ist es sehr schwierig, empirische Evidenz für eine Zunahme der Komplexität zu finden.

Weiter darf man die Evolution nicht einfach als einen linearen Prozess verstehen, mit der Bakterie am Anfang und dem Menschen am Schluss. Vielmehr gibt es manche „Irrwege“, die mit dem Aussterben der jeweiligen Art enden. Es ist schwierig, diese in das Bild einer zunehmenden Komplexität einzupassen. McCoy kommt zum Schluss, dass man höchstens davon sprechen könne, der Prozess der Evolution *erlaube* eine Zunahme der Komplexität.

Daniel W. McShea selbst schliesslich vertritt die Ansicht, dass diese Kontroverse zur Zeit gar nicht entschieden werden kann.³¹⁵ Sowohl für die Behauptung einer Zunahme der Komplexität in der Evolution wie auch für die Gegenannahme fehle empirische Evidenz. McShea zeigt dies anhand einer Untersuchung verschiedener, z.T. oben angesprochener Theorien, welche für eine Zunahme von Komplexität argumentieren. Das wenige verwendete Material wird meist selektiv so dargestellt, um die gewünschte Behauptung zu unterstützen.³¹⁶ McShea sieht folgende Erklärung für die Neigung, Evolution und Komplexität in einen Zusammenhang zu bringen. Dahinter versteckt sich die Tendenz, Evolution mit Fortschritt in Verbindung zu bringen. Dieser Fortschritt manifestiert sich in einer höheren Komplexität der

³⁰⁶ McShea (1991), S. 305/306.

³⁰⁷ Vergleiche dazu deren Publikationen der Jahre 1976, 1977, und 1981. Ebenfalls diese Position vertritt Wicken (1979).

³⁰⁸ Saunders et al. (1976), S. 377.

³⁰⁹ Saunders et al. (1976), S. 383.

³¹⁰ Saunders et al. (1981).

³¹¹ Saunders et al. (1981), S. 521-524. Gemäss Saunders und Ho ist dieses Prinzip mit Prigogines Prinzip der minimalen Entropieproduktion äquivalent.

³¹² Bonner (1988).

³¹³ Waddington (1969b).

³¹⁴ McCoy (1977).

³¹⁵ McShea (1991).

³¹⁶ McShea (1991): „(...) the examples were deliberately chosen in order to make a case for what we might call uniform complexity increase, and no finite list can make this case.“, S. 311.

Organismen. Mit dem Bezug auf Komplexität kann man gleichsam heimlich einer Ansicht frönen, die aus der offiziellen Evolutionstheorie längst verstossen wurde.³¹⁷

Als „Aussenseiter“ in dieser Diskussion ist schliesslich der Wissenschaftler und Jesuitenpater *Theilhard de Chardin* zu nennen, dessen Ideen wir hier der Vollständigkeit halber kurz vorstellen. De Chardin steht exemplarisch für jene Autoren, welche Komplexität bzw. deren Zunahme in der Evolution einen Aspekt des Fortschritts zuschreiben wollen:³¹⁸

Theilhard de Chardins „Komplexifikation“: Teilhard de Chardin hat ein Gesetz der „Komplexifikation“ aufgestellt, das nicht nur eine notwendige Zunahme der Komplexität in der Evolution postuliert, sondern diese zudem als Fortschritt interpretiert, gerichtet auf den sogenannten „Punkt Omega“. Die Evolution kann dabei nichts de novo hervorbringen, so dass beispielsweise selbst Atome schon eine Art Vorläufer des Bewusstseins enthalten müssen.³¹⁹ De Chardins Komplexitätsbegriff ist eine Funktion zweier Faktoren: Spezialisierung der Systemkomponenten und Integration dieser. De Chardin unterscheidet auch zwei Energiearten, welche ein System in einem organisierten Zustand belassen: tangentielle Energie und radiale Energie. Damit wollte er dem Einwand des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik begegnen, der sich nur auf die tangentielle Energie beziehe. Die radiale Energie nimmt hingegen gleichzeitig mit der Zunahme der Komplexität zu, was mit einer Zunahme des Bewusstseins einhergeht. Diesen Zusammenhang nannte er das „Komplexitäts-Bewusstseins-Gesetz“.³²⁰ Mit all diesen Ideen steht de Chardin aber sicher ausserhalb des wissenschaftlich Akzeptierten, wie *Edward O. Dodson* ausführt.³²¹

2.6. Ökologie

Innerhalb der Ökologie wird der Zusammenhang zwischen der Komplexität und der Stabilität eines Ökosystems thematisiert. Diskutiert wird die Frage, ob komplexere Ökosysteme stabiler sind als einfache oder ob ein solcher Zusammenhang nicht feststellbar ist. Zuweilen findet sich der Begriff „Komplexität“ aber auch in anderen Kontexten. Schon *Antonietta Di Giulio* zeigte in ihrer Diplomarbeit aber auf, dass bezüglich der Verwendungsweise des Komplexitätsbegriffs keine Einigkeit besteht.³²² „Komplexität“ wird zwar als theoretischer Term verwendet, meist aber nicht definiert, sondern vorausgesetzt.

Komplexität und Stabilität: Soll der Zusammenhang zwischen Komplexität und Stabilität geklärt werden, stellt sich zuerst die Frage, wie das zu untersuchende Ökosystem dargestellt werden soll. Eng damit verknüpft ist die schon angesprochene Unterscheidung zwischen statischer und dynamischer Komplexität. Für den ersten Fall kann man das Ökosystem formal als Netzwerk auffassen, das Stoffumsätze aufzeigt. Als Komplexitätsmass wird dann beispielsweise von *Jean-Arcady Meyer* die Konnektivität des Systems vorgeschlagen, d.h. das Verhältnis zur Anzahl der effektiv realisierten Verknüpfungen zu jener aller möglichen Verknüpfungen zwischen den Komponenten des Ökosystems.³²³ *Robert M. May* hingegen

³¹⁷ Auch in den Gesellschaftswissenschaften ist man von einer derartigen Verknüpfung von Komplexität und Fortschritt nicht gefeiert. So sehen Sabisch et al. (1987) einen Zusammenhang zwischen gesellschaftlichem Fortschritt und Komplexitätszunahme (S. 481), wobei aber letzterer Begriff nicht expliziert wird.

³¹⁸ Siehe vor allem de Chardin (1959). Vergleiche auch Csikszentmihalyi (1970) und Dodson (1984).

³¹⁹ Kummer (1987) meint dazu aber (im Gegensatz zu Dodson): „Das Bewusstsein ist also bei Teilhard an die Komplexität der Materie gebunden und nicht an ihre Grundbausteine; es ist ein Phänomen der Anordnung oder besser der „Zentrierung“ der Materie, aber nicht eines einzelnen Materiebausteins für sich genommen; es ist in der Richtung der Zusammensetzung zu suchen und nicht präformistisch in dem enthalten, woraus sich etwas zusammensetzt.“, S. 227.

³²⁰ Um dieses zu verdeutlichen, verwendet er ein etwas seltsam anmutendes „Ellipsen-Modell“. Näheres dazu in Lay (1969).

³²¹ Dodson (1984), Kapitel 15.

³²² Di Giulio (1993), S. 31.

³²³ Meyer (1988) und Meyer (1991).

benutzt lediglich die Anzahl und Art der Verknüpfungen in einem Ökosystem zur Bestimmung von dessen Komplexität.³²⁴ *John Tyler Bonner* hat schliesslich vorgeschlagen, einfach die Anzahl Spezies als Komplexitätsmass zu verwenden (vgl. Fussnote 282).

Im Fall der dynamischen Komplexität interessieren zeitliche Änderungen des untersuchten Ökosystems.³²⁵ Entsprechend muss das System erst einmal durch eine Differentialgleichung dargestellt werden, was in der Praxis meist nicht einfach ist.³²⁶ Die eigentliche Charakterisierung der dynamischen Komplexität ist aber, wie bereits erwähnt, mit einigen grundsätzlichen Schwierigkeiten verbunden.

Der angesprochene Zusammenhang zwischen Stabilität und Komplexität verbindet statische und dynamische Aspekte. Die Rede von komplexen Ökosystemen betrifft meistens die statische Komplexität, während Stabilität sich auf das dynamische Verhalten des Ökosystems bezieht.³²⁷ *Robert M. May* hat mehrfach darauf hingewiesen, dass kein notwendiger Zusammenhang zwischen der Stabilität und der Komplexität eines Ökosystems vorhanden ist.³²⁸ Ab einer bestimmten Komplexität, gemessen in der Konnektivität des Systems, ist der Übergang von Stabilität zu Unstabilität überdies sehr abrupt. Dabei handelt es sich um eine Eigenschaft des Modells, die zumindest den Schluss nahelegt, dass auch in der Natur kein notwendiger Zusammenhang zwischen Stabilität und Komplexität vorhanden sein muss.³²⁹ Hingegen sind nicht alle komplexen Systeme notwendig instabil. Vielmehr ist gemäss *May* der Zusammenhang zwischen Stabilität und Komplexität gegeben durch: „stability permits complexity.“³³⁰

2.7. Systemtheorie

Die Systemtheorie hat Wesentliches zur Bestimmung des Komplexitätsbegriffs geleistet. Dies vermag nicht zu erstaunen, gehört doch die Analyse komplexer Systeme zu einer ihrer Hauptaufgaben. Im Folgenden werden Aspekte und Definitionen von Komplexität, welche in der Systemtheorie Verwendung finden, vorgestellt. Schon an dieser Stelle können wir aber festhalten, dass auch die Systemtheorie kein gültiges, globales Mass für Komplexität kennt.

Charakter der Komplexität: Zwei Grundprobleme des Komplexitätsbegriffs, die wir in dieser Arbeit untersuchen, finden sich auch innerhalb der Systemtheorie aufgenommen. So wird erstens Emergenzkomplexität propagiert. Dies wird meist mit dem Hinweis verbunden, dass komplexe Systeme aus diesem Grund anderer Forschungsmethoden bedürfen.³³¹ Zweitens wird auf die Beobachterrelativität der quantitativen Komplexität hingewiesen, so etwa vom Kybernetiker *W. Ross Ashby*.³³² *John L. Casti* sieht in

³²⁴ *May* (1973). *Allen et al.* (1982) betonen – im Unterschied zu *May* –, dass eine grosse Anzahl von Variablen nicht unbedingt ein Merkmal von Komplexität sein muss. Vielmehr sind Nichtlinearität und Asymmetrie (in welchem Sinn dies gemeint ist, wird nicht klar) zentral für die Komplexität eines Ökosystems, S. xiv. Auch *Casti* (1979) bemerkt: “(...) a naive pronouncement that a system is complex just because it has many components fails to hold under even superficial analysis.“, S. 105.

³²⁵ Als bekanntes Beispiel kann das Räuber-Beute-Modell von *Lodka und Volterra* genannt werden (*Beddington et al.*, 1975). Hier wird darauf hingewiesen, dass scheinbar zufällige Fluktuationen in Räuber- und Beutepopulationen, die in der Natur beobachtet werden, ihren Ursprung in der chaotischen Dynamik des Systems haben können, S. 60.

³²⁶ Darauf weisen etwa *Richardson et al.* (1982) hin, wobei sie sich aber auf das generelle Problem beziehen und nicht nur die Modellierung von Ökosystemen meinen. Mit einem „phenomenological calculus“ versuchen sie, Ursachen mit resultierenden dynamischen Effekten auf phänomenologische Art und Weise zu verbinden. Auf diesen Ansatz gehen wir aber nicht weiter ein.

³²⁷ Vergleiche dazu etwa *Lewins* (1977).

³²⁸ *May* (1972) und *May* (1973).

³²⁹ *May* (1973): „(...) in general mathematical models of multispecies communities, complexity tends to beget instability rather than stability. (...) This straightforward mathematical fact contradicts the intuitive verbal argument often invoked, to the effect that the greater the number of links and alternative pathways in the web, the greater the change of absorbing environmental shocks (...)“., S. 74/75.

³³⁰ *May* (1973), S. 76. *Prigogine et al.* (1982) meinen in diesem Zusammenhang auch, dass die Stabilität eines Ökosystems dessen Komplexität limitiert. S. 36.

³³¹ Vgl. dazu *Bechtel et al.* (1993), Chap. 2.

³³² *Ashby* (1973): „To the neurophysiologist, the brain, as a network of fibres and a soup of enzymes, is certainly complex; and equally the transmission of a detailed description of it would require much time. To a butcher the brain is simple, for he has to

dieser Relativität den Grund, dass die aus der Informatik und der Physik stammenden Vorschläge zur Bestimmung eines Komplexitätsmasses von Systemtheoretikern kaum gebraucht werden.³³³ Dieses Problem wurde aber nicht als prinzipielles Hindernis zur Bestimmung eines Komplexitätsmasses aufgefasst.³³⁴

Um den Begriff der Komplexität selbst zu charakterisieren, wurden verschiedene Vorschläge gemacht: Generell bestimmen die Anzahl der Elemente und deren Verknüpfungen ein komplexes System,³³⁵ wobei letztere nichtlinear sind bzw. Rückkopplung vorkommt.³³⁶ Weiter ist die Struktur komplexer Systeme asymmetrisch und nichtholonom, d.h. es kann sein, dass Teile des Systems eine Zeitlang ausserhalb der Kontrolle des Systems liegen.³³⁷ Zudem gibt es irreduzible Elemente.³³⁸ Das Verhalten des Systems ist schlecht prognostizierbar.³³⁹ Von einem eigentlichen Kontrollzentrum kann schliesslich nicht gesprochen werden.³⁴⁰

Systemtheoretiker zur Komplexität: Im Folgenden bieten wir eine Übersicht verschiedener Autoren, die innerhalb der Systemtheorie zu einer Präzisierung des Komplexitätsbegriffs beigetragen haben. Die einzelnen Beiträge werden nicht abschliessend kommentiert.

Als sehr wichtig haben sich die Ideen *Herbert A. Simons* erwiesen, der die Komplexität eines Systems mit dessen hierarchischen Struktur in Verbindung bringt. Seine Position stellen wir im folgenden Einschub genauer vor.

Herbert A. Simon und die Architektur der Komplexität:³⁴¹ Mit dem 1962 erschienenen Aufsatz „The Architecture of Complexity“ hat *Herbert A. Simon* eine überaus einflussreiche Arbeit zum Begriff der Komplexität geschrieben, was durch dessen breite Rezeption deutlich gemacht wird.³⁴² Simon erhielt 1978 den Nobelpreis für seine Arbeiten über das Verständnis und das Management komplexer Entscheidungsprozesse in sozialen Systemen. Er erhielt damit den ersten für die Systemtheorie verliehenen Nobelpreis überhaupt.

Simons Aufsatz ist motiviert von der Suche nach einer universalen Eigenschaft verschiedenster komplexer Systeme. Er verwendet weitgehend den intuitiven Komplexitätsbegriff, d.h. er charakterisiert ein komplexes System dahingehend, dass dieses aus vielen Elementen besteht, die auf eine nicht einfache Weise miteinander gekoppelt sind. Dabei ist „das Ganze mehr als die Summe seiner Teile“, jedoch nicht in einem absolut-metaphysischen Sinn, wie Simon meint. Vielmehr ist es ein schwieriges Unterfangen, aufgrund der Eigenschaften der Teile auf die Eigenschaften des Ganzen zu schliessen. Im Angesicht der Komplexität, so Simon, könne also ein Reduktionist zugleich ein pragmatischer Holist

distinguish it from only about thirty other „meats“ (...).“ (zitiert nach Flood et al. (1993), S. 33). Das Problem der Beobachterrelativität thematisieren weiter Casti (1986b), Flood (1987), Flood et al. (1993), Klir (1985) und Löfgren (1977).

³³³ Casti (1992), S. 12.

³³⁴ Auf relativierende Aspekte bezüglich der Etablierung eines Komplexitätsmasses haben auch andere Autoren hingewiesen: Isola (1987) meint dazu: „But on the other hand it is undeniable that, approaching „complex“ systems, the *a priori* selection of the „relevant properties“ plays an essential role. *Something becomes observable only when it has become logically possible in an abstract context.*“; S. 27. Kampis et al. (1987) sprechen in diesem Zusammenhang von der *Relevanz* eines Komplexitätsbegriffs. Ein solcher ist relevant, wenn er adäquat und interpretabel ist. Die Adäquatheit zeigt sich darin, dass der Komplexitätsbegriff *entsprechend den Bedürfnissen des Beobachters* [unsere Hervorhebung] klassifiziert, indem z.B. ein Stein und ein Lebewesen nicht als gleich komplex gelten. Interpretabel ist ein Komplexitätsbegriff, wenn man die von diesem geforderte Beschreibung mit anderen vergleichen kann (S. 112/113). Kampis et al. sehen keinen grundsätzlichen Einwand gegen die Etablierung eines Komplexitätsmasses. Dieses ist aber sicher relativ zu einem Sprachsystem. Leeuwenberg (1973) versucht schliesslich, Zusammenhänge zwischen subjektiv wahrgenommener Komplexität und objektivem Informationsgehalt von Mustern zu finden.

³³⁵ Flood et al. (1993), Chapter. 2.

³³⁶ Flood et al. (1993), Chapter. 2; Casti (1986b), S. 148.

³³⁷ Flood et al. (1993), Chapter 2.

³³⁸ Casti (1986b), S. 149.

³³⁹ Casti (1986b), S. 147.

³⁴⁰ Casti (1986b), S. 148.

³⁴¹ Die folgenden Ausführungen basieren auf Simon (1962). Vergleiche aber auch Simon (1973) und Simon (1990).

³⁴² Simons Arbeit wird etwa zitiert von: Allen et al. (1982), S. 6; Atlan (1991), S. 36; Baas, S. 525; Bechtel et al. (1993), Chapter 2; Bonner (1988), S. 98; Brunner et al. (1971), S. 84; Casti (1986), S. 162; Gottinger (1983), S. 4; Huberman (1989), S. 129; Kornwachs et al. (1975), S. 57; Luhmann (1990) S. 162; Sahal (1976), S. 5; Turney (1989), S. 518-524;

sein. Diese Formulierung ist natürlich überhaupt nicht präzise.³⁴³ Simon verschleiern damit, dass er kein Vertreter der Emergenzkomplexität ist. Dies wird deutlich, wenn man seine Position mit jener C. West Churchmans vergleicht, was in einem folgenden Absatz geschehen wird.

Simon untersucht, welche Strukturaspekte die Komplexität von Systemen ausmachen. Seine zentrale Aussage lautet, dass komplexe Systeme *hierarchisch* organisiert sind. Den Begriff Hierarchie versteht er dabei nicht in einem autoritären Sinn, d.h. nicht im Sinn einer Kontrollhierarchie. Vielmehr ist ein hierarchisch aufgebautes System in Subsysteme gegliedert, diese ebenfalls, bis man zu einer Ebene von „atomaren“ Subsystemen gelangt. Hierarchien mit zusätzlichen Kontrollelementen nennt er formal. Als Beispiel dient die Führungsstruktur eines Unternehmens. Hierarchisch aufgebaute Systeme besitzen die wichtige Eigenschaft der Beinahe-Zerlegbarkeit. Diese beruht darauf, dass Wechselwirkungen zwischen den Subsystemen schwächer sind als jene innerhalb der Subsysteme.

Es lässt sich kaum bestreiten, dass hierarchische Systeme in der Natur überaus oft vorkommen. Ein Molekül besteht beispielsweise aus Atomen, wobei die Wechselwirkung zwischen den Atomen schwächer sind als jene innerhalb der Atome. Auch Lebewesen lassen sich als hierarchisch geordnete Strukturen auffassen. Hier ist aber die Sachlage nicht gar so einfach, wie Simon sie darstellt. So sind es bei Organismen funktionale Kriterien, welche zur Hierarchisierung Organismus-Organ-Gewebe-Zellen führen, und Beinahe-Zerlegbarkeit ist nicht unbedingt in jedem Fall gegeben (z.B. an Grenzflächen von Organen). Dies ist aber kein grundsätzlicher Einwand gegen Simons Gedanke der hierarchischen Organisation. Hierarchien finden sich schliesslich auch in Zeichensystemen, mit den einzelnen Buchstaben des gewählten Alphabets als atomare Komponenten.

Weiter gilt es zu berücksichtigen, dass manche Hierarchien sehr flach sind. Im Fall eines einatomigen Kristallgitters etwa (vorausgesetzt man betrachtet die Atome als primäre Komponenten und nicht die Elementarteilchen, aus welchen sie zusammengesetzt sind) besteht dieses nur aus zwei Hierarchiestufen. Dieser Fall macht auch klar, dass nicht unbedingt Übereinstimmung darüber bestehen muss, was als atomares Subsystem gelten soll. Doch auch dieser Einwand berührt die Grundidee Simons nicht. Im praktischen Fall hängt dies von einer Konvention ab.

Simon stellt hingegen nicht nur fest, dass komplexe Systeme einen hierarchischen Aufbau besitzen. Er bietet auch eine Erklärung an, warum dies – sowohl in der Natur als auch im Fall von Artefakten – so sein muss. Der Grund liegt in der Art und Weise der Entstehung solcher Systeme, was er an der bekannten *Uhrmacherparabel* von Hora und Tempus erläutert:

Es gab einmal zwei Uhrmacher, Hora und Tempus, die beide exzellente Uhren herstellten. Die Geschäfte gingen glänzend, und in den Werkstätten der beiden klingelte das Telefon unablässig. Horas Geschäfte blühten, während Tempus immer ärmer und ärmer wurde, bis er sein Geschäft schliessen musste. Was war der Grund? Beide Uhren waren etwa gleich komplex, Hora und Tempus waren beide fähige Uhrmacher und arbeiteten unter den gleichen äusseren Bedingungen.

Der Grund liegt in der Art und Weise, wie Hora bzw. Tempus seine Uhren zusammenbaute. Wir nehmen an, beide Uhren bestehen aus je 1000 Teilen. Weiter haben beide (zu Beginn) gleich viele Kunden, d.h. sie werden während ihrer Arbeit gleich oft durch Telefonanrufe gestört (zum Szenario gehört natürlich auch, dass keiner auf die Idee kommt, einen Mitarbeiter zu beschäftigen). Ein solcher Unterbruch führt dazu, dass der davon betroffene Arbeitsschritt (d.h. der Einbau eines Teils) neu begonnen werden muss. Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Unterbruchs, d.h. einer unvollständigen Konstruktion, betrage für beide p . Im Durchschnitt kostet jede Unterbrechung die Zeit zum Zusammenbau von $1/p$ Teilen, d.h. die voraussichtliche Anzahl der vor der Unterbrechung zusammengebauten Teile. Nehmen wir nun an, die Wahrscheinlichkeit p eines Unterbruchs betrage 0.01, und spielen wir das Szenario für Hora und Tempus durch: Tempus baut seine Uhr Stück für Stück zusammen. Horas Uhren hingegen bestehen aus 10 Untereinheiten, diese wiederum aus 10 Untereinheiten, die schliesslich aus je 10 Teilen bestehen. Hora muss also 111 Gruppen pro Uhr herstellen, Tempus nur eine. Tempus hingegen verliert im Durchschnitt 20 mal so viel Zeit wie Hora pro Unterbrechung, denn bei ihm sind im Durchschnitt 100 Teile betroffen, bei Hora nur 5 Teile (oder Untereinheiten). Schliesslich wird Tempus nur 43 Uhren pro Million Versuche vollenden ($(1-p)^{1000} \approx 43 \cdot 10^{-6}$), währenddem Hora neun von zehn Uhren fertigstellt ($(1-p)^{10} \approx 9 \cdot 10^{-1}$), d.h. Tempus benötigt pro Uhr fast 21'000mal soviel Versuche wie Hora. Daraus ergibt sich schliesslich, dass Tempus für eine Uhr rund 3800mal soviel Zeit braucht ($1/111 \cdot 20 \cdot 21'000$) wie Hora. Kein Wunder also, dass Tempus in die Pleite segelt...

³⁴³ Darauf weist beispielsweise Ulrich (1987) hin.

Das Gleichnis von Hora und Tempus macht klar, dass hierarchisch organisierte Strukturen in der Evolution Vorteile besitzen. Komplexe Systeme, die durch den Aufbau stabiler Zwischenkonfigurationen entstanden sind, brauchen weniger Zeit zu ihrer Entwicklung als jene, die direkt aus den Einzelbausteinen entstehen. Auch wirken sich Fehler in Teilsystemen nicht unbedingt auf das Gesamtsystem aus, so dass hierarchische Systeme dadurch ebenfalls evolutive Vorteile besitzen. Dieser Aspekt ist aber nur bedingt gültig, da die Bedeutung einzelner Subsysteme für das Gesamtsystem unterschiedlich sein kann. Ausserdem können hierarchische Systeme auch Ausdruck einer arbeitsteiligen Differenzierung sein. Dann wirken sich Defekte in Teilsystemen verheerend aus, da andere Teilsysteme den Arbeitsschritt des defekten Teils nicht mehr ausführen können. Demnach setzt die Evolution einer Hierarchisierung von Systemen Grenzen, wenn diese mit einer funktionalen Differenzierung einhergeht.

Abgesehen von diesen Überlegungen erscheint Simons Argumentation durchaus plausibel. Anwendung findet sie beispielsweise in der Biologie bei der Erklärung der Entstehung von Mitochondrien und Chloroplasten. So wird angenommen, dass diese Organellen ursprünglich selbständige Lebensformen waren, die erst später ihren Weg ins Cytoplasma von Eukaryoten „fanden“ und funktionelle Untereinheiten dieser Zellen wurden.

Der hierarchische Aufbau komplexer Systeme hat schliesslich auch einen Einfluss auf die Möglichkeit ihrer Erkenn- und Beschreibbarkeit. Hierarchische Systeme lassen sich aufgrund ihrer Struktur meist effizient beschreiben. Je nach Problem kann man unterschiedliche Subsysteme als atomar definieren und gewinnt dadurch angepasste Beschreibungen. Weiter können gleiche Subsysteme zusammengefasst werden, d.h. Redundanz ist vorhanden. Simon meint schliesslich – und das ist ein zentraler Punkt –, dass die beinahe-zerlegbare, hierarchische Struktur komplexer Systeme deren Erkennbarkeit überhaupt erst *ermöglicht*. Oder anders gesagt, wenn es komplexe, nichthierarchische Systeme in der Welt gibt, könnten sich diese in einem beträchtlichen Grad unserer Beobachtung und unserem Verständnis entziehen. Diesbezüglich lässt sich als Beispiel die Turbulenz in Flüssigkeiten anführen. Das Fourier-Spektrum einer turbulenten Dynamik ist extrem nichthierarchisch in dem Sinn, dass jede Frequenz die jeweils anderen beeinflussen kann. Tatsächlich ist Turbulenz ein sehr schwierig zu verstehendes Phänomen.

Auch *William Bechtel* und *Robert C. Richardson* betonen die Bedeutung einer zumindest modularen Struktur von Systemen bezüglich deren wissenschaftlichen Untersuchung.³⁴⁴ Sie präsentieren eine Forschungsstrategie für Systeme, die auf „decomposition“³⁴⁵ und „localisation“³⁴⁶ aufbaut. Grundsätzlich ist damit gemeint, dass man in einem System verschiedene Komponenten unterscheiden kann (Dekomposition) und diesen Komponenten die Verantwortlichkeit für ein gewisses Systemverhalten zuschreiben kann (Lokalisation).

Nicht ganz klar ist bei Bechtel et al. die Verwendung des Begriffs „komplex“. So wird die Möglichkeit offengelassen, dass komplexe Systeme nicht die Eigenschaften haben können, die ein erfolgreiches Anwenden ihrer Forschungsstrategie zulassen.³⁴⁷ Trotzdem sind sie der Ansicht, dass es richtig ist, diese Strategie auch im Falle komplexer Systeme anzuwenden.³⁴⁸ Klar ist aber, dass es Systeme gibt, wo die Strategie der Dekomposition und der Lokalisation scheitert. Solche nennen Bechtel et al. „integrierte Systeme“, d.h. „systemic organization is significantly involved in determining constituent functions.“³⁴⁹

Angesichts komplexer Systeme stellen sich also schwierige Fragen: So kann man beim Fehlschlag der Anwendung ihrer Forschungsstrategie nicht unbedingt wissen, ob die Lokalisierung der Komponenten falsch oder ob das System tatsächlich integriert ist. Die Untersuchung komplexer Systeme er-

³⁴⁴ Bechtel et al. (1993).

³⁴⁵ Bechtel et al. (1993): „Decomposition assumes that one activity of a whole system is the product of a set of subordinate functions performed in the system“, S. 23.

³⁴⁶ Bechtel et al. (1993): „Localisation is the identification of the different activities proposed in a task decomposition with the behaviour or capacities of specific components.“, S. 24.

³⁴⁷ Bechtel et al. (1993): „Some machines, however, are much more complex: one component may affect and be affected by several others, with a cascading effect; or they may be significant feedback from „later“ to „earlier“ stages. In the latter case, what is functionally dependent, becomes unclear. *Interaction among components becomes critical. Mechanisms of this latter kind are complex systems.*“, S. 18

³⁴⁸ Bechtel et al. (1993): „Whether decomposition and localisation will succeed or fail in a given case, these heuristics are important because they provide us with a tractable strategy for attacking the explanatory problems complex systems present.“, S. 27.

³⁴⁹ Bechtel et al. (1993), S. 26.

fordert letztlich also die Annahme eines zumindest modularen Aufbaus des Systems. Ist dies nicht gegeben, scheitert die Strategie der Dekomposition und der Lokalisation.

Gerade die Überlegungen von Bechtel et al. machen deutlich, dass man bezüglich der hierarchischen (oder zumindest modularen) Struktur und der Komplexität eines Systems unterschiedlicher Ansicht sein kann. C. West Churchman vertritt die Ansicht, dass gerade die *nichthierarchischen Systeme* (bzw. die integrierten Systeme im Sinne von Bechtel et al.) als komplex zu bezeichnen sind.³⁵⁰ Churchman setzt dabei die Komplexität eines Systems mit vorhandenen Grenzen für deren Erklärbarkeit in Verbindung. Er ist zudem der Ansicht, dass komplexe Systeme emergente Phänomene zeigen. Der Unterschied zwischen der Position Churchmans und Simons lässt sich also dadurch charakterisieren, dass ersterer für Emergenzkomplexität eintritt und mit Hinweis auf Grenzen der Erklärbarkeit solcher Systeme wohl auch eine quantitative Komplexität ablehnt. Simon hingegen präsentiert einen Ansatz, der komplexe Systeme der wissenschaftlichen Erkenntnis zugänglich macht. Damit ist gemeint, dass hierarchisch strukturierte komplexe Systeme vollständig verstanden werden können, wenngleich dies im Einzelfall nicht einfach sein muss. Er lässt aber einen Bereich offen, wo sich tatsächlich grosse (evt. sogar unlösbare?) Schwierigkeiten stellen. Zu dieser nicht-hierarchischen Komplexität äussert er sich aber nicht weiter.³⁵¹

Es ist also nicht nur eine Frage der Definition, inwieweit Hierarchie als Strukturmerkmal komplexer Systeme gelten soll. Damit verbinden sich auch verschiedene Ansichten zum Stellenwert komplexer Systeme in den Wissenschaften.

John L. Casti präsentiert drei grundsätzliche Charakteristika für komplexe Systeme:³⁵² Sie sind anpassungsfähig, haben eine hierarchische Struktur und können sowohl bezüglich ihrer Struktur als auch ihres Verhaltens Emergenz zeigen. Grundsätzlich sind für die Komplexität eines Systems zwei Aspekte zu untersuchen: die mathematische Struktur der irreduziblen Komponenten des Systems und die Art der Verknüpfung dieser Komponenten. Wie schon angesprochen, hält Casti Komplexität für ein beobachterrelatives Konzept, d.h. ein Komplexitätsmass ist eine Funktion vom beobachteten System S, vom Beobachter O und von der Wechselwirkung I zwischen S und O. Weiter kann die Wechselwirkung in beide Richtungen erfolgen, d.h. S kann als O figurieren und umgekehrt. Basierend auf dieser Überlegung unterscheidet Casti zwischen *Design-Komplexität* und *Kontroll-Komplexität*. Erstere bezeichnet die Komplexität von S für O, letztere die Komplexität von O für S. Ein System kann nur dann kontrolliert werden, wenn Design- und Kontroll-Komplexität annähernd gleich sind.³⁵³ Wir müssen aber sehen, dass Casti mit dieser Terminologie das Bezugsfeld für den Begriff „komplexes System“ einschränkt. Bei vielen Systemen, die man als komplex bezeichnen möchte (z.B. das Telefonnetzwerk eines Landes), lässt sich die geforderte zweiseitige Wechselwirkung kaum verständlich machen (inwiefern kann ein solches Netzwerk „beobachtet“?). Castis Konzept eignet sich vor allem für soziale Systeme.

Lars Löfgren betrachtet Komplexität als ein kognitives Phänomen.³⁵⁴ Er untersucht also Komplexität unter dem Aspekt, wie Komplexität erkannt wird und welche Lernprozesse damit verbunden sind. Damit ist Löfgren der Ansicht, dass Komplexität im Zusammenhang mit Beschreibungen von Objekten steht und nicht mit den Objekten selbst. Er führt eine Unterscheidung zwischen System und dessen Beschreibung ein und spricht entsprechend von einem Lernprozess, wenn es um die Generierung der Beschreibung geht, und von einem Interpretationsprozess, wenn von der Beschreibung auf das System geschlossen werden soll. Die Schwierigkeit, den Lernprozess durchzuführen, wird als *d-Komplexität* (d für describing) bezeichnet, jene, den Interpretationsprozess durchzuführen, entsprechend als *i-Komplexität*. Er bringt eine Reihe von Präzisierungen, wie beide Arten von Komplexität zu verstehen sind, worauf wir hier nicht weiter eingehen. Zentral ist aber die Abhängigkeit seines Komplexitätsbegriffs von der verwendeten Sprache, mit welcher die Beschreibung des Objektes durchgeführt werden soll.

³⁵⁰ Vergleiche Churchman (1971) und Churchman (1981). Auch Gottinger (1988) verneint die Behauptung, Hierarchien seien als Prototypen komplexer Systeme anzusehen. Hierarchien seien vielmehr gerade das Beispiel einer recht einfachen Organisation, da diese einfach zu beschreiben ist, S. 6/7.

³⁵¹ Ulrich (1987) hat die Positionen Simons und Churchmans in einem fiktiven Dialog gegenübergestellt.

³⁵² Die folgenden Ausführungen richten sich nach Casti (1979) und Casti (1986b).

³⁵³ Vergleiche dazu auch Gottinger (1983), S. 92.

³⁵⁴ Löfgren (1977).

George J. Klir sieht das Problem der Komplexität ebenfalls im Zusammenhang mit dem von einem Beobachter konstruierten System.³⁵⁵ Komplexität ist also klar ein beobachterrelatives Konzept. Um dieses genauer zu untersuchen, etabliert er eine Hierarchie epistemologischer Typen von Systemen: *Quellensystem* (source system), *Datensystem* (data system), *erzeugendes System* (generative system), *Struktursystem* (structure system), *Metasystem* (metasystem), *Meta-Metasystem* usw. Für jedes System hat der Begriff der Komplexität eine verschiedene Bedeutung, was wir an dieser Stelle nicht weiter ausführen wollen. Hingegen lassen sich zwei allgemeine Prinzipien Klirs zur Systemkomplexität angeben: Erstens soll ein Komplexitätsmass proportional zum Informationsaufwand zur Beschreibung des Systems sein. Dabei soll nur syntaktische Information berücksichtigt werden. Zweiten soll die Komplexität eines Systems proportional zum benötigten Informationsaufwand für die Beseitigung von mit dem System assoziierter Unsicherheit gewählt werden. Die Komplexität eines Systems ergibt sich also aus der Schwierigkeit seiner Beschreibung und aus der Schwierigkeit, diese Beschreibung zu perfektionieren. Beim Versuch, eine Systembeschreibung zu vereinfachen, treten die beiden Prinzipien aber miteinander in Konflikt: Reduziert man erstere Informationsmenge, vergrößert man in der Regel die zweite. Dies nennt Klir das „General Simplification Problem“. Es ist aber nicht klar, warum *beide* Aspekte für *ein* Komplexitätsmass berücksichtigt werden sollten. Auf dieses Problem geht Klir nicht weiter ein.

Giovan B. Scuricini schliesslich untersucht Komplexität unter einem praktischen Aspekt, d.h. bezüglich der Kontrolle grosser technologischer Systeme wie Kraftwerke.³⁵⁶ Er formuliert vier Attribute von Komplexität: „Numerosität“ (numerosity), d.h. die totale Anzahl elementarer Komponenten; *Varietät*, d.h. die Anzahl verschiedener Arten von elementaren Komponenten; die *Art der Komponenten* und schliesslich deren *Organisation*. Diese Attribute sorgen dafür, dass bei dem resultierenden komplexen System die Charakteristika der Komponenten nicht mehr erkannt werden können. Probleme zur Bestimmung einer quantitativen Komplexität ergeben sich bei den Attributen drei und vier. So ist die Angabe der Art der Komponenten abhängig vom sprachlichen Kontext, gegeben beispielsweise durch ein Prädikat, eine Formel oder ein Symbol. Dieser variiert mit dem konkreten Problem bzw. mit der Theorie, mit welcher das Problem behandelt wird. Ebenfalls schwierig ist die Situation bei der Organisation, da sehr unterschiedliche Auffassungen darüber existieren, wie man den Grad einer Organisation messen soll.

Vorgeschlagene Komplexitätsmasse: Grundsätzliche Überlegungen, welche Bedingungen ein Komplexitätsmass erfüllen muss, haben sich verschiedene Autoren gemacht. Diese gipfeln in einem eigentlichen „Axiomensystem“ für ein Komplexitätsmass, wobei wir hier Castis Version präsentieren:³⁵⁷

Castis Axiomensystem für ein Komplexitätsmass: Gegeben seien ein System Σ und ein beliebiges Komplexitätsmass $\Theta(\Sigma)$. Das Mass muss folgende Bedingungen erfüllen:

- Hierarchie:* Ist Σ_0 ein Teilsystem von Σ , dann muss gelten: $\Theta(\Sigma_0) \leq \Theta(\Sigma)$
Parallele Komposition: Falls gilt $\Sigma = \Sigma_1 \oplus \dots \oplus \Sigma_k$, dann folgt $\Theta(\Sigma) = \max \Theta(\Sigma_i)$
Serielle Komposition: Falls gilt $\Sigma = \Sigma_1 \otimes \dots \otimes \Sigma_k$, dann folgt $\Theta(\Sigma) \leq \Theta(\Sigma_1) + \dots + \Theta(\Sigma_k)$
Feedback-Komposition: Gibt es einen Feedback-Operator \downarrow von einem System Σ_2 auf Σ_1 , dann gilt: $\Theta(\Sigma_1 \otimes \Sigma_2) \leq \Theta(\Sigma_1) + \Theta(\Sigma_2) + \Theta(\Sigma_2 \downarrow \Sigma_1)$.
Normalisierung: Es existiert eine Teilmenge von Systemen \mathfrak{G} , so dass gilt: $\Theta(\Sigma) = 0$,
 $\forall \Sigma \in \mathfrak{G}$.

Da die Beobachterrelativität eines Komplexitätsmasses innerhalb der Systemtheorie eine wichtige Rolle einnimmt, versuchen verschiedene Autoren, diesen Aspekt bei der Definition eines Komplexitätsmasses einzubeziehen. John L. Castis hat dies versucht, indem er die Anzahl nichtäquivalenter Beschreibungen eines Systems durch einen Beobachter als Komplexitätsmass einführt. Wir stellen diesen Vorschlag in

³⁵⁵ Klir (1985).

³⁵⁶ Scuricini (1988), S. 95-99.

³⁵⁷ Casti (1979), S. 106/107. Vergleichbare Axiomensysteme finden sich in Feistel et al. (1989), S. 135 und Klir (1985), S. 134/135.

einem Einschub vor, verzichten aber auf den mathematischen Formalismus, da sich in diesen Unklarheiten finden, die wir nicht beheben konnten.

John L. Casti und der Beobachter der Komplexität:³⁵⁸ Der Mathematiker und Systemtheoretiker *John L. Casti* versucht, unter Einbezug der Beobachterrelativität ein Komplexitätsmass einzuführen. Er bietet an, die Anzahl nichtäquivalenter Beschreibungen, die ein Beobachter von einem System machen kann, als Mass für die Komplexität eines Systems zu nehmen.³⁵⁹ Dazu definiert er eine Menge von Zuständen, die das System einnehmen kann, sowie eine Anzahl Observablen. Für die Observablen lassen sich Relationen definieren, die er Zustandsgleichung bzw. Beschreibung nennt. Durch Einführung eines Äquivalenzbegriffs lassen sich Äquivalenzklassen solcher Beschreibungen gewinnen. Deren Anzahl ist die Komplexität des Systems. Der mathematische Formalismus erscheint aber in manchen Punkten nicht einleuchtend, z.T. sogar fehlerhaft. Wir haben aus Zeitgründen aber darauf verzichtet, diesen umfassend nachzuprüfen.

Casti sieht im weiteren auch eine Beziehung zwischen dem Konzept der Komplexität und der Existenz von Naturgesetzen: Lässt sich ein System mit einem solchen beschreiben, gibt es nur ein gültiges Modell, und demnach ist das System einfach.³⁶⁰

Letztlich will Casti eine Modelltheorie etablieren. Diese muss klären, welche Relation zwischen einem natürlichen System und dessen Modell besteht, welche Arten mathematischer Systeme sich als Modell eignen, wie man diese miteinander vergleicht, usw. Erst im Kontext einer solchen Theorie lässt sich dann auch Komplexität befriedigend definieren.

Ein anderer Ansatz stammt von *Arthur E. Ferdinand*, der die angesprochene Beobachterrelativität nicht enthält.³⁶¹ Dieser baut auf dem Maximum-Entropie-Prinzip auf. Die Komplexität eines Systems wird dabei mit der Anzahl Fehler (defects) in Verbindung gebracht, die das System haben kann. Ausgangspunkt ist die Computerwissenschaft, und Fehler können z.B. als Programmfehler interpretiert werden. Das System wird als gerichteter Graph aufgefasst. Die formale Einführung des Masses ist wie folgt gegeben:

Defekt-Entropie: Das System sei als *gerichteter Graph* $G(n, \kappa n^\mu \lambda^n)$ gegeben, wobei n die Anzahl der gerichteten Kanten und $\kappa n^\mu \lambda^n$ die Anzahl Knoten ist. Die maximale Anzahl Fehler von $G(n, \kappa n^\mu \lambda^n)$ ist durch m gegeben. Der Komplexitäts-Koeffizient σ sei gegeben durch: $\sigma = \exp(-\alpha/\kappa n^\mu \lambda^n)$ mit α , κ , μ und λ als Systemparametern. σ läuft über die positiven reellen Zahlen inkl. Null. Die mittlere Anzahl der Fehler des Systems ist gegeben durch $E(\sigma, m) = \sigma d/d\sigma \ln Z(\sigma, m)$ mit: $Z(\sigma, m) = (1 - \sigma^{m+1}) / (1 - \sigma)$. Die *Defekt-Entropie* $H(\sigma, m)$ des Systems ist gegeben durch: $H(\sigma, m) = \ln Z(\sigma, m) - E(\sigma, m) \ln \sigma$.

Für $0 \leq \sigma \leq 1$ und m beliebig ist $H(\sigma, m)$ streng monoton steigend, für $\sigma = 1$ erreicht $H(\sigma, m)$ das Maximum mit $H(1, m) = \ln(m + 1)$. Für $\sigma = 0$ ist das System perfekt einfach, für $\sigma \rightarrow \infty$ erreicht das System perfekte Komplexität. Ferdinand untersucht die Umgebung von $\sigma = 1$ genauer und argumentiert, dass dieser Punkt Einfachheit ($\sigma < 1$) von Komplexität ($\sigma > 1$) trennt.

Ausgehend vom Ansatz von Ferdinand entwickelte *Larry George* einen Test für Systemkomplexität.³⁶² Dieser basiert auf der Bestimmung der Differenz zwischen der durchschnittlichen Anzahl von Fehlern und der totalen Anzahl von Komponenten. Gemäss dem Modell von Ferdinand ist nämlich der Erwartungswert der Anzahl Defekte bei komplexen Systemen mindestens halb so gross wie die Anzahl Komponenten, bei einfachen Systemen hingegen weniger als halb so gross. Dabei muss man den Fall mit bekannter Systemgrösse von jenem mit unbekannter Systemgrösse unterscheiden.

³⁵⁸ Die folgenden Ausführungen basieren auf Casti (1979) und Casti (1986b).

³⁵⁹ Übrigens verfolgt auch Rosen (1978) einen ähnlichen Ansatz; vgl. S. 80 und Sect. 5.4. Rosen sieht als Mass für Komplexität die Anzahl verschiedener möglicher Wechselwirkungen eines Beobachters mit einem System, Rosen (1977), S. 229.

³⁶⁰ Casti (1984), S. 9.

³⁶¹ Ferdinand (1974).

³⁶² George (1977).

Joseph V. Cornacchio präzisiert in einer späteren Arbeit den Ansatz von Ferdinand.³⁶³ Er weist insbesondere darauf hin, dass Ferdinands Komplexitätsmass vom Wissen über das System abhängt und in diesem Sinne nicht absolut ist. Damit enthält letztlich auch dieses Mass eine beobachterrelative Komponente, wobei wir an dieser Stelle die Argumentation Cornacchios nicht ausführen wollen.

2.8. Sozial- und Wirtschaftswissenschaften

Wie schon zu Beginn erwähnt, werden wir den Bereich Sozial- und Wirtschaftswissenschaften bezüglich Komplexität nicht umfassend behandeln. In unserem skizzenhaften Überblick untersuchen wir vor allem die Ökonomie und werfen einen Blick auf das Komplexitäts-Konzept des deutschen Soziologen *Niklas Luhmann*.

Der Hauptgrund dieses Seitenblicks auf Sozial- und Wirtschaftswissenschaften liegt darin, dass die Komplexitätsforschung auch jene Bereiche in ihre Untersuchungen einbeziehen will. Es stellt sich demnach die Frage, ob diese Disziplinen einen eigenen Begriff von Komplexität erarbeitet haben, der mit jenem der Komplexitätsforschung in Konflikt treten könnte.

Einige Beispiele: Explizit auseinandergesetzt mit dem Begriff der Komplexität hat sich der Soziologe *Niklas Luhmann*.³⁶⁴ Er bezeichnet ein System als komplex, wenn es aus so vielen Elementen besteht, dass diese nur selektiv miteinander in Beziehung treten können. Komplexität setzt demnach für ein in einer Umwelt handelndes System immer ein Reduktionsverfahren voraus, d.h. bestimmte Muster werden anderen möglichen Mustern vorgezogen.³⁶⁵ Weiter ist die Unterscheidung zwischen System und Umwelt bedeutsam. Letztere ist immer komplexer als das System selbst, meint Luhmann. Insofern muss das System die Komplexität der Umwelt reduzieren, will es in dieser handeln. Komplexere Systeme zeichnen sich schliesslich auch dadurch aus, dass sie mehr und verschiedenartigere Beziehungen zur Umwelt unterhalten können. Dieser kurze Überblick über Luhmanns Komplexitätsverständnis zeigt, dass sich sein Begriff schwer quantifizieren lässt. Luhmanns Charakterisierung scheint mehr in den Bereich der intuitiven Komplexität zu fallen. Ein abschliessendes Urteil lässt sich aber erst nach einer umfassenden Untersuchung aller Schriften Luhmanns bilden, was wir an dieser Stelle aber nicht leisten können.

Hans W. Gottinger charakterisiert die Komplexität sozialwissenschaftlicher Systeme durch vier Aspekte: Das System reagiert sensibel auf Änderungen in der Systemumgebung; dessen Verhalten ist in hohem Masse unabhängig vom Verhalten der Systemkomponenten; das System ist durch „Schwellenkomplexität“ im Sinne von John von Neumann geprägt, über welcher qualitativ neues Systemverhalten entstehen kann; und das System erscheint schliesslich nur teilweise und lokal kontrollierbar.³⁶⁶ Für eine konkrete Bestimmung der Komplexität sozialwissenschaftlicher Systeme verweist er auf die in den Natur- und Computerwissenschaften entwickelten Konzepte, welche sich nach geeigneter Modellierung anwenden lassen sollen. Dieser Verweis auf letztere Wissenschaften findet sich auch an anderer Stelle. *Michael Reed et al.* argumentieren explizit für eine Übernahme von Konzepten (nicht nur jenes der Komplexität) aus Prigogines Nichtgleichgewichts-Thermodynamik und anderen Disziplinen der Komplexitätsforschung in die Sozialwissenschaft.³⁶⁷

Neben diesen „Übernahme-Vorschlägen“ haben unsere Recherchen ergeben, dass man in den Sozialwissenschaften den Komplexitätsbegriff offenbar selten explizit behandelt.³⁶⁸ Dies hängt sicher damit zusammen, dass weitgehend Einigkeit darüber besteht, die Phänomene der Sozialwissenschaften seien

³⁶³ Cornacchio (1977a).

³⁶⁴ Formuliert etwa in Luhmann (1990). Wir stützen uns auf diese Publikation.

³⁶⁵ Nusser (1978) hält Luhmanns Idee der Komplexitätsreduktion für inhaltsleer, wobei uns seine Argumentation alles andere als klar erscheint. Wir gehen deshalb nicht weiter auf diesen Einwand ein.

³⁶⁶ Gottinger (1983), S. 2/3.

³⁶⁷ Reed et al. (1992).

³⁶⁸ Dupuy (1991) stellt dazu fest: „Utilité non négligeable, car si ces modèles de la complexité et de l'autonomie existent bien dans la pensée du social, comme je vais m'efforcer de le montrer, ils ne constituent pas le paradigme dominant.“, S. 397.

eben „komplex“. Implizit wird also jede Forschungsanstrengung in diesem Bereich als Bewältigung von Komplexität angesehen, wobei das Komplexen durch die konkrete Problemstellung gegeben ist. Gerade deren Vielfalt macht es sicher sehr schwierig, überhaupt zu einer einigermaßen umfassenden quantitativen Komplexität zu kommen, so dass man meist dem intuitiven Gebrauch des Begriffs verhaftet bleibt.

Komplexität in der Ökonomie: Auf die Ökonomie lässt sich unbestrittenermaßen der Begriff der intuitiven Komplexität anwenden. Es gibt aber auch weitergehende Ansätze, die vor allem im Umfeld der Komplexitätsforschung entstanden sind.³⁶⁹ Diese argumentieren insbesondere dafür, dass die in der Theorie dynamischer Systeme entwickelten Konzepte (z.B. Sensitivität von Anfangsbedingungen bei nichtlinearen Differentialgleichungen) in der Ökonomie Anwendung finden sollten.³⁷⁰ Damit argumentiert man gegen sogenannte „Gleichgewichtsmodelle“³⁷¹, die gemäss der Argumentation der Komplexitätsforschung unberechtigterweise angewendet würden. Die Beschreibung der Ökonomie mittels solcher Modelle wird als unzureichend betrachtet, und die Idee, das ökonomische System strebe nach Gleichgewichtszuständen, ist abzulehnen, argumentiert etwa *William A. Brock*.³⁷²

W. Brian Arthur versucht eine Charakterisierung der spezifischen Komplexität, die sich in der Ökonomie stellt, und nennt fünf Phänomene: Erstens sind für bestimmte dynamische Aspekte (z.B. die Änderung des Preises eines Produkts bei schwankendem Angebot/Nachfrage) mehrere Gleichgewichte möglich, die nicht vorhersehbar sind. Zweitens ist Ineffizienz möglich, d.h. es muss sich nicht das objektiv beste Produkt am Markt durchsetzen. Drittens beobachtet man „Lock-in“-Phänomene, d.h. hat einmal eine Marktlösung Dominanz erreicht, haben andere grosse Mühe, sich auf dem Markt zu behaupten. Viertens kommt Symmetriebrechen vor, d.h. ein Markt, wo mehrere vergleichbare Produkte „im Gleichgewicht“ sind (d.h. etwa dieselben Marktanteile haben), kann zugunsten bestimmter Produkte „kippen“. Fünftens ist schliesslich die Marktdynamik pfadabhängig, d.h. vergangene Ereignisse erhöhen die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Zukunft des Marktes. Man kann dies auch so ausdrücken, dass die Marktdynamik nichtergodisch ist.³⁷³ Diese fünf Phänomene, so Arthur, haben ihre Parallelen in der nichtlinearen Physik. Weiter zeigt sich, so Arthur, dass sowohl in Physik, Chemie und Biologie, aber auch in der Ökonomie positive Rückkopplungen vorhanden sein können. Als Beispiel dienen ihm die konkurrenzierenden Videosysteme Betamax und VHS, wobei letzteres sich leichte Vorteile verschaffte, die in einem positiven Rückkopplungsprozess die Vorherrschaft dieses Systems sicherten. Dies, obwohl das unterlegene System technisch besser war.

Andere Autoren nennen weitere Charakteristika der Komplexität der Ökonomie: So sind sehr viele interagierende Elemente vorhanden, die nur selektiv miteinander in Beziehung treten.³⁷⁴ Weiter gibt es viele Ebenen der Organisation mit vielen Nischen, die durch technologischen Fortschritt geschaffen werden.³⁷⁵ *John H. Holland* bezeichnet schliesslich die Ökonomie als ein Paradebeispiel eines komplex-adaptiven Systems, ein wichtiger Begriff in der Komplexitätswissenschaft, wie sich noch zeigen wird.³⁷⁶

Es gibt aber auch Autoren, die trotz dieser Charakteristika der Komplexität in der Ökonomie, welche ihre Analogien in der Komplexitätsforschung finden, davor warnen, Methoden aus letzterem Bereich einfach in die Ökonomie zu übertragen.³⁷⁷ Betrachtet man die Phänomene im letzteren Bereich genauer,

³⁶⁹ Als exemplarisches Beispiel kann der „Global Economy Workshop“ des Santa-Fe-Institutes vom September 1987 genannt werden, vgl. Anderson et al. (1988).

³⁷⁰ Anderson et al. (1988).

³⁷¹ Einen Abriss dieser „recursive general equilibrium theory“ bietet Brock (1988), S. 78-80.

³⁷² Brock (1988), S. 82.

³⁷³ Arthur (1989), S. 717/718.

³⁷⁴ Holland (1988), S. 117/118; Luhmann (1990), Sabisch et al. (1987).

³⁷⁵ Holland (1988), S. 118.

³⁷⁶ Holland (1988), S. 118.

³⁷⁷ Arthur (1989) sagt etwa: „I believe it would be a mistake to try to map blindly physical models into the economy (...)“, S. 716.

treten Probleme auf. So kann schon der Nachweis, dass die Marktdynamik chaotisch geprägt ist, schwierig sein.³⁷⁸ Dies hat natürlich Einfluss auf die Frage, ob festgestelltes stochastisches Verhalten chaotischen Ursprungs ist und ob dann Modelle aus der Chaostheorie wirklich anwendbar sind. Wir können an dieser Stelle keinen vollständigen Überblick über die Diskussion geben, inwieweit Übertragungen aus dem naturwissenschaftlichen Bereich der Komplexitätsforschung in die Ökonomie gerechtfertigt sind. Unsere Recherchen ergeben lediglich, dass offenbar Zweifel vorhanden sind.

3. Ein Versuch zur Charakterisierung vom Komplexität

Aufgrund der bisherigen Erörterungen bieten wir im Folgenden eine Charakterisierung ontologischer Komplexität. Dabei geht es einerseits um die Frage, welcher Intuition die Etablierung eines Komplexitätsmasses folgt, andererseits um qualitative Aspekte von Komplexität. Letztere haben Bedeutung für die Explikation von Emergenzkomplexität.

Idee der Beschreibung: Die Komplexität eines Objektes hat etwas mit der Schwierigkeit von dessen Beschreibung zu tun. Diese Intuition findet sich fast durchgehend in den bisher besprochenen Konzepten von Komplexität. Sie lässt sich sowohl auf die Struktur wie auf das Verhalten eines komplexen Systems anwenden. Als Beispiele lassen sich der algorithmische Informationsgehalt (Informatik), Strukturkomplexität (Physik) oder die mannigfaltigen Versuche zur Explizierung biologischer Komplexität (Anzahl Zelltypen, Grösse des Genoms, usw.) anführen. Machen wir also deutlich, was es bedeutet, ein komplexes Objekt zu beschreiben:

Erstens ist man sich weitgehend einig, dass nicht vollkommen zufällige Objekte als komplex gelten sollen. Komplexe Objekte enthalten in irgendeiner Form Regelmässigkeiten, bzw. sind strukturiert oder organisiert. Dieses Element führt zur angesprochenen *Beobachterrelativität*. Die Strukturiertheit eines Systems ist abhängig vom Kontext, unter welchem dieses betrachtet wird. Der Kontext wiederum wird durch die Theorie bestimmt, in deren Rahmen das System untersucht wird. Also: *Die Theorie hat einen Einfluss auf die Strukturiertheit*.

Damit ist aber nicht das einzige relativierende Element bestimmt. Eine Beschreibung hängt auch von der verwendeten Sprache ab. Unserer Ansicht nach ist es wiederum die Theorie, welche die sprachliche Ausdrucksfähigkeit vorgibt, mit der man das fragliche Objekt beschreiben kann. Also: *Die Theorie bestimmt die Beschreibungssprache mit*.

Dazu kommt schliesslich ein drittes relativierendes Element: Der Umfang einer Beschreibung ist abhängig von der Gliederungstiefe. Diese ist natürlich einerseits durch die praktische Situation gegeben, unter welcher das fragliche Objekt wissenschaftlich begutachtet werden soll. Andererseits bestimmt wiederum die angewandte Theorie, welche Teile überhaupt als solche gelten und damit welche Art von Gliederung vorliegt. Also: *Die Theorie und die konkrete Fragestellung bestimmen die Gliederungstiefe*.

Halten wir fest: Das Konzept der quantitativen Komplexität, wie es derzeit innerhalb naturwissenschaftlicher Disziplinen (zum grössten Teil) verwendet wird, ist demnach in *dreifacher Hinsicht theorie-relativ*. Dieses unseres Erachtens notwendige relativistische Moment eines jeden Komplexitätsmasses hat wichtige Konsequenzen für das Projekt der Komplexitätsforschung, wie wir in Teil V darlegen werden.

Qualitative Elemente von Komplexität: Vor allem zwei qualitative Aspekte von Komplexität erscheinen uns interessant: *Hierarchie* und *Schwellenkomplexität*. Beide Fälle haben Konsequenzen für den Begriff Emergenzkomplexität.

³⁷⁸ Brock (1988) stellt dazu fest: „Despite the logical possibility of chaos in theoretical macroeconomic models, an empirical examination of post WW II U.A. aggregative macroeconomic time-series data has failed to find evidence of deterministic chaos.“, S. 89.

Im ersten Fall wird (zuerst von Herbert A. Simon, später auch von anderen Autoren) behauptet, komplexe Systeme seien hierarchisch organisiert. Dieser Aspekt ist einer evolutionären Erklärung zugänglich, wie wir gesehen haben, d.h. man kann verstehen, warum viele unbestritten komplexe Systeme (wie biologische Organismen) einen hierarchischen Aufbau haben. Weiter ist damit eine zentrale Behauptung bezüglich der Erkennbarkeit komplexer Systeme verbunden: Erst deren hierarchische Organisation macht solche Systeme überhaupt einer wissenschaftlichen Beschreibung (und damit Analyse) zugänglich. Dies bedeutet zudem, dass die Untersuchung der Teile des Systems Erkenntnisse über die Systemgesamtheit zulässt. Die hierarchische Struktur komplexer Systeme *verhindert also sicher nicht* die Anwendbarkeit reduktionistischer Methoden!

Gerade an diesem Punkt haken jene ein (z.B. C. West Churchman), die im Zusammenhang mit komplexen Systemen von einem notwendigen Scheitern reduktionistischer Methoden sprechen und deshalb Hierarchie gerade *nicht* als Eigenschaft komplexer Systeme zulassen wollen. Die Ermittlung qualitativer Elemente des Komplexitätsbegriffs hängt also davon ab, in welchem Verhältnis man Komplexität und Emergenz sehen will.

Dies wird auch beim zweiten genannten Charakteristikum, der Schwellenkomplexität, deutlich. Das Überschreiten eines solchen Schwellenwertes geht einher mit *qualitativen Änderungen* komplexer Systeme. Paradebeispiel ist natürlich ein lebendes, sich selbst reproduzierendes System. Erst ab einer bestimmten Komplexität (vorausgesetzt einmal, man hätte einen gültigen quantitativen Begriff von Komplexität) könne man dem System die Eigenschaft bzw. neue Qualität „lebend“ zuschreiben. Solche Eigenschaften wiederum sind sehr beliebte Beispiele „emergenter Phänomene“. Der Begriff „Schwellenkomplexität“ findet also Verwendung in Situationen, wo man auch von Emergenzkomplexität spricht.

Halten wir fest: Qualitative Charakterisierungen von Komplexität innerhalb der Wissenschaften gehen oft mit Emergenzbehauptungen einher, führen also zum Problem der Emergenzkomplexität. Deren genaue Charakterisierung hängt dann vom verwendeten Emergenzbegriff ab.

Teil IV

Ein kritischer Blick auf die Komplexitätsforschung

In Teil IV wird das Projekt der Komplexitätsforschung vorgestellt. Diese Darstellung umfasst mehrere Punkte. So muss deutlich gemacht werden, welcher Komplexitätsbegriff verwendet wird. Dabei zeigt sich die wichtige Rolle der Emergenzkomplexität. Weiter berührt dieses Problemfeld das Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft, das sich im Spannungsfeld von Reduktionismus und Emergenz bewegt. Die Darstellung der Komplexitätsforschung macht auch deutlich, welche wichtige Rolle der Computer hat. Dieser ist nicht nur das zentrale Werkzeug, sondern gleichsam die Metapher für eine „computerisierte Weltsicht“, welche die Komplexitätsforschung prägt. Wir werden auch einen kurzen Überblick über Forschungsgebiete der Komplexitätswissenschaft geben, die bisher nicht besprochen wurden. Schliesslich machen wir auch deutlich, dass vor allem die popularisierte Komplexitätsforschung weitgehende Ansprüche bezüglich einer neuen Weltsicht formuliert. Begründen lassen sich diese nur schwer, doch ihr propagandistischer Nutzen darf nicht unterschätzt werden.

1. Ziele der Komplexitätsforschung

1.1. Der Komplexitätsbegriff

Die Bemühungen, einen einheitlichen Komplexitätsbegriff – d.h. in erster Linie ein universell anwendbares Mass für Komplexität – zu erreichen, sind bisher gescheitert, wie schon die Ausführungen in Teil II, Abschnitt 1.6 offengelegt haben. Dies wird auch von den Komplexitätsforschern selbst festgestellt.³⁷⁹

Präzisierungen des Komplexitätsbegriffs: Generell stammen die meisten Komplexitätsmassen, welche in der Komplexitätsforschung eine Rolle spielen, aus dem Bereich der Computerwissenschaften, wobei vor allem der *algorithmische Informationsgehalt* zu nennen ist.³⁸⁰ *Heinz Pagels* sieht in diesem Bereich sogar die „natürliche Heimat des Komplexitätsbegriffs“.³⁸¹

Weiter sind auch die Ansätze von *Charles H. Bennett* (logische Tiefe) und von *Seth Lloyd* (thermodynamische Tiefe) zu nennen, beides Wissenschaftler, die im Umfeld der Komplexitätsforschung anzusiedeln sind. Die Ausführungen zu diesen Komplexitätsmassen finden sich in Teil III.

Eine wichtige Redensart ist – wie schon erwähnt – jene von „Komplexität zwischen Ordnung und Chaos“ bzw. von „Komplexität am Rande des Chaos“. Komplexität bezeichnet dabei eine ganz bestimmte Art von Ordnung, gewissermassen eine „organisierte Ordnung“. Wir werden im folgenden Abschnitt 3.2 über zelluläre Automaten auf diesen „Rand des Chaos“ eingehen.

Murray Gell-Mann führte ausserdem den Begriff der „effektiven Komplexität“ ein.³⁸² Die effektive Komplexität eines Systems S_1 bezüglich eines anderen Systems S_2 , das S_1 beobachtet, ist gegeben durch die Länge des Schemas, das S_2 anwendet, um die Regelmässigkeiten von S_1 zu erfassen. Diese Definition ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden, wie Gell-Mann selbst feststellt. So hängt dieses Mass stark von der Effizienz des Beobachters ab. Weiter gilt es, die Gliederungstiefe zu berücksichtigen, nach welcher sich die Beschreibung richtet. Schliesslich erscheint es gar nicht klar ersichtlich, wie man im kon-

³⁷⁹ Als Beispiele dienen: Çambel (1993): „As yet, there is no agreed-upon explicit definition of complexity, although there are various operational definitions“, S. xi; Cohen et al. (1994): „One of the things that today’s science lacks is an effective theory of complexity.“, S. 218. Maddox (1990); Gell-Mann (1994), S. 65.

³⁸⁰ Stein (1989a), S. xv.

³⁸¹ Pagels (1988): „The notion of complexity has its natural home in the world of computation.“, S. 68.

³⁸² Gell-Mann (1994), S. 101.

kreten Fall zu diesem Schema kommen soll. Gell-Manns effektive Komplexität verdeutlicht eher das Problem der Beobachterrelativität bei der Definition eines Komplexitätsmasses, als dass sein Begriff eine praktikable Lösung anbietet.

Emergenzkomplexität: Unabhängig von den verschiedenen Vorschlägen zur Präzisierung des Komplexitätsbegriffs ist man sich in einem Punkt einig: Komplexität muss den emergenten Charakter eines Systems zum Ausdruck bringen (siehe dazu Teil II, Abschnitt 1.6).³⁸³ Komplexe Systeme zeigen im Unterschied zu komplizierten Systemen emergente Eigenschaften, was erstere einer reduktionistischen Erklärung nicht zugänglich macht.³⁸⁴ Man kann komplexe Systeme nicht dadurch verstehen, indem man lediglich dessen Teile untersucht.³⁸⁵ Komplexität hat einen irreduziblen Charakter.³⁸⁶

1.2. Das Forschungsprogramm

Die Komplexitätsforschung sieht sich mit folgendem Grundproblem konfrontiert: Wie entsteht unsere komplexe Welt aufgrund der einfachen, ihr zugrundeliegenden Gesetze? Nur durch eine Mehrfachanwendung dieser einfachen Gesetze?³⁸⁷ Oder gibt es neue universelle Prinzipien, welche die Entstehung von Komplexität klarmachen? Die Komplexitätsforscher sind überzeugt, dass letzteres der Fall ist.³⁸⁸ Es muss also klar gemacht werden, was der Begriff „Prinzip“ in diesem Zusammenhang bedeuten soll, welchen genauen Status diese Prinzipien im Zusammengang mit der Reduktionismus-Emergenz-Debatte haben und ob schon Kandidaten für solch neue Prinzipien vorhanden sind.

Oberflächenkomplexität-Tiefeneinfachheit: Obwohl mit der Anwesenheit solch neuer Prinzipien zu rechnen ist, soll die Erklärung komplexer Phänomene letztlich einfach sein. Damit ist offenbar gemeint, dass die Anzahl solcher Prinzipien nicht zu gross werden darf und diese einen möglichst universalen Status haben sollen. *Murray Gell-Mann* drückt diese Überzeugung in die Formel „Oberflächenkomplexität wird durch Tiefeneinfachheit“ erzeugt.³⁸⁹ *Philip W. Anderson* spricht von „Complexity out of simplicity“.³⁹⁰

³⁸³ Hier kann auch auf die Arbeit von Van Emden (1971) hingewiesen werden, obwohl er sicher nicht den heutigen Komplexitätswissenschaftlern zuzuordnen ist. Er will gewissermassen das „Emergente“ als Komplexitätsmass einführen: „Complexity is the way in which a whole is different from the composition of its parts.“, S. 7. Dies bedeutet im wesentlichen, dass er die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten untersuchen will: „(...) for every partition of the whole, its complexity should equal the sum of the interactions between the parts plus the sum of the complexities of the parts considered by themselves.“, S. 7. Für die quantitative Umsetzung dieser Idee konsultiere das entsprechende Paper.

³⁸⁴ Davies (1989) sagt dazu: „[Reductionism] regards complex systems as indifferent conjunction of many components, a peaceful coexistence of superposition of elementary units. This image of complexity as „mere complication“ is a legacy of the age of linear physics, which began in earnest with Newton and endured until well into this century.“, S. 101. Siehe auch Prigogine et al. (1982), S. 7.; Van Gigh (1987b), S. 23.

³⁸⁵ Jen (1991). Scuricini (1988) sagt dazu: „A system is complex when it is built up of a plurality of interacting elements of a variety of kinds, in such a way that in the holistic result no evidence can be traced of the characteristics of the single elements.“, S. 94.

³⁸⁶ Keeley et al. (1993): „(...) a system is complex if it is not *reducible*. (...) complex systems are those that exhibit some property, or properties, that *emerge* from the actions of its components.“, S. 616; Peliti (1987) hält beispielsweise einfache Bakterien (im Sinn einfacher lebender Systeme) für irreduzibel in dem Sinn, dass man sich kein einfacheres System vorstellen kann, das dieselben Aktivitäten durchführen kann; Stein (1989a): „This property [nonreducibility] helps to distinguish a truly complex system from a merely complicated one.“, S. xiii/xiv;

³⁸⁷ Kadanoff (1991), S. 9.

³⁸⁸ Davies (1989) meint dazu: „Indeed, many researchers speculate that there are definite principles of complexity that enjoy a universal, or at least a quasi-universal, status.“, S. 101. Entsprechend äussert sich auch Lewin (1993), S. 36. Wolfram (1988) schreibt: „One hopes that it will be possible to formulate universal laws that describe such complexity.“, S. 183.

³⁸⁹ Gell-Mann in Pines (1988), S. 3; vgl. auch Gell-Mann (1994).

³⁹⁰ Anderson (1991), S. 9. Philip Andersons Engagement für die Komplexitätsforschung lässt sich übrigens mit einem von ihm tief empfundenen Misstrauen gegenüber reduktionistischen Tendenzen in der Physik in Verbindung bringen. Gegen diese hat er schon 1972 in dem bekannt gewordenen Aufsatz „More Is Different“ (Anderson, 1972) argumentiert, allerdings in einer sehr unglücklichen Weise. Er hatte damals seinen „Gegnern“ sowohl die Geltung des ontologischen Reduktionismus wie der Mikro-determination zugestanden, hingegen aber einen „konstruktivistischen“ Reduktionismus bestritten. Dies deshalb, weil auf jeder

Das Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft lässt sich also so umschreiben, dass universale Prinzipien oder Konzepte gefunden werden sollen, welche die Entstehung von komplexen Systemen deutlich machen.³⁹¹ Die Postulierung solcher neuer Prinzipien ist übrigens zentral, wenn man überhaupt von einer eigenständigen Komplexitätswissenschaft sprechen will. Für sich betrachtet ist die Formel „Oberflächenkomplexität durch Tiefeneinfachheit erklären“ trivial. Jedes wissenschaftliche Erklärungsmuster unterliegt dieser Formel.

Leider wird kaum darauf eingegangen, was unter dem Begriff „Prinzip“ zu verstehen ist. Lediglich der Bezug auf die Universalität weist darauf hin, dass es sich um Konzepte von hoher Allgemeingültigkeit handeln muss. Ob diese den Status von eigentlichen Naturgesetzen haben, wird nicht klar. Vom Blickwinkel der Reduktionismus-Emergenz-Debatte aus könnte man diesen Prinzipien als Kandidaten für nomologische Emergenz betrachten. Wir werden auf diesen Punkt im folgenden Abschnitt 2.1 genauer eingehen.

Ein weiterer Aspekt erscheint uns bezüglich der geforderten Universalität solcher Prinzipien notwendig: Da sie auf verschiedene komplexe Systeme angewendet werden sollen, müssen diese auch einheitlich beschrieben werden können. Dies ist offenbar auch der Grund dafür, dass ein möglichst universales Komplexitätsmass gesucht wird. Ist ein solches gegeben, hätte man auch eine einheitliche Charakterisierung komplexer Systeme.

Eine Reihe von Kandidaten solcher Prinzipien wurden vorgeschlagen. Anderson nennt in einer ersten Aufzählung unter anderem Symmetriebrechung, seltsame Attraktoren und Fraktale.³⁹² Ein weiteres, gern genanntes Beispiel ist *Per Baks* selbstorganisierte Kritizität, die wir im folgenden Einschub genauer vorstellen:

Selbstorganisierte Kritizität:³⁹³ Mit der selbstorganisierten Kritizität hat *Per Bak* ein holistisches Konzept für dynamische Systeme vorgeschlagen, das als Kandidat eines „neuen Prinzips“ der Komplexitätsforschung gelten kann. Wir werden dieses Konzept anhand des paradigmatischen Beispiels von *Per Bak* einführen, des Sandhaufens.

Im Experiment wird ein Sandhaufen Korn für Korn aufgeschichtet, wobei die Körner alle dieselbe Größenordnung haben. Der Haufen entsteht auf einer kreisförmigen Unterlage, die mit einer Waage verbunden ist. Dabei zeigten sich folgende Phänomene: Erstens gibt es eine „natürliche Form“ für Sandhaufen, d.h. der Neigungswinkel eines solchen Haufens ist immer gleich. Diese natürliche Form,

Komplexitätsebene „entirely new properties“ (S. 393) auftreten. *Hoyningen-Huene* macht richtigerweise darauf aufmerksam (in der Veranstaltung „Ist das Ganze mehr als die Summe seiner Teile?“, Universität Bern, Sommersemester 1996), dass diese „Neuartigkeit“ sowohl psychologisch als auch logisch verstanden werden kann. Im ersten Fall ist man einfach vom Auftreten solcher (oft als emergent empfundener) Eigenschaften überrascht, kann diese aber danach durchaus unter Bezugnahme auf die Komponenten des Systems und die Regeln von derer Zusammensetzung erklären. Nur eine logische Neuartigkeit (d.h. die zuvor erwähnte Ableitung gelingt nicht) ist wirklich interessant. Für die „logische Neuheit“ argumentiert Anderson aber an keiner Stelle, wie *Hoyningen-Huene* feststellt.

Interessant ist nun, dass Andersons Standpunkt jetzt offenbar „radikaler“ (im Sinn einer stärkeren Betonung von Emergenz) geworden ist. Gerade die neuen Prinzipien, die bei der Untersuchung komplexer Systeme auftauchen sollen, können als Kandidaten für nomologische Emergenz gelten, wie wir noch deutlich machen. Hingegen erweisen sich die konkreten Beispiele Andersons doch eher als dürftig (vgl. die folgende Fussnote 392).

³⁹¹ Dies entspricht den Vorstellungen der meisten Autoren, die im Bereich „Science of Complexity“ publizieren, neben den bisher erwähnten siehe auch Pagels (1988), Chapter 2 und S. 329: „The new sciences of complexity show us how complex consequences can arise from simple elements and rules.“ Pippenger (1978) meint: „(...) the most important lesson of complexity theory is the demonstration of the diversity of phenomena that can arise through the interaction of simple components.“, S. 100. *Jack Cohen* und *Ian Stewart* (Cohen et al. 1994) sehen aber auch in der Frage „wie entsteht Einfachheit?“ ein Grundproblem, das die Komplexitätsforschung angehen soll: „(...) asking where complexity comes from is really the wrong question. A more important question is, Why is there any simplicity?“ (S. 3). Dazu führen sie zwei neue Konzepte ein: simplicity (the tendency of simple rules to emerge from underlying disorder and complexity, in systems whose large-scale structure is independent of the fine details of their substructure) und complicity (the tendency of interacting systems, to coevolve in a manner that changes both, leading to a growth of complexity from simple beginnings – complexity that is unpredictable in detail, but whose general course is comprehensible and foreseeable“ (S. 3.). Wir verfolgen die Ansätze der beiden Autoren nicht weiter. Richtigerweise bemerken sie aber, dass die Suche nach „Tiefeneinfachheit“ für komplexe Phänomene ein reduktionistisches Programm ist (S. 219-222).

³⁹² Anderson (1991), S. 11.

³⁹³ Folgende Ausführungen beruhen auf Bak et al. (1988) und Bak et al. (1991).

gleichsam der „Attraktor“ des Sandhaufens, heisst selbstorganisiert-kritisch. Die Charakterisierung „kritisch“ erhält der Sandhaufen aus einem zweiten experimentellen Befund.³⁹⁴ Sobald der Haufen seine natürliche Form erreicht hat (und mit seiner Grundfläche die Unterlage ganz bedeckt), kann jedes neue Sandkorn eine Lawine von einer beliebigen Grösse auslösen (was im Experiment mit der Waage gemessen wird). Kleine Lawinen sind häufiger, grössere seltener. Hat eine grosse Lawine den Neigungswinkel verkleinert, d.h. das System ist in einem sehr stabilen Zustand, passiert in der Regel nichts, bis der kritische Zustand wieder erreicht ist. Tritt hingegen der (seltene) Fall eines überkritischen Neigungswinkels auf, kommt es rasch zur grossen „Katastrophe“ bzw. Lawine, welche den Sandhaufen wieder in den kritischen Zustand bringt. Deshalb die Rede von *selbstorganisierter* Kritizität. Ein selbstorganisiert-kritisches System ist demnach ständig von Änderungen bedroht, der Zustand an sich ist aber stabil; eine Formulierung, die einen Hinweis auf den „Rand des Chaos“ geradezu aufdrängt. Entsprechende formale Zusammenhänge sind offenbar aber noch nicht gefunden worden.³⁹⁵

Benutzt man Computersimulationen von Sandhaufen unter der Annahme, dass die Körner nur in einer lokalen Wechselwirkung stehen können, zeigt sich ein weiteres, wichtiges Phänomen: Die Lawinenhäufigkeit H verläuft nach einem Potenzgesetz, d.h. ist von der Form $H = G^{-k}$, wobei G ein Mass der Grösse der Lawine ist und k eine Konstante. Solche Potenzgesetze finden sich in der Natur recht häufig. Bak sieht darin einen Hinweis auf die universelle Bedeutung der selbstorganisierten Kritizität. Insbesondere sieht er in dieser eine Erklärung für das in der Natur (und auch der in Ökonomie, z.B. Fluktuationen des Dow-Jones-Index) häufig anzutreffende, sogenannte $1/f$ -Rauschen oder Flackerrauschen.³⁹⁶ Demnach entsteht $1/f$ -Rauschen durch die Überlagerung von Signalen unterschiedlichster Grössenordnung und Zeitdauer. Dies geschieht immer dann, wenn sich das System im selbstorganisiert-kritischen Zustand befindet. Bak ist der Ansicht, dass mit der selbstorganisierten Kritizität ein Konzept zur Verfügung steht, mit welchem sich sehr viele verschiedene Phänomene verstehen lassen.

Bedauerlicherweise haben Untersuchungen der letzten Jahre ergeben, dass selbst Sandhaufen zumindest das verlangte Potenzgesetz nicht reproduzieren:³⁹⁷ Es treten mehr mittelgrosse Lawinen auf als prognostiziert. Ein möglicher Grund könnte darin liegen, dass Sandkörner rollen können und es deshalb manchmal vorziehen, den ganzen Sandhaufen herunterzurollen. Die geforderte lokale Wechselwirkung kommt dann nicht zustande. Experimente mit Reis, die diesen Effekt verhindern, zeigen hingegen die geforderte Lawinenhäufigkeit.³⁹⁸

Schon eine genauere Untersuchung der selbstorganisierten Kritizität macht deutlich, dass gar nicht klar ist, inwieweit von einem „universalen Prinzip“ gesprochen werden kann. Auch die Beispiele Andersons lassen Fragen offen. Die Aufzählung vermischt verschiedene Dinge und erscheint unausgereift. Der Komplexitätsforschung fehlen unseres Erachtens zur Zeit überzeugende Kandidaten für „universale Prinzipien komplexer Systeme“.

Die Formel „Oberflächenkomplexität mittels Tiefeneinfachheit erklären“ findet Plausibilität in zwei Klassen von Phänomenen: So zeigt zum ersten das deterministische Chaos auf, dass einfache Differentialgleichungen eine komplexe Dynamik erzeugen können. Als zweites paradigmatisches Beispiel gilt der zelluläre Automat, wobei komplexen Mustern sehr einfache Regeln zugrunde liegen.

Es erstaunt sicher kaum, dass in dieser Formulierung des Forschungsprogramms eine Reihe von Problemen verborgen sind, die zum Teil mit dem verwendeten Begriff von Komplexität verbunden sind. Wir wollen sie hier nur kurz anschneiden und werden wieder auf diese zurückkommen. So lässt sich gerade die starke Betonung der Emergenzkomplexität in Kontrast zum Forschungsprogramm nur schwer verstehen. Man kann durchaus zur Ansicht gelangen, ein System sei deshalb komplex, weil ihm *keine* „Tiefeneinfachheit“ zugrunde liegt.³⁹⁹ Es gilt also zu verstehen, welcher Begriff von Emergenz in der Komplexitätsforschung überhaupt verwendet wird. Weiter ist unklar, in welchem Sinn von „Tiefeneinfachheit“

³⁹⁴ Vergleiche dazu auch Held et al. (1990).

³⁹⁵ Vergleiche Lewin (1993), S. 83/84.

³⁹⁶ Flackerrauschen bedeutet, dass das Power-Spektrum $S(f)$, d.h. das Spektrum der Leistung pro Frequenzintervall, proportional zu $1/f$ ist.

³⁹⁷ Vergleiche dazu Springer (1996).

³⁹⁸ Frette et al. (1996).

³⁹⁹ Klir (1985) meint dazu: „The fundamental difficulty with systems of organized complexity is that no general simplifying assumptions apply to them, i.e. they do not possess any hidden simplicity under what is apparently complex.“, S. 139.

gesprochen werden soll. Diese Redeweise deutet auf ein reduktionistisches Programm hin, das aber vermieden werden soll. Schliesslich stellt sich auch die Frage, welchen Status Organisationsprinzipien innerhalb der Erklärung haben sollen. Der Einbezug solcher ist unerlässlich, will man den erwähnten „synthetischen Ansatz“ verwenden.⁴⁰⁰

Untersuchungsgegenstand der Komplexitätsforschung: Als empirisches Bezugsfeld der Komplexitätsforschung wird meist der Mesokosmos angegeben. Der Gegenstand der wissenschaftlichen Erkenntnis wird gewissermassen dreigeteilt: das ganz Kleine, das ganz Grosse und das Komplexe sollen untersucht werden (vergleiche Teil II, Abschnitt 2.1 und Fussnote 156). Die Erstellung einer umfassenden Theorie für den dritten Bereich wird als Aufgabe der Komplexitätsforschung genannt. Dem Bereich des „Komplexen“ werden dabei eine Reihe unterschiedlichster Phänomene zugeordnet. Naturwissenschaftliche, ökonomische und soziale Problemstellungen sollen untersucht werden, ja selbst alte philosophische Fragen wie das Hirn-Geist-Problem sollen einer Lösung zugeführt werden.⁴⁰¹ Die Komplexitätsforschung soll ausserdem die Schranke zwischen Natur- und Geisteswissenschaften aufweichen.⁴⁰² Gerade dieser Punkt gibt einen Hinweis auf einen einheitswissenschaftlichen Charakter der Komplexitätsforschung. Bezüglich des empirischen Bezugsfelds kann man deshalb auch von einem interdisziplinären *Anspruch* der Komplexitätsforschung sprechen, wie der folgende Abschnitt deutlich machen soll.

Das komplex-adaptive System: Ein Grundkonzept innerhalb der Komplexitätsforschung ist das sogenannte „komplex-adaptive System“. *Murray Gell-Mann* beschreibt dieses als ein System, bei welchem der Informationsfluss so genutzt wird, dass sich das System in der Evolution (im allgemeinsten Sinn verstanden) durchsetzen kann.⁴⁰³ Als Beispiele solcher komplex-adaptiven Systeme nennt Gell-Mann ein Kind, das seine Muttersprache erlernt, einen Bakterienstamm, der eine Antibiotikaresistenz entwickelt, die Scientific Community, welche eine neue Theorie überprüft, oder gar einen Künstler, der einen schöpferischen Einfall hat.⁴⁰⁴ Diese Ausführungen erscheinen aber sehr unpräzise, und es ist nicht plausibel, inwieweit diese unter ein Grundkonzept „komplex-adaptives System“ fallen sollen. Dieser Begriff hat den Anschein der Beliebigkeit. Mit der Bezeichnung „adaptiv“ wird immerhin zum Ausdruck gebracht, dass dem Evolutionsgedanken in der Komplexitätsforschung ein wichtiger Stellenwert zukommt.⁴⁰⁵

1.3. Der interdisziplinäre Anspruch

Wie wir schon mehrfach erwähnt haben, sieht sich die Komplexitätsforschung als ein höchst interdisziplinäres Unterfangen. Schon Warren Weavers Charakterisierung der „organized complexity“ (Teil II, Abschnitt 2.1) macht deutlich, welche Vielzahl von Phänomenen in dieses neue Forschungsfeld fallen soll. Auch die Publikationen des Santa-Fe-Institutes zeigen dieses angestrebte breite Spektrum (vgl. Teil II, Abschnitt 1.6). So finden sich neben naturwissenschaftlichen Fragen etwa folgende Problemstellungen: Inwiefern lässt sich die globale Weltwirtschaft als komplexes System auffassen bzw. wie lassen sich Extremereignisse wie Wirtschaftskrisen mittels einem „Komplexes-System-Ansatz“ (was immer das ist) verstehen? Wie lässt sich ein politischer Wandel (z.B. Revolutionen oder der Untergang von Hochkulturen) erklären? Oder noch allgemeiner: Was ist Leben und wie entsteht es? Wie entsteht Geist? Wahrlich alles, was das Herz begehrt.⁴⁰⁶

⁴⁰⁰ Bechtel et al. (1993): „(...) a synthetic strategy requires some prior hypothesis about the organization and operation of the system.“, S. 20.

⁴⁰¹ Exemplarisch für diese Ansprüche ist Mainzer (1994).

⁴⁰² Cheetham (1993) meint dazu: „The „sciences of complexity“ (...) suggests deep connections between the „sciences“ and „humanities“.“, S. 301.

⁴⁰³ Gell-Mann (1994), Kap. 3., oder auch Anderson (1992), S. 9.

⁴⁰⁴ Gell-Mann (1994), S. 44.

⁴⁰⁵ Vergleiche dazu die Vorstellungen von Feistel et al. (1989) zur Etablierung einer „Physik der Evolution“.

⁴⁰⁶ Noch mehr Beispiele finden sich in Lewin (1993), Mainzer (1994) und Waldrop (1992).

Dieser interdisziplinäre Charakter enthält ein Element der Vereinnahmung. Ziel ist es nämlich, diese Phänomene mittels Konzepten zu erklären, die ihre Wurzeln in den Natur- und Computerwissenschaften haben.⁴⁰⁷ Von den Fragestellungen, Methoden und paradigmatischen Experimenten her gesehen ist die Komplexitätsforschung in diesen Gebieten verwurzelt. Um dieses reduktionistisch anmutende Unterfangen gleichsam zu tarnen, wird immer wieder auf die Bedeutung des Emergenzkonzeptes hingewiesen. Die Komplexitätsforschung sucht nach einer neuen Einheit zwischen Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften unter Verwendung primär naturwissenschaftlicher Konzepte, wie auch der folgende Abschnitt deutlich machen wird.⁴⁰⁸

An dieser Stelle geben wir eine kurze Zusammenfassung all jener Disziplinen, die in den Bereich der Komplexitätsforschung fallen: Im mathematischen Bereich sind die Theorie dynamischer Systeme mit ihren Spezialgebieten Katastrophen- und Chaostheorie sowie die fraktale Geometrie zu nennen. Im Bereich Computerwissenschaften vor allem die Theorie des algorithmischen Informationsgehaltes, die Theorie der Berechnungskomplexität und Anwendungen der Theorie zellulärer Automaten, die wir in Abschnitt 3.3 in diesem Teil noch kurz vorstellen werden. Genannt werden in diesem Zusammenhang aber auch neuronale Netzwerke und künstliche Intelligenz.⁴⁰⁹ In den Naturwissenschaften spielen vor allem die verschiedenen Selbstorganisationstheorien (Synergetik, Nichtgleichgewichts-Thermodynamik, Autopoiese, Theorie der Hyperzyklen) eine zentrale Rolle. Daneben natürlich auch Systeme, an denen sich bestimmte Merkmale von Komplexität zeigen lassen (z.B. chaotische Systeme oder Spingläser). Zentrale Konzepte stammen zudem aus der Evolutionsbiologie (Stichwort: komplex-adaptives System) und der Systemtheorie. Damit ist das Feld der Komplexitätsforschung weitgehend abgesteckt.

1.4. Komplexitätsforschung als neue Einheitswissenschaft?

Die Untersuchung des Forschungsprogramms der Komplexitätswissenschaft lässt den Schluss zu, dass eine allgemeine Theorie komplexer Systeme formuliert werden soll. Man kann dieses Projekt also als Versuch sehen, eine neue Einheitswissenschaft zu etablieren.⁴¹⁰ Dies geschieht aber von einer antireduktionistischen Grundhaltung aus, unter Einbezug von Emergenz. Jedes einheitswissenschaftliche Projekt ist aber ein reduktionistisches Unterfangen. Wir werden im Folgenden versuchen zu explizieren, ob und wie man diese beiden Aspekte verbinden kann.

Die Idee der Einheit der Wissenschaft findet sich schon in der Antike. Wissenschaft wird dabei als Versuch verstanden, die Phänomene der Welt auf wenige, einfache Prinzipien zurückzuführen. Je differenzierter das Arsenal an Methoden wurde und je breiter die untersuchte Palette an Phänomenen, desto schwieriger erschien die Realisation einer Einheitswissenschaft. Die Idee einer Einheit der Wissenschaften wird bis ins 19. Jahrhundert hinein von einer Mehrheit der Philosophen und Wissenschaftler vertreten und gipfelt in *Georg Wilhelm Friedrich Hegels* philosophischem System. Später wurden trennende Aspekte immer mehr betont, wobei vor allem die Unterteilung in Naturwissenschaft einerseits, Sozial- und

⁴⁰⁷ Anderson (1992) sagt etwa: „We see common behaviours in systems as diverse as biological populations, economics, organisms and the immune system, as well as adaptive computer programs (...)“, S. 9. Pagels (1988) schreibt: „(...) the interdisciplinary nature of these new sciences [the sciences of complexity] will in some cases cut across the traditional distinction between the natural and the social sciences.“, und insbesondere: „(...) the radical distinction between mind and nature will disappear with the development of the new sciences of complexity.“, S. 15.

⁴⁰⁸ Hier kann man auf einen weiteren solchen „Übernahmeversuch“ hinweisen: die Soziobiologie. Diese versucht grundsätzlich, soziale Phänomene auf Evolutionsbiologie zurückzuführen, ein höchst kontrovers diskutiertes Unterfangen. Vergleiche dazu Hemminger (1994). Auch Dyke (1988) sieht seinen Ansatz, die Evolution komplexer Systeme zu verstehen, im Kontext der Soziobiologie; S. 4.

⁴⁰⁹ Anderson (1991), S. 9, Mainzer (1994), Kap. 5.

⁴¹⁰ Pagels (1988) meint in diesem Zusammenhang: „We may thus see the unity of science in a new way.“, S. 51. Übrigens haben schon diverse Selbstorganisationstheorien ähnliche Ansprüche vertreten. Vergleiche etwa Roth et al. (1990), S. 46 und Schwegler (1992). Auch Mussmann (1995) verweist im Zusammenhang mit der Selbstorganisationsforschung auf vorhandene „einheitswissenschaftliche Tendenzen“; S. 320, Fussnote 15. Jantsch (1979) hat wohl als erster versucht, mit dem Selbstorganisations-„Paradigma“ eine umfassende Weltansicht zu etablieren. Der Versuch war publizistisch sicher erfolgreich, ist inhaltlich aber problematisch.

Geisteswissenschaft andererseits vertreten wurde. Gerade die von der Komplexitätsforschung angestrebte Aufweichung dieser Trennungslinie ist ein Indiz für deren einheitswissenschaftlichen Ansprüche.

Der jüngste Vereinheitlichungs-Versuch entstand im Umfeld des Wiener Kreises. Um den Wissenschaftsphilosophen *Moritz Schlick* versammelten sich Ende der 20er Jahre dieses Jahrhunderts in Wien eine Reihe von bekannten Wissenschaftlern mit sowohl wissenschaftlichen wie auch philosophischen Interessen. Zwei Projekte standen dabei im Vordergrund: Erstens die Trennung zwischen Wissenschaft und Nichtwissenschaft mittels einem sogenannten Sinnkriterium. Zweitens der Aufbau einer Einheitswissenschaft mit der Physik als Basis. Erkenntnisse innerhalb der Einheitswissenschaft dürfen nur mittels Beobachtung und Logik gewonnen werden, Metaphysik bleibt ausgeschlossen. Exemplarisch für dieses Unterfangen ist *Rudolf Carnaps* 1928 erschienene Schrift: „Der logische Aufbau der Welt“.⁴¹¹ Eine Reihe gewichtiger Einwände, die wir an dieser Stelle nicht weiter ausführen wollen, führten schliesslich zum Scheitern dieses Projektes.

Bevor die Frage nach der Möglichkeit einer Einheitswissenschaft beantwortet werden kann, muss klar sein, was damit gemeint ist. Es existieren eine ganze Reihe möglicher Interpretationen, wie wir im Folgenden darlegen:

Einheitswissenschaft:⁴¹² Der Ausdruck „Einheit der Wissenschaft“ hat mehrere Bedeutungen. Zum ersten kann damit eine *methodologische Einheit* gemeint sein. Die Wissenschaft soll also eine einheitliche Methode verwenden. Bezüglich der Klassifikation der Reduktionsbegriffe bedeutet dies die Geltung des methodologischen Reduktionismus. Diese methodologische Einheit wurde vor allem von *Paul Feyerabend* energisch angegriffen.⁴¹³ Gerade unter Einbezug des zu verwendenden Reduktionismusbegriff ist die methodologische Einheit sicher mit Problemen behaftet. Der starke methodologische Reduktionismus wird kaum vertreten, und demnach ist auch die starke methodologische Einheit der Wissenschaft (nur Methoden der fundamentalen Ebene sollen Geltungskraft haben) wohl eher eine Illusion. Man hat hingegen sicher einen vagen Begriff, welche Methoden als „wissenschaftlich“ gelten. Unseres Erachtens kann man eine methodologische Einheit aber nur auf einer recht allgemeinen Ebene behaupten, indem etwa Regeln gelten wie: „Prüfe alle Daten!“, oder: „Sei bereit, deine Theorie aufzugeben, wenn sie nicht mit den Daten übereinstimmt!“.

Weiter kann Wissenschaft eine *strukturelle Einheit* besitzen, wobei mehrere Fälle zu unterscheiden sind: Den ersten kann man als *logische Einheit* bezeichnen. Damit ist gemeint, dass sich die Theorien über die Welt schichtweise zusammenfassen lassen. Gleichsam „zuoberst“ finden sich die allgemeinsten Sätze, „zuunterst“ die direkten empirischen Beobachtungen. Das System ist deduktiv geordnet, d.h. zu erwartende empirische Beobachtungen lassen sich aus den allgemeinen Theorien ableiten.

Den zweiten Fall kann man *Teil/Ganzes-Einheit* nennen. Diese geht aus von der (gut begründeten) Annahme der Existenz eines einheitlichen grundlegenden Substrats, aus welchem die Gegenstände der Natur letztlich bestehen (d.h. den Elementarteilchen). Je nach der Komplexität der Anordnung dieser Teile beschäftigen sich unterschiedliche Disziplinen mit den Phänomenen. Die Schichtung der Disziplinen entspricht dabei der Schichtung der Welt nach Komplexitätsstufen. Dabei ist die Erklärungskraft der Theorien der weniger komplexeren Stufe im Prinzip höher als jene der komplexeren. Konkret bedeutet dies, dass beispielsweise alle biologische Phänomene im Prinzip durch die Physik erklärt werden können. Praktikabel ist dies natürlich in den meisten Fällen nicht.

Unter dem Blickwinkel der verschiedenen Reduktionismusbegriffe (vgl. Teil I, Abschnitt 3.2) sind die beiden letzten Fälle praktisch gleich. Dies erstaunt nicht, denn jedes einheitswissenschaftliche Programm ist reduktionistisch. Die logische Einheit der Wissenschaft vertritt auf den ersten Blick zwar lediglich einen epistemischen Reduktionismus, d.h. fordert die Existenz einer Fundamentaltheorie. Diese erscheint aber ohne Voraussetzung eines ontologischen Reduktionismus nicht formulierbar. Die Teil/Ganzes-Einheit geht hingegen sowohl von der Geltung des ontologischen Reduktionismus wie auch des epistemischen Reduktionismus aus. Der Unterschied ist dadurch gegeben, dass im zweiten Fall die Fundamentaltheorie eine physikalische sein muss (sog. Physikalismus), während dies im ersten Fall nicht gefordert ist.

⁴¹¹ Carnap (1974). Carnaps Buch ist aber entstanden, bevor er sich dem Wiener Kreis anschloss.

⁴¹² Der Einschub richtete sich im wesentlichen an Lambert et al. (1991), S. 253/254., Hedrich (1990), S. 26-32.

⁴¹³ Feyerabend (1983).

Welche Konzeption von Einheitswissenschaft verfolgt nun die Komplexitätsforschung? Die Beantwortung dieser Frage hängt entscheidend davon ab, welcher Begriff von Emergenz verwendet werden soll. Ein harter Emergentist würde keine Form von Einheitswissenschaft akzeptieren, da auf jeder Ebene grundsätzlich neue Phänomene und Gesetze auftreten, die sich in kein einheitliches Theoriegebäude einordnen liessen. Mit dem Hinweis auf „neue Prinzipien“, welche die Komplexitätsforschung finden will, lässt sich schliessen, dass eine Teil/Ganzes-Einheit abgelehnt wird. Eine logische Einheit liesse sich aber weiter vertreten. Diese neuen Prinzipien wären dann Bestandteil der gesuchten Fundamentaltheorie.

2. Komplexitätsforschung und Emergenz

Unsere bisherigen Untersuchungen haben ergeben, dass Emergenz einen zentralen Aspekt der Komplexitätsforschung darstellt.⁴¹⁴ Es wird deutlich werden, dass die Komplexitätsforschung auch ein Forschungsprogramm über Emergenz beinhalten muss.

2.1. Der Emergenzbegriff

Emergenz ist ein zentraler Begriff für die Komplexitätsforschung. *Brian L. Keeley* und *E. Bonabeau* sehen sogar deren wichtigste wissenschaftsphilosophische Relevanz darin, die mit dem Emergenzbegriff in Zusammenhang stehenden Probleme zu klären.⁴¹⁵ Eine genauere Untersuchung lässt aber Zweifel offen, ob dieser Anspruch gerechtfertigt ist. Unklarheiten stellen sich in zwei Bereichen: Man ist sich erstens nicht im klaren, was das Emergente im Zusammenhang mit komplexen Systemen ist. Zweitens besteht der Verdacht, dass lediglich ein epistemischer Emergenzbegriff gebraucht wird. Dieser ist wissenschaftstheoretisch aber kaum von Interesse, wie wir deutlich gemacht haben (Teil I, Abschnitt 3.3). Auf die Probleme, die sich mit dem Forschungsprogramm stellen, gehen wir im nächsten Abschnitt ein.

Emergenz und Komplexität: Über den Zusammenhang von Emergenz und Komplexität existieren eine Reihe sehr verschiedener Ansichten. Einigkeit besteht – wie schon mehrfach betont – darüber, dass komplexe Systeme generell *emergente Eigenschaften* bezüglich Struktur oder Verhalten haben, ja dass das Auftreten solcher Eigenschaften ein definitorisches Merkmal komplexer Systeme ist.⁴¹⁶ Je komplexer ein System ist, deso mehr emergente Eigenschaften treten auf. Offenbar müsste also ein Mass für Komplexität mit einem „Mass für Emergenz“ (wie auch immer das aussehen mag) korrelieren. Weiter ist auch praktisch immer die Rede von emergenten Eigenschaften bei *Systemen*, die nicht auf die Teile des Systems reduziert werden können (d.h. *nicht* die *Teile* komplexer Systeme zeigen emergentes Verhalten).⁴¹⁷

Nomologische Emergenz findet sich vor allem bei den angesprochenen „neuen Prinzipien“, welche die Komplexitätsforschung suchen will. Zuweilen ist von neuen „Naturgesetzen“ die Rede, die auf höheren Komplexitätsstufen auftauchen sollen.⁴¹⁸

⁴¹⁴ Dies stellt auch Roger Lewin (1993) in seiner Recherche fest (S. 217).

⁴¹⁵ Keeley et al. (1993): „First, if by serving as a „case study“, this new field can shed light on the notions of emergence and reduction, then this alone will be of enormous help to philosophy, which has been struggling more or less successfully with these topics for centuries.“ Übrigens hat man schon früher in die Systemtheorie ähnliche Erwartungen gesteckt, vergleiche dazu Checkland (1976), S. 133.

⁴¹⁶ Anderson (1991); Baas (1994), S. 516. Bonner (1988) meint: „Although hierarchical levels of complexity may have new properties at different levels, those emergent properties are not mystical, but direct consequences of increasing complexity.“, S. 147. Checkland (1976), S. 131. Serra et al. (1986) halten Emergenz globaler Eigenschaften für eine fundamentale Eigenschaft komplexer Systeme, S. 11. Van Gigch (1987b), S. 23.

⁴¹⁷ Allen et al. (1982) sagen etwa: „(...) [emergent properties] are not reduced because they cannot be reduced.“ (S. 39).

⁴¹⁸ Kadanoff (1991), S. 9. Er setzt solche neuen Gesetze mit verschiedenen Ebenen der Beschreibung in Verbindung.

Schliesslich werden auch *Makrobedingungen* als emergent betrachtet. Die Komplexitätsforschung deckt also das gesamte Spektrum möglicher Kandidaten für Emergenz ab. Im Folgenden betrachten wir vor allem die als emergent betrachteten Eigenschaften etwas genauer:

Kandidaten für Emergenz: Von Emergenz wird beispielsweise im Zusammenhang mit *dynamischen Systemen* gesprochen. *Jack Cohen et al.* (1994) halten Attraktoren für ein emergentes Phänomen komplexer Systeme.⁴¹⁹ Dies deshalb, weil man insbesondere im Fall chaotischer Systeme den Gleichungen nicht ansieht, welcher Attraktor ihnen zuzuschreiben ist. Dazu muss das System explizit ausgerechnet werden. Die Rede von Emergenz ist hier aber sehr gewagt. Der Attraktor des Systems ist durch die Gleichung eindeutig bestimmt. Die Rede von Emergenz bei chaotischen Systemen wird wohl dadurch motiviert, dass mit den bekannten involvierten Prognoseschwierigkeiten ein Charakteristikum von Emergenz erfüllt zu sein scheint.⁴²⁰

Friedrich Cramer bringt chaotische Dynamik ebenfalls in einen Zusammenhang mit seiner fundamentalen Komplexität (vgl. Teil III, Abschnitt 1) und damit mit Emergenz.⁴²¹ Wir halten aber die Rede von Emergenz in diesem Zusammenhang für falsch, denn die Differentialgleichung determiniert das Phasenraumverhalten des Systems vollständig. Weiter ist unklar, wie man überhaupt das System in eine „untere“ und eine „obere“ Ebene auftrennen kann, eine Grundvoraussetzung für die Rede von Emergenz.

Weitere prominente Beispiele für Emergenz treten bei *zellulären Automaten* auf. *Henri Atlan* bringt das Beispiel einer Klasse von booleschen Automaten, welche in der Lage sind, temporäre Binärsequenzen zu klassifizieren.⁴²² Diese Eigenschaft der Erkennung und Klassifikation solcher Sequenzen nennt er ein emergentes Phänomen solcher zellulärer Automaten.

Stuart A. Kauffman untersucht boolesche Automaten mit zufallsverteilten Knoten. In deren Dynamik finden sich Ordnungsstrukturen (im Fall von zweidimensionalen Automaten können sie als Muster dargestellt werden), die Kauffman als emergentes Phänomen ansieht.⁴²³

Christopher Langton nennt schon Eigenschaften der Dynamik zellulärer Automaten emergent, die auf einer grösseren Skala als auf einer einzelnen Zelle erscheinen.⁴²⁴ Dies deshalb, weil die Musterbildung nicht explizit in der Übergangsfunktion des Automaten kodiert ist. Entsprechend hält Langton zelluläre Automaten für ein sehr wichtiges Instrument zum Studium von emergentem Verhalten: „Synthesis in abstract computer models should be seen as the general study of *emergent behaviour* (...).“⁴²⁵ Entscheidend für das Zustandekommen solcher emergenter Phänomene sind nichtlineare Elemente in der Übergangsfunktion.⁴²⁶

Stephanie Forrest untersucht unter dem Stichwort „emergent computation“ ebenfalls zelluläre Automaten mit nichtlinearen Kopplungen.⁴²⁷ Erneut ist Nichtlinearität das entscheidende Merkmal dafür, dass lokale Wechselwirkungen zu globalen Mustern, d.h. emergenten Phänomenen führen. Sie sieht drei Bedingungen für das Zustandekommen einer solchen „emergent computation“: „(i) a collection of agents, each following explicit instructions, (ii) Interaction among the agents (according to the instructions), which form implicit global patterns at the macroscopic level i.e. epiphenomena, (iii) A natural interpretation of the epiphenomena as computations.“⁴²⁸ Dabei stellt sich gemäss Forrest ein wichtiges Problem:

⁴¹⁹ Cohen et al. (1994), S. 207.

⁴²⁰ Vergleiche dazu Stephan et al. (1994): „Es ist [daher] durchaus fraglich, ob die faktische Unvorhersagbarkeit chaotischer Prozesse ein Umstand von besonderem theoretischem Interesse ist.“ S. 47.

⁴²¹ Cramer (1988), S. 281, und auch die Tabelle S. 282-284.

⁴²² Atlan et al. (1986). Vgl. auch Atlan (1987).

⁴²³ Kauffman (1984), S. 145. Dieses spontane Auskristallisieren von Ordnung nennt Kauffman (1991) auch Antichaos, S. 90.

⁴²⁴ Langton (1986), S. 126.

⁴²⁵ Langton (1986), S. 147.

⁴²⁶ Langton (1992) meint diesbezüglich: „(...) *linear systems* are those for which the behaviour of the whole is just the sum of its parts, while for *nonlinear systems*, the behaviour of the whole is more than the sum of its parts.“, S. 202.

⁴²⁷ Forrest (1990).

⁴²⁸ Forrest (1990), S. 2.

Inwiefern ist das beobachtete emergente Phänomen (d.h. das beobachtete Muster) lediglich eine Interpretation des Beobachters? Oder anders gefragt: Neigen wir nicht einfach dazu, erkannte Regelmässigkeiten als emergent zu betrachten, während unregelmässige „Muster“ aus dem Raster fallen und den Status „emergent“ nicht erhalten?

William Bechtel und *Robert C. Richardson* schliesslich halten es im Zusammenhang mit zellulären Automaten durchaus für richtig, von Emergenz zu sprechen: „In calling the system properties of network systems emergent, we mark a departure from the behaviour of simpler systems and indicate the traditional mechanistic strategies for understanding network systems may simply fail.“⁴²⁹ Der konkrete Status der Emergenz bleibt aber ungeklärt. Der Aspekt der Nichtlinearität weist erneut auf Prognoseschwierigkeiten hin. Ob diese ausreichen, damit die Rede von Emergenz nicht trivial wird, ist schwierig zu beurteilen. Bechtel et al. weisen zumindest darauf hin, dass psychologische Aspekte bei der Bestimmung eines Phänomens als emergent eine Rolle spielen.⁴³⁰

Weitere Aspekte komplexer Systeme, die gerne als „emergent“ bezeichnet werden, sind deren Makrobedingungen wie *Ordnung* oder *Organisation*⁴³¹ (vgl. auch Teil I, Abschnitte 2.4 und 2.5) In der Tat ist die Organisation von Teilen in bestimmten Systemen keine Eigenschaft, die lediglich aus der Kenntnis der Teile gewonnen werden kann.

Schliesslich wird auch das Phänomen der *Selbstorganisation*, das sich in komplexen Systemen finden soll, als emergent bezeichnet.⁴³² Ob diese allgemeine Aussage gültig ist, ist fraglich. Vielmehr muss man wohl das konkrete Phänomen untersuchen, um herauszufinden, inwieweit der Akt der Selbstorganisation nicht doch durch das Verhalten der Teile allein erklärt werden kann.

Epistemische Emergenz: In Metabetrachtungen zum Emergenzbegriff der Komplexitätsforschung kommt man meistens zum Schluss, dass lediglich eine epistemische Emergenz verwendet wird. *Achim Stephan* und *Ansgar Beckermann* halten etwa fest: „Als emergent [in der Synergetik, Selbstorganisation und Chaosforschung] gelten diejenigen Phänomene, die durch eine besondere selbstorganisierende Prozessdynamik erklärt werden können, deren Auftreten jedoch nicht durch die Eigenschaften oder Reaktionen der beteiligten Elemente allein erklärt werden kann (...) Ein so verstandener Emergenzbegriff ist jedoch mit der Reduzierbarkeit der Systemeigenschaften kompatibel. In der Selbstorganisationsforschung scheint dem Emergenzbegriff ausser der klassifizierenden Rolle eines Sammelbegriffs keine weitere systematische Funktion zuzukommen.“⁴³³

Auch *Manfred Stöckler* zielt in Richtung eines epistemischen Emergenzbegriffs. Er macht den Vorschlag, dass diejenigen Eigenschaften komplexer Systeme emergent zu nennen sind, die nicht allein mit Hilfe jener Teiltheorien und Strategien erklärt werden können, die ausreichen, um das Verhalten der isolierten Komponenten zu erklären. Von Emergenz soll aber nur dann gesprochen werden, wenn das Erklärungsarsenal wesentlich gegenüber dem Minimalinhalt erweitert werden muss, der ausreicht, um die Komponenten zu erklären.“⁴³⁴

Es ist im weiteren nicht ganz klar, inwieweit die Existenz eines Beobachters für das Auftauchen von Emergenz eine Rolle spielt, wie *T.F.W. Allen* und *Thomas B. Starr* meinen: „It is the intrusion of the

⁴²⁹ Bechtel et al. (1993), S. 229.

⁴³⁰ Bechtel et al. (1992): „When the mode of organization is non-linear, we are more likely to be surprised by the consequences of the organization, and hence to see the resulting behaviour as emergent.“, S. 266

⁴³¹ Siehe zum Beispiel Bechtel et al. (1992), S. 278/279. Baas (1994) versucht mit dem Konzept einer sogenannten „Hyperstruktur“ ein Schema für die Organisation komplexer Systeme anzugeben, innerhalb welchem sich das Konzept der Emergenz verständlich einbauen lässt. Unserer Ansicht nach formalisiert er aber den Begriff der Emergenz auf eine sehr unklare Weise. Auch die Beispiele erscheinen nicht plausibel. Wir verzichten deshalb auf eine genaue Präsentation von Baas' Emergenzkonzept.

⁴³² Z.B. in Küppers (1992), S. 7/8.

⁴³³ Stephan et al. (1994), S. 50.

⁴³⁴ Stöckler (1990), S. 19; Stephan et al. (1994), S. 50. In Stöckler (1991) argumentiert er dafür, dass die modernen Selbstorganisationstheorien mit einem ontologischen Reduktionismus („[an] ontological reductionists hold that all phenomena of life are processes covered by the laws of physics“, S. 235) kompatibel sind: „we have seen that the *methods* of physics of simple systems cannot be extended to complex processes of self-organization. Nevertheless the new theories do not give rise to new objections against *ontological* reductionism.“, S. 252.

observer, through his understanding of system symbolism, which gives rise to irreducibility of emergent properties (...).⁴³⁵ Ist (quantitative) Komplexität ein notwendigerweise beobachterrelatives Konzept und tritt andererseits im beobachteten komplexen System Emergenz auf, so stellt sich die Frage, ob es sich wirklich nur um epistemische Emergenz handelt. Um dieses Problem zu behandeln, muss genau expliziert werden, inwieweit diese Beobachterrelativität in den Prozess der Theoriebildung über das komplexe System hineinspielt. Eventuell erreicht man durch diese Kopplung von notwendiger Beobachterrelativität und Emergenz einen Emergenzbegriff, der den epistemischen übersteigt.

2.2. Ein reduktionistisches Forschungsprogramm emergenter Phänomene?

Gegen den Reduktionismus: Geradezu notorisch wird innerhalb der Komplexitätsforschung darauf hingewiesen, dass sich komplexe Systeme nicht reduktionistisch verstehen lassen.⁴³⁶ Damit ist primär gemeint, dass die Untersuchung von Teilen komplexer Systeme nicht ausreicht, um das ganze System zu erklären. Doch ist man damit schon ein ausgereifter Antireduktionist? Das Problem stellt sich insbesondere mit dem von uns ermittelten Forschungsprogramm. *Brian L. Keeley et al.* stellen richtigerweise fest: „(...) it should be made clear that complexity (as studied by the science of complexity) is reductionistic in the sense that what scientists try to do is describe highly complicated phenomena in terms of simple(r) mathematical equations.“⁴³⁷ Wir versuchen demnach herauszufinden, mit welchem Reduktionsbegriff das Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft vereinbar ist.

Reduktionsbegriffe: Die Geltung des ontologischen Reduktionismus ist auch für die Komplexitätsforschung unproblematisch. Schon die Anwendung des Emergenzbegriffs geht von einem materialistischen Monismus aus. In den Publikationen der Komplexitätswissenschaftler spricht auch niemand von irgendwelchen „komplexierenden Substanzen“, welche Systeme komplex machen.

Klar scheint auf den ersten Blick, dass sowohl der epistemische als auch der explanatorische Reduktionismus abgelehnt werden. Es wird explizit gesagt, dass die Kenntnis der Teile nicht ausreicht, um das ganze System zu verstehen. Dies scheint uns gleichbedeutend mit der Aussage, dass das Gesamtwissen über die Teile nicht ausreicht, um das Gesamtwissen über das System zu erlangen. Weiter ist explizit die Rede von „irreduziblen Elementen“ komplexer Systeme. Die Existenz solcher scheint nicht vereinbar damit zu sein, dass man Phänomene der oberen Stufe (des komplexen Systems) mit Mechanismen der unteren Stufe erklären kann. Vorausgesetzt, diese Analyse ist zutreffend, müssen wir schon hier auf ein Problem hinweisen: Es ist nicht klar, ob das Bejahen des ontologischen und das gleichzeitige Verneinen des epistemischen und des explanatorischen Reduktionismus überhaupt eine konsistente Position ist. Wir können auf diesen Punkt leider nicht genauer eingehen. Wir werden aber im Folgenden feststellen, dass sonst schon gravierende Probleme auftauchen.

Unabhängig davon scheint sich aber der Status der „neuen Prinzipien“, welche die Komplexitätsforscher suchen, zu klären. Es handelt sich eindeutig um Kandidaten für nomologische Emergenz. Diese neuen Prinzipien würden sowohl epistemische Reduktion verhindern, da sie zum Wissen der höheren Stufe gehören würden, als auch explanatorische, da sie zur Erklärung der Phänomene höherer Stufe benötigt werden.

Probleme: Zwei Probleme sind jetzt aber noch offen: Erstens stellt sich die Frage, inwieweit das Forschungsprogramm mit obigen Ausführungen zum „Antireduktionismus“ der Komplexitätsforschung kompatibel ist. Zweitens ist unklar, was von den festgestellten, einheitswissenschaftlichen Tendenzen zu halten ist.

⁴³⁵ Allen et al. (1982), S. 45.

⁴³⁶ Als Beispiele siehe etwa Anderson (1991), Casti (1994), S. 273.

⁴³⁷ Keeley et al. (1993), S. 617.

Beide Probleme hängen zusammen, doch fangen wir mit dem ersten an: Das Programm fordert die Suche nach „Tiefeneinfachheit“. Ist diese gefunden, was ist dann von der Emergenz an der komplexen Oberfläche zu halten, um in der Metapher zu bleiben? Dieses Forschungsprogramm scheint also lediglich mit der epistemischen Emergenz kompatibel zu sein, d.h. die (vermeintliche) Emergenz von Phänomenen komplexer Systeme liegt einfach daran, dass bisher die Theorie nicht vorhanden ist, welche die Phänomene erklärt. In diesem Bild wären die neuen Prinzipien komplexer Systeme Bestandteil der unteren Stufe und deren nomologische Emergenz nur scheinbar. In diesem Fall wären auch keine Probleme mit den einheitswissenschaftlichen Tendenzen vorhanden. Man würde lediglich für eine andere Fundamentaltheorie plädieren unter Einbezug der neuen Prinzipien komplexer Systeme. Die antireduktionistischen Ansprüche muss man dann aber aufgeben. Ein Programm zur Ermittlung von Tiefeneinfachheit unter Einbezug nomologischer Emergenz erscheint uns nicht konsistent.

Einen Ausweg aus dem Dilemma bietet sich natürlich an. Man kann sowohl die Suche nach neuen Prinzipien komplexer Systeme als auch die Idee einer neuen Einheitswissenschaft komplexer Systeme aufgeben. Anzeichen, dass dieser Weg beschritten wird, gibt es jedenfalls.⁴³⁸ Was dann die Rede von „Komplexitätsforschung“ noch soll, bleibt dahingestellt.

Die Komplexitätsforschung kann sich den angesprochenen Problemen aber auch stellen. Dann muss sie (unter anderem) deutlich machen, in welchem Sinn sie von Emergenz sprechen will. Mit anderen Worten: Die Komplexitätswissenschaft braucht auch ein Forschungsprogramm für Emergenz.

3. Der Computer als Modell und Werkzeug der Komplexitätswissenschaft

Ohne Computer gäbe es keine Komplexitätsforschung. Diese unbestrittene Aussage hat aber grössere Konsequenzen, als allgemein angenommen wird. So ist dieses Instrument nicht nur eine technologische Bedingung der Komplexitätsforschung, sondern es besitzt eine gleichsam weltbildschaffende Funktion. Dies zeigt sich nicht zuletzt daran, dass die meisten der vorgestellten Komplexitätsmasse ihre Heimat in den Computerwissenschaften haben. Auch die Mehrzahl der Forschungsgebiete, die im Zusammenhang mit der Komplexitätswissenschaft entstanden sind, haben in einem gewissen Sinn den Computer zum Gegenstand. Im weiteren stellen wir zelluläre Automaten vor. Diese dienen als paradigmatisches Modell für die Erforschung komplexer Systeme, da sie die Vorstellung „Oberflächenkomplexität durch Tiefeneinfachheit“ realisieren: Mittels einfacher Regeln lassen sich komplexe, unvorhersehbare Muster erzeugen.

3.1. Computer und der universelle Berechenbarkeitsbegriff

Warren Weavers Prognose bezüglich der entscheidenden Bedeutung des Computers für die Untersuchung der „organisierten Komplexität“ hat sich bewahrheitet. Darüber besteht innerhalb der Komplexitätsforschung Konsens.⁴³⁹ Der Computer dient dabei nicht nur als Instrument der Simulation. Zuweilen schafft er eine eigene Welt, die selbst Gegenstand von Untersuchungen sein kann, z.B. bei *Christopher G. Langtons* „künstlichem Leben“. Ein wichtiges Problem haben wir dabei schon aufgeworfen: die Frage nach der Geltung der physikalischen Church-Turing-These (Teil III, Abschnitt 2.2). Damit verbunden ist

⁴³⁸ Küppers (1992) meint dazu „(...) the prospects of the discovery of such laws [fundamental laws of complexity] is dwindling from day to day.“, S. 248. Horgan (1995) hat Zweifel innerhalb der Komplexitätsforschung an einheitswissenschaftlichen Tendenzen in seinem Artikel zusammengestellt, S. 75/76.

⁴³⁹ Vergleiche dazu beispielsweise Jen (1990), S. xiv; Klir (1985), S. 139; Pagels (1988): „The primary research instrument of the sciences of complexity is the computer.“, S. 13; Hedrich (1994), S. 157. Mussmann (1995): „Die Computerentwicklung ist eine technologische Determinante der Selbstorganisationsforschung ebenso wie der wissenschaftlichen Bewältigung komplexer dynamischer Systeme als ganzer!“, S. 241. Paslack (1991), S. 88.

die Frage, ob die auf dem Computer simulierte Komplexität mit der Komplexität des realen physikalischen Systems vergleichbar ist. Wir haben Gründe aufgeführt, die diesbezüglich zumindest Zweifel offenlassen. So erstaunt nicht, dass auch innerhalb der Komplexitätsforschung bisher keine Lösung für das Problem angeboten wird. Oder in den Worten von *Walter Fontana*: „The Question is if such an abstract level of description still can capture principles of complex physical systems. How much – in the case of complex systems – can we abstract from the „hardware“ until a theory loses any explanatory power? I think the fair answer at present is: we don't know.“⁴⁴⁰

Das Problem der Analogie: Die wichtige Rolle des Computers in der Komplexitätsforschung erklärt sich in erster Linie dadurch, dass er die Möglichkeit bietet, komplexe Systeme zu modellieren. Es stellt sich dabei die Frage, welchen explanatorischen Wert gefundene Analogien zwischen solchen Modellen und natürlichen Phänomenen haben. So kann man bekannterweise auf dem Computer (z.B. mit zellulären Automaten) komplexe Phänomene wie Muster mittels sehr einfacher Regeln erzeugen. Allein daraus lässt sich aber nicht der Schluss ziehen, dass komplexe Phänomene in der Natur ebenfalls ihren Ursprung in einfachen Gesetzen haben.⁴⁴¹

Der Bezug auf das Computermodell kann hingegen einen Hinweis darauf liefern, wie die schon mehrfach angesprochenen „neuen Prinzipien“ für komplexe Systeme gefunden werden können. Der Computer bietet die Möglichkeit eines „synthetischen Ansatzes“ (vgl. Abschnitt 1.6 in Teil II), d.h. man modelliert Systeme auf dem Computer und vergleicht das Modell mit dem realen System. Könnten Konzepte, die man bei der Modellbildung braucht, die gesuchten „universalen Prinzipien“ sein?

Das Problem der Analogie lässt sich jetzt verdeutlichen: Erstens, wo finden sich im Computermodell die angesprochenen „neuen Prinzipien“? Zweitens, wie erklärt man, dass dieselben Prinzipien auch in der Natur gelten? Die erste Frage lässt sich nur durch Analyse eines konkreten Modellbildungsprozesses untersuchen, welche wir hier leider nicht leisten können.

Für die zweite Frage hingegen gilt es einen grundsätzlichen Einwand zu beachten. Dieser wurde von *Naomi Oreskes et al.* formuliert.⁴⁴² Numerische Simulationen natürlicher Prozesse können nicht verifiziert bzw. bestätigt werden. Dies hat eine Reihe von Gründen, die mit dem Charakter von Modellen zusammenhängen. Natürliche Systeme sind nie geschlossen, was für deren Modellierung eine Reihe von Vereinfachungen, Parametrisierungen usw. bedingt. Dies führt dazu, dass „complete confirmation is logically precluded by the fallacy of affirming the consequent and by incomplete access to natural phenomena.“⁴⁴³ Modelle haben primär einen heuristischen Wert. Die Aussage, dass die im Modell durch Einfachheit erzeugte Komplexität ihren Gegenpart im modellierten, natürlichen System findet, ist nicht nachprüfbar. Dies bedeutet auch, dass unsicher ist, inwieweit im Modell ermittelte „fundamentale Prinzipien“ auch in der Natur wirken.

Natur als Computer?: Innerhalb der Naturwissenschaften lassen sich zwei Hauptströmungen bezüglich einer grundsätzlichen Sichtweise der Natur unterscheiden, wie *John D. Barrow* ausführt.⁴⁴⁴ So gibt es einmal eine „strukturelle“ Sicht des Universums mit den Naturgesetzen als Fundament und Symmetrie als zentralem Prinzip. Auf der anderen Seite findet sich die Idee des „kosmischen Computers“, die mit einem abstrakten Berechenbarkeitsbegriff einhergeht. Die Grundfrage ist: Ist das Universum Struktur oder Programm? Im ersten Fall sind es die Gesetze der Physik, welche die Möglichkeiten der abstrakten Berechnung einschränken. Im zweiten Fall bestimmen die Regeln, welche den Rechenprozess steuern, welche Naturgesetze möglich sind.

Die Wahl zwischen beiden Alternativen ist sicher keine einfache. Gegen die Sichtweise des „Kosmos als Computer“ lässt sich einwenden, dass jede Epoche die jeweils modernste Maschine als Modell des Universums verwendete: Zur Zeit Newtons wurde das Universum als Uhrwerk verstanden. Während der

⁴⁴⁰ Fontana (1991), S. 425.

⁴⁴¹ Vergleiche dazu Horgan (1995), S. 77.

⁴⁴² Oreskes et al. (1994).

⁴⁴³ Oreskes et al. (1994), S. 641.

⁴⁴⁴ Barrow (1992), S. 259-263.

industriellen Revolution galt das Bild der Dampfmaschine, und naturphilosophische Fragen stellten sich im Bezug auf die Thermodynamik (insbesondere zur Rolle des Zweiten Hauptsatzes). Heute, so das Argument, verwenden wir die Computermetapher, weil diese Maschinen unser Zeitalter prägen.

So einfach ist die Sachlage aber nicht. Die Antwort hängt entscheidend vom verwendeten Berechenbarkeitsbegriff ab. Der heute akzeptierte geht von der universalen Turingmaschine aus (vgl. Teil III, Abschnitt 2.2). Aufgrund dieses Begriffs gibt es offenbar keine physikalischen Grenzen, welche die Berechnung einschränken.⁴⁴⁵ Trotzdem gibt es entscheidende Schwierigkeiten. Es gibt – unter Anwendung des heutigen Berechenbarkeitsbegriffs – eine Reihe nichtberechenbarer Probleme in der Physik. Wir müssten aber fordern, dass im Universum nur berechenbare Dinge ablaufen können. Demzufolge müsste der heute gültige Berechenbarkeitsbegriff ausgeweitet werden. Solche Vorschläge existieren in der Tat, man verweist etwa auf die Möglichkeit von Quanten-Computern, die Turingmaschinen weit überlegen wären.⁴⁴⁶

Unabhängig von diesem Problem ist klar, welcher der beiden oben angesprochenen Sichtweisen sich die Komplexitätsforschung anschliesst: Das Universum wird als Computer bzw. als zellulärer Automat betrachtet.⁴⁴⁷ Ausgehend von diesem Weltbild ist auch die Hoffnung gegeben, quantitative Komplexität dereinst als globales Mass einführen zu können. Dazu müsste der gigantische Computer „Kosmos“ soweit bekannt sein, dass der Algorithmus für jeden Naturprozess bzw. für die Entstehung jeder Struktur bekannt wäre. Der Algorithmus wäre dann Gegenstand dieses Komplexitätsmasses.

Damit wird deutlich, warum der Computer für die Komplexitätsforschung mehr ist als nur ein entscheidendes Instrument. Er ist gewissermassen die Metapher für die Hoffnung, dass der (überspitzt formulierte) Anspruch der Komplexitätsforschung, sämtliche komplexen Phänomene dereinst mit demselben Set von Prinzipien erklären zu können, sich erfüllen kann.

3.2. Zelluläre Automaten

Zelluläre Automaten gelten als überaus wichtiges Hilfsmittel zur Untersuchung und Simulation komplexer Systeme, was innerhalb der Komplexitätsforschung immer wieder betont wird.⁴⁴⁸ Der Grund wurde schon mehrfach erwähnt: Zelluläre Automaten zeigen auf der Basis eines einfachen Substrats ein zum Teil höchst komplexes Makroverhalten.

Definition des zellulären Automaten: Ein zellulärer Automat lässt sich folgendermassen charakterisieren:⁴⁴⁹ Es existiert eine räumlich diskrete Struktur (Zellen, im zweidimensionalen Fall kann man sich ein „Häuschenpapier“ vorstellen⁴⁵⁰). Diese Zellen können verschiedene Zustände annehmen, aber nur endlich viele. In diskreten Zeitabschnitten ändern diese Zustände gemäss definierten Übergangsregeln. Definitorisches Element ist dabei lediglich die Diskretheit der Zellenanordnung und der Zeitschritte sowie die Endlichkeit der Anzahl Zustände.

Zur genauen Charakterisierung sind vier Eigenschaften anzugeben: Die Geometrie der Zellenstruktur, die Festlegung einer bestimmten Nachbarschaft einer Zelle, die Anzahl Zustände pro Zelle und schliesslich die Regeln, um den künftigen Zustand einer Zelle festzulegen. Als einfachstes Beispiel diskutieren wir einen eindimensionalen, booleschen (binären) zellulären Automaten mit einer sehr einfachen Nachbarschaft und einem einfachen Set an Übergangsregeln:

⁴⁴⁵ Vergleiche dazu Bennett et al. (1987) und Hayes (1987).

⁴⁴⁶ Vergleiche dazu Lloyd (1995).

⁴⁴⁷ Pagels (1988): „But in fact nature can be viewed as an analogue computer.“, S. 43. Eriksson et al. (1987) sehen die Bildung einer komplexen Struktur als einen nichtdeterministischen Berechnungsprozess einer „thermodynamischen Turingmaschine“, S. 6. Hayes (1984) sieht zelluläre Automaten als Modell für die Welt, S. 10.

⁴⁴⁸ Als Beispiele siehe Hedrich (1990), Abschnitt 7.3; Pagels (1988), Chapter 5; Vichniac (1987), Abschnitt 1.2 und Wolfram (1984b).

⁴⁴⁹ Die folgende Zusammenstellung orientiert sich vor allem an Hayes (1987), Hedrich (1990), und Wolfram (1984a).

⁴⁵⁰ Schon mit Papier und Bleistift kann man die Arbeitsweise eines zellulären Automaten verdeutlichen. Vergleiche dazu Maruyama (1962).

Eindimensionaler, boolescher zellulärer Automat: Gegeben sei die geometrische Struktur als eine lineare Anordnung von (evtl. unendlich vielen) Zellen. Es sind nur zwei Zustände erlaubt (0,1, deshalb die Rede von einem booleschen Automaten). Mittels eines Zufallgenerators werde der Anfangszustand t_0 definiert, z.B:

...	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	...
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----

Als Nachbarschaft einer Zelle werden die jeweils unmittelbar anliegenden Zellen definiert. Als Übergangsregeln definieren wir: Findet sich in der Nachbarschaft einer Zelle eine solche mit Zustand 1, so ist die Zelle nach dem Zeitpunkt t_{i+1} im Zustand 0. Sind beide Nachbarzellen im Zustand 0 oder beide im Zustand 1, so ist die Zelle nach t_{i+1} im Zustand 1. Mit diesen einfachen Eigenschaften ist unser zellulärer Automat vollständig bestimmt. Für t_1 ergibt sich jetzt:

...	?	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	?	...
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----

Damit sollte das Prinzip des zellulären Automaten klar sein. Die Situation wird natürlich sofort viel schwieriger, wenn man mehrdimensionale Automaten betrachtet, die Anzahl Zustände erhöht, die Nachbarschaft weiträumiger fasst oder die Regeln verfeinert (indem man etwa probabilistische Elemente einbaut oder die Regeln räumlich inhomogen gestaltet). So gibt es für eindimensionale, deterministische zelluläre Automaten mit drei verschiedenen Zuständen und einer Nachbarschaft von fünf Zellen (die Zentralzelle plus je zwei links und rechts) schon mehr Veränderungsregeln, als es Atome im sichtbaren Bereich des Universums gibt!

Stephen Wolfram zeigte für verschiedene eindimensionale zelluläre Automaten auf, dass diese (unabhängig vom gewählten Anfangszustand) in vier qualitativ verschiedene Klassen fallen:

- Automaten der **Klasse 1** produzieren unabhängig vom gewählten Anfangszustand nach endlich vielen Schritten stabile, räumlich homogene Endzustände. Die Systeme zerstören jede Information über ihre Vergangenheit. Sie sind reduzibel in dem Sinn, dass sich deren Dynamik durch einen kürzeren Algorithmus voraussagen lässt als jene, die durch die Dynamik repräsentiert werden. Innerhalb der Theorie dynamischer Systeme lässt sich der Endzustand als Fixpunkt verstehen.
- Automaten der **Klasse 2** bilden einfache, räumlich stabile Strukturen, die sich in kurzen Zeitintervallen periodisch ändern. Sie sind im gleichen Sinn reduzibel wie Automaten der Klasse 1. Deren Endzustände entsprechen in der Theorie dynamischer Systeme Grenzyklen.
- Automaten der **Klasse 3** produzieren chaotische, fraktalähnliche Muster. Diese sind sensitiv von den Anfangsbedingungen abhängig. Sie sind (in den meisten Fällen) irreduzibel. Analoga in der Theorie dynamischer Systeme sind chaotische Attraktoren.
- Automaten der **Klasse 4** schliesslich zeigen ein äusserst vielgestaltiges Zusammenspiel von stabilen, periodischen und aperiodischen Strukturen. Voraussagen über deren Dynamik sind unmöglich. Das Verhalten eines solchen Systems findet keine Analogie in der Theorie dynamischer Systeme. Man vermutet überdies, dass Automaten der Klasse 4 universelle Computer sind, d.h. dass sie das Verhalten einer universellen Turingmaschine modellieren können.

Einer der bekanntesten zellulären Automaten ist das „Game of Life“, das 1970 von *John Horton Conway* erfunden wurde. Es handelt sich um einen deterministischen, zweidimensionalen, binären zellulären Automaten, der als universeller Computer gebraucht werden kann. Man kann also mit dem „Game of Life“ unter geeigneten Anfangsbedingungen die Funktion eines jeden Computers simulieren. Das „Game

of Life“ war eine wichtige Inspiration für die aufkommende Komplexitätsforschung und motivierte etwa *Christopher G. Langtons* Ansätze in Richtung künstliches Leben.⁴⁵¹

Der Rand des Chaos: Wie wir schon festgestellt haben, taucht die Redeweise vom „Rand des Chaos“ bei Untersuchungen mit zellulären Automaten auf. Dieser Rand des Chaos soll gleichsam einen „Phasenübergang“ symbolisieren, wenn sich ein zellulärer Automat von einem geordneten zu einem chaotischen Zustand hin „bewegt“. Es ist uns nicht klar, inwieweit man dieses Phänomen mit Wolframs Klassifikation in Verbindung bringen kann. *Norman Packard* hält den Rand des Chaos für den Ort maximaler Informationsverarbeitung.⁴⁵² Ist damit gemeint, dass es sich um einen Automaten der Klasse 4, d.h. um einen universellen Computer handelt?

Stuart A. Kauffman untersucht den Rand des Chaos mit zufallserzeugten (d.h. der Anfangszustand des Netzwerkes ist zufällig gewählt), booleschen NK-Netzwerken.⁴⁵³ Die Elemente solcher Netzwerke kennen nur zwei Zustände. N steht für die Anzahl Elemente, K für die Anzahl Verbindungen eines Elements zu anderen. Im Fall $N = K$ beispielsweise ist jedes Element mit jedem verknüpft, deshalb auch die Rede von Netzwerken. Sie lassen sich auch als zelluläre Automaten mit einer maximalen Nachbarschaft („alle sind Nachbarn“) verstehen. Die Visualisierung eines Netzwerkes kann man sich als zweidimensionale „Häuschenfläche“ vorstellen. Jedes Quadrat steht für ein Element des Netzwerks. Zwei Farben symbolisieren die zwei möglichen Zustände eines solchen Quadrats. Im Falle des geordneten Zustands zerfällt die Fläche in unterschiedliche Gebiete einheitlicher Farbe mit gleichsam „eingefrorenen“ Zuständen. Im chaotischen Zustand ergeben sich über die ganze Fläche kontinuierliche Farbwechsel. Der Rand des Chaos lässt sich als „Aufschmelzen“ verstehen. Kauffman diskutiert eine Reihe solcher NK-Modelle unter Variation von K. Wir können dies hier nicht weiter vorstellen.

Der Prozess der „Anpassung“, den Kauffman in diesem Kontext untersucht, erscheint uns aber unklar. Eine gründliche Diskussion dieses „Randes des Chaos“ liegt leider ausserhalb unseres Verständnisses. Jedenfalls glaubt Kauffman, dass sich hinter dieser Metapher ein universales Prinzip verbirgt: Lebende Systeme befinden sich an diesem Rand des Chaos. Die Übertragung der Konzepte (z.B. Anpassung oder Auslese), die sich innerhalb seiner Theorie der NK-Netzwerke verhältnismässig einfach definieren lassen, auf die Biologie ist aber mit Sicherheit mit Schwierigkeiten verbunden.

Die Welt als zellulärer Automat?: Zum Schluss wollen wir noch kurz darauf eingehen, was von der Metapher „das Universum ist ein zellulärer Automat“ zu halten ist. Motivierend für diesen Gedanken ist die Tatsache, dass die Quantentheorie (QT) das Element des Diskreten in die Natur zurückgebracht hat: Die Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie legt eine Körnigkeit der Raumzeit nahe: Man geht heute davon aus, dass Raumzellen mit Planck-Länge (10^{-35} m) keine interne Struktur besitzen, sondern nur eine finite Anzahl diskreter Zustände annehmen können, wie *Reiner Hedrich* ausführt. Ebenso kann man davon ausgehen, dass innerhalb von kürzeren Zeitintervallen als die Planck-Zeit (10^{-44} sec) keine Prozesse ablaufen können, die sich noch weiter strukturieren lassen.⁴⁵⁴

Im weiteren gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, zelluläre Automaten exakt zu definieren.⁴⁵⁵ Es ist also nicht ausgeschlossen, dass dereinst das Modell eines „zellulären Quantenautomaten“ kreierte wird, der die Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantenmechanik reproduziert. Schwierigkeiten macht aber der nichtlokale Charakter der QT, d.h. der Automat müsste auch die nichtlokalen Korrelationen (Stichwort EPR-Korrelation) von Quantenereignissen reproduzieren können.

Der wesentliche Schwachpunkt ist gemäss Hedrich aber, dass zelluläre Automaten auf einem euklidischen Raum-Zeit-Konzept beruhen. Das Raumbgitter eines zellulären Automaten hätte den Status eines

⁴⁵¹ Vergleiche Waldrop (1992), S. 200-203. Hayes (1987) schreibt in diesem Zusammenhang: „The game of life no longer appears as a stately progression of abstract patterns; it is more like a view through the microscope of bacteria and protozoa swimming, spinning, breeding, eating and being eaten.“, S. 14.

⁴⁵² Packard in Lewin (1993), S. 75.

⁴⁵³ Vergleiche Kauffman (1993), Kap. 5.

⁴⁵⁴ Hedrich (1990), S. 197/198.

⁴⁵⁵ Vergleiche dazu Hedrich (1990), S. 196.

absoluten Newtonschen Raums. Die moderne Kosmologie verwirft aber ein derartiges Konzept. Uns erscheint aber nicht einleuchtend, dass das Modell des zellulären Automaten einen derart absoluten Raum voraussetzt. Das Universum als zellulären Automaten verstehen zu wollen, wäre auf einer abstrakten Ebene durchaus plausibel.

3.3. Forschung mit dem Computer – ergänzende Beispiele

Im Folgenden wollen wir einen kurzen Überblick über verschiedene Gebiete geben, die man der Komplexitätsforschung zuschreibt und die bisher nicht vorgestellt wurden. Diese haben alle einen sehr engen Bezug zum Computer. Umfassend können wir diese keinesfalls vorstellen, der Aufwand wäre mit dem Status der vorliegenden Arbeit nicht vereinbar. Für Details verweisen wir auf die Literatur.⁴⁵⁶

Künstliches Leben: *Christopher G. Langton* ist Mitglied des SFI und hat sich der Beantwortung der Frage „Was ist Leben?“ verschrieben.⁴⁵⁷ Er arbeitet mit zellulären Automaten, welche Eigenschaften lebender Systeme reproduzieren sollen. Grundidee ist eine Abstraktion der Lebenseigenschaften von der physischen Materie, d.h. die Schaffung einer „allgemeinsten Lebensform“, von künstlichem Leben.

Das Forschungsgebiet des künstlichen Lebens versteht sich als ein synthetischer Ansatz in der Biologie: Statt lebende Systeme auseinanderzunehmen, wird versucht, Leben zu „erzeugen“. Dabei ist die Eigenschaft „lebendig“ an die Organisation von Materie gebunden, oder in den Worten Langtons: „Life is a property of *form*, not *matter*, a result of the organization of matter rather than something that inheres in the matter itself.“⁴⁵⁸ Deshalb soll es möglich sein, lediglich diese Organisation zu untersuchen, wobei dies auf dem Computer geschehen könne.

In diesem synthetischen Ansatz wird jede Art von „möglichem Leben“ gesucht. Künstliches Leben schliesst auch den Versuch ein, den Prozess der Evolution auf einem Computer nachzuvollziehen und zu schauen, was herauskommt. Dies unabhängig davon, ob diese „Lebensformen“ Analoga in der natürlichen Welt haben. Das Ziel ist es letztlich, eine theoretische Biologie zu formulieren, die universelle Aussagen machen kann und damit vom Status her der modernen Physik gleichkommt. Da auch Leben als eine komplexe Erscheinung verstanden wird, die einfache Wurzeln haben soll, ist das künstliche Leben in das Programm der Komplexitätsforschung eingebunden.

Angesichts dieses Projektes stellen sich eine Reihe von Fragen: Erstens ist unklar, ob das auf dem Computer generierte „künstliche Leben“ als Lebensform oder als Simulation von Leben gewertet werden soll. Langton äussert sich dazu widersprüchlich. So spricht er von der „creation of life *in silico*“⁴⁵⁹, bzw. sagt: „We are *not* trying to simulate biomolecules themselves, we are merely trying to find other entities that can fill similar functional rules.“⁴⁶⁰ (L1 S. 122). An anderer Stelle findet sich aber die Rede von „simulating the molecular logic of life“.⁴⁶¹

Zweitens muss Langton Kriterien dafür haben, wann eine Lebenserscheinung als solche charakterisiert werden kann. Er kann nicht irgendwas, das sein Computer erzeugt hat, als „Leben“ bezeichnen, sondern muss zuvor klar machen, welche Eigenschaften diagnostiziert werden müssen, um von Leben sprechen zu können. Insofern muss er sich auch an der klassischen Biologie orientieren, welche Leben etwa folgendermassen charakterisiert: Die Fähigkeit zum Stoff- und Energiewechsel; die Fähigkeit zu Wachstum und

⁴⁵⁶ Man müsste in diesem Zusammenhang auch die Behandlung von Phasenübergängen innerhalb der Physik vorstellen, wie Viktor Gorgé kritisch bemerkte. Solche Übergänge lassen sich ebenfalls als Beispiel eines komplexen Phänomens auffassen, das im Gegensatz zu anderen aber recht gut verstanden ist. Wir können dies aus Zeitgründen leider nicht leisten.

⁴⁵⁷ Folgende Ausführungen beruhen auf Langton (1986) und Langton (1992).

⁴⁵⁸ Langton (1992), S. 203

⁴⁵⁹ Langton (1992), S. 200.

⁴⁶⁰ Langton (1986), S. 122.

⁴⁶¹ Langton (1986), S. 124.

Fortpflanzung; die Fähigkeit, auf Umweltreize zu reagieren und sich entsprechenden Änderungen anzupassen.⁴⁶² Um künstliche Lebensformen zu studieren, greift Langton folgerichtig auf das Vokabular in der Biologie zurück. Wichtig ist etwa die Genotyp-Phänotyp-Unterscheidung, die er zu einem generalisierten Genotyp bzw. Phänotyp ausbaut. Weiter kreiert er künstliche Moleküle in Form von virtuellen Automaten in Computern, welche die Funktionen ihrer natürlichen Analoga reproduzieren.⁴⁶³

Schliesslich stellt sich das alte Problem, inwieweit man von der „Hardware“ des Lebens abstrahieren kann. So können bestimmte Aspekte von Lebenserscheinungen bei deren Simulation mit einem riesigen Rechenaufwand verbunden sein. Künstliches Leben wäre demnach mit Problemen konfrontiert, welche natürliche Lebensformen nicht haben.

Entstehung von Ordnung: *Stuart A. Kauffman* – ebenfalls Mitglied des SFI – versucht zu ergründen, wie die Konzepte Evolution und Selbstorganisation zusammenwirken.⁴⁶⁴ Es gilt die Frage zu beantworten, inwieweit Selbstorganisationsvorgänge den Prozess der Evolution erlauben und limitieren.

Seine zentrale These ist, dass durch Selbstorganisation entstandene Strukturen trotz eines Evolutionsdrucks von einem Organismus beibehalten werden: „I try to show that such properties as the existence of *distinct cell types*, the *homeostatic stability of cell types*, the *number of cell types* in an organism, the *similarity in gene expression patterns* in different cell types, the fact that development from the fertilized egg is organized around *branching pathways of cell differentiation*, and many other aspects of differentiation are all consequences of properties of self-organization so profoundly immanent in complex regulatory networks that *selection cannot avoid that order*.“⁴⁶⁵ Kauffman argumentiert überdies dafür, dass Leben kein überaus seltenes Phänomen ist, sondern ab einer bestimmten Komplexität eines Systems notwendigerweise eintritt. Er äussert sich aber nur ungenau dazu, was „Komplexität“ in diesem Zusammenhang bedeutet. Lebensvorgänge spielen sich dabei am berühmten „Rand des Chaos“ ab. Auf die Problematik dieser Metapher haben wir schon hingewiesen.

Kauffmans Arbeitsinstrument sind boolesche Netzwerke. Den Prozess der Anpassung untersucht er im Rahmen seiner Theorie der „rugged fitness-landscape“. Ausgehend von einer gegebenen Anzahl Gene, lässt sich der Raum aller möglichen Genotypen festlegen. Die Gewichtung eines jeden Genotyps bezüglich dessen „fitness“ ergibt eine (vieldimensionale) „Landschaft“ mit „Bergen“, gebildet jeweils von angepassteren Genotypen. Der Prozess der Anpassung bedeutet in diesem Bild die Bewegung in dieser „fitness“-Landschaft. Den Formalismus für dieses Modell können wir an dieser Stelle nicht angeben, und es ist uns zugegebenermassen auch kaum möglich, die Brauchbarkeit seines Modells zu überprüfen. Dazu müssten wir uns eingehend mit diesem beschäftigen, was aus zeitlichen Gründen nicht möglich war.

Genetische Algorithmen: *John H. Hollands* Arbeiten betreffen in erster Linie den Prozess der Evolution.⁴⁶⁶ Er entwickelte Computerprogramme, die aus einem der natürlichen Selektion nachempfundenen Evolutionsprozess hervorgehen, sogenannte genetische Algorithmen. Diese gelten innerhalb der Komplexitätsforschung als Paradebeispiel eines komplex-adaptiven Systems.⁴⁶⁷ In Folgenden bieten wir nur eine sehr rudimentäre Einführung in dieses Gebiet.

Man kann sich das Prinzip eines genetischen Algorithmus folgendermassen verdeutlichen: Ein Programm besteht aus einem Set von Regeln. Jede Regel führt bei einem bestimmten Input (Bedingung) zu einem bestimmten Output (Handlung). Bedingungen und Handlungen werden durch Binärketten (z.B. 00011010011101) codiert. 0 bedeutet dabei die Abwesenheit einer Bedingung bzw. das Nichtausführen einer Handlung, 1 entsprechend deren Anwesenheit bzw. deren Ausführung. Die gesamte Kette ist gleichsam der genetische Code des Programms. Die Ketten werden nun einem „Evolutionprozess“ un-

⁴⁶² Vergleiche Gerhard et al. (1986), Stichwort „Leben“.

⁴⁶³ Die Ausführungen zu diesem Programm finden sich in Langton (1986), insb. Abschnitte 2 und 10.

⁴⁶⁴ Folgende Ausführungen beruhen vor allem auf Kauffman (1993).

⁴⁶⁵ Kauffman (1993), S. xvii.

⁴⁶⁶ Die Ausführungen beruhen auf Holland (1986) und Holland (1992).

⁴⁶⁷ Siehe Gell-Mann (1994), S. 431-434.

terworfen, der vor allem aus zwei Faktoren besteht: „Selektion“ und „sexuelle Reproduktion“. „Mutation“ wird ebenfalls zugelassen, tritt aber nur sporadisch auf.

Das System besteht aus drei Ebenen: Die erste besteht aus einem „performance system“, d.h. das Regelset interagiert mit einer vom Programmierer gegebenen „Umwelt“. In einer zweiten wird die „Bewährung“ der einzelnen Ketten gemessen. In einer dritten schliesslich werden neue Regeln kreiert analog einem Crossover von Chromosomen bei befruchteten Eizellen. Im Fall einer Binärkette 00000000 und 11111111 führt dies z.B. zu 00011111 und 11100000. Zuweilen wird „Mutation“ zugelassen, d.h. aus einer 1 wird eine 0 und umgekehrt. Der Prozess wird rückgekoppelt, und im Laufe der Zeit entsteht eine „Population“ von Binärketten, welche für die (vom Programmierer) gestellten Probleme gute Lösungen liefern. Das Verfahren hat sich als erfolgreich für die Bewältigung von sehr schwierigen Problemen erwiesen, d.h. solche mit einem grossen Lösungsraum.

Es wurden im weiteren auch Systeme entwickelt, die koevolutieren. Die Randbedingungen (die „Umwelt“) werden dabei nicht vom Programmierer vorgegeben, sondern können sich ebenfalls verändern.

4. Komplexität als neue Weltansicht

Zum Schluss dieses Teils gehen wir noch auf einige Aspekte der Popularisierung der Komplexitätsforschung ein. Es gibt sicher genügend Anzeichen, welche die Komplexitätsforschung als wissenschaftliche Modeströmung kennzeichnen. Diese ist vor allem im deutschen Sprachraum sicher noch nicht abgeklungen. Ihre Vorläuferin war die popularisierte Chaostheorie, was sich klar zeigen lässt. Schliesslich lässt sich die popularisierte Version der Komplexitätsforschung auch in einen innerhalb der Gesellschaft spürbaren „antireduktionistischen Megatrend“ einordnen.

4.1. Komplexität – der Hype nach Chaos

Modeströmungen haben wissenschaftliche Erkenntnisse schon immer begleitet. War etwa zu Beginn dieses Jahrhunderts der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik Gegenstand ausschweifender spekulativer Betrachtungen, so finden sich in heutiger Zeit ähnliche Vorgänge um die Chaostheorie oder eben die Komplexitätsforschung.

Eine wissenschaftliche Modeströmung lässt sich folgendermassen charakterisieren: Eine bestimmte Theorie oder zentrale Aussagen dieser Theorie finden breite Beachtung bis in die Tagespresse hinein, eine Reihe populärer Bücher zur Theorie bzw. über deren Wichtigkeit erscheinen, es ist die Rede von einem „Paradigmenwechsel“, und ganz allgemein wird behauptet, die Theorie finde verschiedenste Anwendungen. Modeströmungen sind zudem meist recht kurzlebige Angelegenheiten, geprägt von Übertreibungen und mitunter auch falschen Behauptungen. Exemplarisch machte dies die Katastrophentheorie deutlich, worauf wir schon aufmerksam gemacht haben (vgl. Teil II, Abschnitt 1.5).⁴⁶⁸

Etwa ab Mitte der 80er Jahre hatte eine neue wissenschaftliche Disziplin ihren grossen Auftritt auf der Bühne der Öffentlichkeit: die Chaostheorie. Sie hatte den nicht zu unterschätzenden Vorteil, mit der fraktalen Geometrie ein ausgezeichnetes Hilfsmittel zur Visualisierung zu besitzen. Die Schönheit von hübsch hergerichteten Fraktalen (die verwendeten Farben sind keine inhärente Eigenschaft von Fraktalen) wie die Mandelbrot-Menge – das „Apfelmännchen“ – kann man kaum bestreiten. Entsprechend zierten Bilder solcher Fraktale Bucheinbände bis hin zu T-Shirts. Einen Eckstein der Popularisierung der Chaostheorie setzt *James Gleick* mit dem Bestseller „Chaos. Making a New Science“.⁴⁶⁹ Geographisch

⁴⁶⁸ Vgl. auch Schuster (1991b) und Kolata (1977).

⁴⁶⁹ Gleick (1987). Die Popularisierung von Selbstorganisationstheorien fand übrigens etwas früher statt. Vergleiche dazu Jantsch (1979) oder Haken (1991, erste Auflage 1981).

entwickelte sich die Popularisierung übrigens zuerst in den USA. Durch Übersetzungen populärer Bücher erreichte der Trend dann nach kurzer Zeit den deutschen Sprachraum.

Als gleichsam legitime Nachfolgerin der Chaostheorie gilt die Komplexitätsforschung.⁴⁷⁰ Dies hat sicher auch sachliche Gründe, wie wir dargelegt haben. Andererseits spielt wohl auch ein verkaufspycho-logisches Element hinein, indem man an den finanziellen Erfolg der popularisierten Chaostheorie anknüpfen wollte. Das erste populäre Buch zur Komplexitätsforschung ist *Heinz Pagels* „The Dreams of Reason. The Computer and the Rise of the Science of Complexity“.⁴⁷¹ Zu Beginn der 90er Jahre setzte dann vor allem in den USA ein wahrer Boom mit populärwissenschaftlichen Büchern über die Komplexitätsforschung ein.⁴⁷² Zu den Autoren gehören Wissenschaftsjournalisten, aber auch Vertreter der Komplexitätswissenschaft selbst. Mit etwa ein bis zweijähriger Verspätung finden sich die entsprechenden Übersetzungen im deutschen Sprachraum, welcher momentan von diesem Boom voll erfasst wird. Die Popularisierungskampagne (vor allem jene über die Selbstorganisationsforschung, die etwas früher einsetzte) hat auch Anschluss an die Esoterikbewegungen der späten 70er und 80er Jahre gefunden, wie *Frank Mussmann* ausführt. Sicher ein Aspekt, der die Komplexitätsforschung für manche Naturwissenschaftler suspekt erscheinen lässt.⁴⁷³

Auf zwei Aspekte der Popularisierung wollen wir noch kurz hinweisen: So sieht man die Komplexitätsforschung gerne als eigentliche „Stosstruppe“ der wissenschaftlichen Erkenntnis.⁴⁷⁴ Andererseits betont man ihre Wichtigkeit für die Lösung anstehender Probleme, beispielsweise ökologischer Art.⁴⁷⁵ Überzogene Ansprüche bezüglich der Anwendung der Komplexitätsforschung finden sich ebenfalls: So kommentiert man, ausgehend von dieser, historische Entwicklungen,⁴⁷⁶ spricht von „spontanen Ordnungskräften der Komplexität in der Gesellschaft“;⁴⁷⁷ versteht den „Kern der politischen Ökonomie des Liberalismus“ mittels der Komplexität des gesellschaftlichen Systems⁴⁷⁸ und findet schliesslich einen „Zusammenhang von Dynamik, komplexer Ordnung und Freiheit“.⁴⁷⁹

Die Propagierung der Komplexitätsforschung hat für deren Vertreter sicher Vor- und Nachteile. So vereinfacht eine „gesellschaftlich anerkannte“ Komplexitätsforschung sicher die Suche nach Geldquellen, was unabdingbar für die Institutionalisierung der Komplexitätsforschung ist.⁴⁸⁰ Andererseits erhöht eine exzessive Popularisierung, verbunden mit überzogenen Ansprüchen, auch die Skepsis von Fachkollegen, was den Status des neuen Gebiets innerhalb der Wissenschaft vermindert.⁴⁸¹

⁴⁷⁰ Dies kann man exemplarisch an den verwendeten Titeln von Populärbüchern zeigen: Cohen et al. (1994): „The Collaps of Chaos. (...)“; Kaye (1993): „Chaos & Complexity“; Lewin (1992): „Die Komplexitätstheorie. Wissenschaft nach der Chaosforschung“ oder Peak et al. (1995): „Komplexität. Das gezähmte Chaos“.

⁴⁷¹ Pagels (1988).

⁴⁷² Zu nennen sind unter anderem: Casti (1994), Cohen et al. (1994), Gell-Mann (1994), Kaye (1993), Lewin (1993), Mainzer (1994), Peak et al. (1995) und Waldrop (1992).

⁴⁷³ Mussmann (1995), S. 332-337.

⁴⁷⁴ So etwa in Anderson (1991), der die Komplexitätsforschung als „leading edge of science“ bezeichnet; S. 11.

⁴⁷⁵ Mainzer (1994) bringt dies auf die Formel: „The theory of nonlinear complex systems has become a successful problem solving approach in the natural science (...). On the other hand, the social sciences are recognizing that the main problems of mankind are global, complex and nonlinear, too.“ (S. 1).

⁴⁷⁶ Kanitscheider (1993) behauptet beispielsweise, der Niedergang des Sozialismus habe systemtheoretische Gründe, S. 62.

⁴⁷⁷ Kanitscheider (1993), S. 63.

⁴⁷⁸ Kanitscheider (1991), S. 756.

⁴⁷⁹ Kanitscheider (1991), S. 757.

⁴⁸⁰ John Horgan (1995) hält dazu fest: „At various times, researchers have debated whether complexity has become so meaningless, that it should be abandoned, but they invariably conclude that the term has too much public-relations value.“, S. 76.

⁴⁸¹ Der Gefahr einer Trivialisierung des Projektes Komplexitätsforschung sind sich durchaus auch Vertreter der Forschungsrichtung selbst bewusst. Casti (1992) schreibt etwa: „But useful as all this fuzziness [der popularisierten Komplexitätsforschung] is for fending off cocktail-party bores and writing research grant proposals, it becomes a major impediment when we start talking seriously about a „science“ of complex systems.“, S. 10.

4.2. Die antireduktionistische Welt der Komplexität

Antireduktionismus ist ein zentrales Element der Popularisierung der Komplexitätswissenschaft.⁴⁸² Die Betonung des Scheiterns des (meist sehr primitiv gezeichneten) Reduktionismus bestimmt wesentlich die popularisierte Fassung der Komplexitätswissenschaft.⁴⁸³ Der Grund liegt darin, dass die Reduktionismus-Holismus-Debatte auch innerhalb der Gesellschaftlich stattfindet. Reduktionisten sind dabei zur Zeit die „Bösen“: die Vielfalt der Natur gleichsam verachtend, technokratisch orientiert, sicher auch unökologisch und wahrscheinlich männlich.⁴⁸⁴ Wenn die Popularisierung Erfolg haben soll, muss man sich also auf der „richtigen“ Seite befinden.

Das Aufkommen der Komplexitätswissenschaft wird als Ausdruck bestimmter Änderungen in der wissenschaftlichen Entwicklung gedeutet. So gewinnt, wie *Tom Cheetham* meint, das Besondere, das Zeitliche und das Lokale an Interesse.⁴⁸⁵ Dieser Punkt hat sicher seine Berechtigung, kollidiert aber letztlich mit dem Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft bzw. mit den angesprochenen einheitswissenschaftlichen Tendenzen.

Gepredigt wird zuweilen auch eine Abkehr vom „Newtonschen Weltbild“.⁴⁸⁶ Diese Argumentation ist aber problematisch. Vom wissenschaftlichen Standpunkt ist diese Abkehr längst erfolgt, spätestens seit dem Aufkommen von Relativitäts- und Quantentheorie in den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts. Die Metapher bleibt höchstens gültig, indem man das Newtonsche Weltbild der Karikatur des Reduktionisten zuschreibt.

Auf der populären Ebene liefert die Komplexitätswissenschaft letztlich kaum Neues. Sie ergänzt die schwarzweiss geführte Reduktionismus-Holismus-Debatte lediglich mit neuen „Beschimpfungen“: Die „linear“ (und damit falsch) Denkenden gegen die „nichtlinear“ Denkenden beispielsweise.⁴⁸⁷

Das Hauptproblem liegt darin, dass die Komplexitätsforschung ihren Emergenzbegriff bisher nicht expliziert hat. Die Gefahr eines Doppelspiels ist also nicht behoben, d.h. man präsentiert sich der Öffentlichkeit als liebenswerte Antireduktionisten, vertritt aber lediglich eine epistemische Emergenz, welche Reduzierbarkeit durchaus erlaubt.

⁴⁸² Diese „antireduktionistische Weltsicht“ findet sich notabene auch in den früheren Ansätzen der Systemtheorie, vergleiche dazu etwa Checkland (1976).

⁴⁸³ Im Folgenden ein paar Zitate: Çambel (1993) meint: „It is doubtful that the reductionistic approach by itself will be fruitful in the understanding of complex systems.“, S. 22; Casti (1994): „A second and somewhat more direct reason for trying to create a science of the complex is to get a handle on the limits of reductionism as a universal problem-solving approach.“, S. 273; Kaye (1993): „The opposite of reductionism is the direct study of complexity (...), S. 9;

⁴⁸⁴ Die Wertung hängt natürlich vom Standpunkt ab. Für Reduktionisten sind ihre Gegner kaum mehr als antiwissenschaftliche Romantiker, oder wie Cheetham (1993) meint: „(...) extremists on one side are avowedly anti-technological, anti-scientific, and ultimately dangerously anti-intellectual. (...) At the other extreme lie reductionism, mechanism, and exploitation.“, S. 294.

⁴⁸⁵ Cheetham (1993), S. 297.

⁴⁸⁶ Vgl. Prigogine et al. (1990).

⁴⁸⁷ Exemplarisch in Mainzer (1994). Mainzer entgegnete übrigens in einem Leserbrief zum Beitrag von John Horgan (1995), dieser solle lieber Telefonbücher lesen, diese seien „linear“. (Spektrum der Wissenschaft 3/1996, S. 8). Auf dieser Ebene bewegt sich zuweilen die Diskussion.

Dörner (1993) versucht immerhin eine Konkretisierung des Begriffs „lineares Denken“: Darunter ist die Annahme einfacher Ursache-Wirkungs-Ketten zu verstehen unter Vernachlässigung von Seiteneffekten, die auf lange Sicht makroskopische und meist unerwünschte Folgen zeitigen. S. 133.

Teil V

Drei Zweifel am Projekt der Komplexitätsforschung

Im Sinne einer Schlussbetrachtung formulieren wir drei Zweifel am von uns vorgestellten Projekt der Komplexitätsforschung. Die Elemente dieser Zweifel sind im Laufe der Arbeit aufgetaucht und sollen hier zusammengestellt werden.

Diese Zweifel begründen den Verdacht, dass die Komplexitätsforschung in ihrem bisherigen Selbstverständnis grosse Schwierigkeiten haben wird, ihre Ziele zu erreichen. Es stellt sich die Frage, ob die Rede von einer einheitlichen Komplexitätswissenschaft überhaupt sinnvoll ist. Ein Urteil zu den Untersuchungen innerhalb dieser Wissenschaft scheint uns aber nicht angebracht.

Hingegen ist es unserer Ansicht nach klar, dass die in der populären Literatur aufgetretenen Ansprüche bezüglich der Geltungskraft der Komplexitätsforschung bei weitem überzogen sind. Sie halten einer vertiefenden Kritik nicht stand und disqualifizieren sich als Elemente der Propaganda.

1. Heterogenität

Unser erster Zweifel betrifft das Bezugsfeld der Komplexitätsforschung. Wir haben feststellen können, dass Phänomene unterschiedlichster wissenschaftlicher Disziplinen innerhalb der Komplexitätsforschung untersucht werden sollen (Teil IV, Abschnitt 1.2 und 1.3). Es lassen sich einheitswissenschaftliche Tendenzen feststellen (Teil IV, Abschnitt 1.4).

Damit unterliegt die Komplexitätsforschung jenen Problemen, mit denen auch frühere einheitswissenschaftliche Projekte konfrontiert waren. Es stellt sich die Frage, mit welchem Reduktionsbegriff operiert werden kann, damit die verschiedenen (komplexen) Phänomene einem einheitlichen Erklärungsmuster unterworfen werden können. Bei der Komplexitätsforschung wird das Problem durch die Verwendung des Emergenzbegriffs zusätzlich verschärft. Diesen Punkt behandeln wir in Zweifel 3.

Jede Wissenschaft, die Phänomene unterschiedlicher Disziplinen untersuchen will, sieht sich mit dem Problem konfrontiert, dass diese Disziplinen verschiedene Theorien und damit auch ein unterschiedliches Vokabular verwenden, um die Phänomene zu beschreiben und zu erklären. Die Frage nach der Übersetzbarkeit dieses Vokabulars wird sehr kontrovers diskutiert und ist mitnichten gelöst. Im Fall der Komplexitätsforschung bedeutet dies beispielsweise folgendes: Man kann für den Fall eines physikalischen Systems (dereinst) durchaus unter Verwendung physikalischer Begriffe zu einer akzeptierten und wissenschaftlich brauchbaren Explikation der Aussage: „Dieses System ist komplex“ gelangen. Es ist aber nicht gesagt (und höchst problematisch), ob diese Explikation auch beispielsweise auf den Bereich der Wirtschaft übertragen werden kann. Wenn man also ein System aus der Wirtschaft untersucht, wird man kaum mit gleichem Recht behaupten können, „Dieses System ist komplex“ und dabei dasselbe meinen wie im ersten Fall. Derzeit kann man den Ausdruck „komplexes System“ wohl nur im intuitiven Sinn verwenden, will man verschiedene Phänomene damit bezeichnen.

Die inhärente Theorierelativität des Komplexitätsbegriffs (vgl. Zweifel 2) lässt ebenfalls bezweifeln, dass man zu einer universal brauchbaren Explikation von „Komplexität“ gelangen wird, die über den intuitiven Gebrauch hinausgeht. Dies zeigt sich auch daran, dass schon innerhalb der Naturwissenschaften recht verschiedene Konzepte von Komplexität entwickelt wurden.

Probleme sind auch mit dem verwendeten Begriff von Analogie aufgetreten (Teil IV, Abschnitt 3.1). Die Verwendung von Computermodellen leistet nicht die gewünschte Erklärungskraft. Hat man ein natürliches Phänomen auf dem Computer halbwegs vernünftig simuliert, hat man nicht die Gewissheit, dass die in der Simulation verwendeten Prinzipien auch ihre Entsprechung in der Natur haben. Phänomene in der Natur, die ähnlich erscheinen, können trotzdem sehr unterschiedliche Ursachen haben. Insbesondere die – beispielsweise bei zellulären Automaten (Teil IV, Abschnitt 3.2) – gemachte Feststellung, komple-

xe Phänomene können einfache Ursachen haben, muss natürlich bei komplexen Phänomenen in der Natur nicht anwendbar sein.

Gerade die zentrale Bedeutung des Computers für die Komplexitätsforschung (Teil IV, Abschnitt 3) ist unserer Ansicht nach ein Ausdruck der Hoffnung, die Heterogenität des Bezugsfelds dereinst überwinden zu können. Liessen sich sämtliche Phänomene des Universums irgendeinmal unter einem universellen Berechenbarkeitsbegriff fassen, wäre die Möglichkeit einer einheitlichen Beschreibung vielleicht gegeben. Man hätte dann für jeden Prozess einen Algorithmus, der schliesslich Gegenstand eines Komplexitätsmasses sein könnte. Derartige Überlegungen sind aber höchst spekulativ.

2. Relativität

Der Zweifel Relativität betrifft den Komplexitätsbegriff selbst. Die Komplexitätsforschung ist an einem möglichst universal anwendbaren Mass für Komplexität interessiert. Ein solches würde es ermöglichen, dass all jene Phänomene, auf die das Mass anwendbar wäre, einheitlich charakterisiert werden könnten. Dies ist ein wichtiger (und unseres Erachtens auch notwendiger) Schritt, will man verschiedene Phänomene einem einheitlichen Erklärungsmuster unterziehen (vgl. Teil I, Abschnitt 3.1).

Wir haben aber deutlich gemacht (Teil III, Abschnitt 3), dass die halbwegs universale Intuition für die Etablierung eines Komplexitätsmasses – die Komplexität eines Systems mit dessen Beschreibung in Verbindung zu bringen – inhärent theorie-relativ ist. Dabei sind gleich drei relativierende Aspekte involviert: durch die Spezifikation der Struktur, durch die Wahl der Beschreibungssprache und durch die Wahl der Gliederungstiefe. Damit gelangt man also nicht zu einer einheitlichen Explikation des Begriffs „komplexes System“.

Eine derart massive Relativität lässt auch Zweifel aufkommen, ob man überhaupt einmal von einer „Observablen Komplexität“ sprechen kann. Damit wird natürlich nicht in Abrede gestellt, dass es für eng definierte Probleme (beispielsweise in der I-Komplexitätstheorie) sehr wohl möglich ist, brauchbare Komplexitätsmasse einzuführen. Hingegen erscheint es aussichtslos, Phänomene wie die Komplexitätszunahme in der Evolution (Teil II, Abschnitt 2.5) so formulieren zu können, dass sie auch wissenschaftlich untersucht werden können. Man wird wohl auch hier über einen intuitiven Gebrauch des Komplexitätsbegriffs nicht hinauskommen.

3. Emergenz

Die Emergenzfrage findet innerhalb der Komplexitätsforschung ihren Ausdruck in zwei Problemen: Einerseits wird behauptet, dass Emergenzkomplexität ein zentraler Aspekt komplexer Systeme ist (Teil IV, Abschnitt 1.1). Die konkreten Beispiele, worin das Emergente bei komplexen Systemen besteht, sind aber durchaus anzweifelbar (Teil IV, Abschnitt 2.1). Die Komplexitätsforschung scheint sich nicht im klaren zu sein, welcher Begriff von Emergenz (vgl. Teil I, Abschnitt 3.3) verwendet werden soll.

Andererseits erweist sich das Forschungsprogramm der Komplexitätswissenschaft in gewissem Sinn als reduktionistisch (Teil IV, Abschnitt 1.2). Dies ist auch unter Beachtung der einheitswissenschaftlichen Tendenzen notwendig. Es ist weiter die Rede von neuen Prinzipien, die es zu entdecken gelte, um komplexe Systeme zu verstehen. Unklar ist aber, welchen Status diese im Vergleich zu den bisher bekannten haben sollen (Teil IV, Abschnitt 2.2). Es könnte sich um Kandidaten nomologischer Emergenz handeln. Die Komplexitätsforschung hat aber bisher keine überzeugenden „neuen Prinzipien“ vorgelegt. Schwierigkeiten werden sich zudem mit dem gewünschten universalen Charakter solcher neuer Prinzipien ergeben, wenn es schon zweifelhaft erscheint, dem Terminus „komplexes System“ die gewünschte Universalität zu geben.

Problematisch sind diese Defizite insbesondere wegen des propagierten Antireduktionismus, der vor allem in der populären Literatur auftritt (Teil IV, Abschnitt 4.2). Dieser ist unseres Erachtens nicht haltbar. Vor allem deshalb, weil viele der vorgestellten „emergenten Phänomene“ lediglich einen epistemischen Charakter zu haben scheinen, d.h. nur relativ zu einer gewählten Theorie emergent sind. Die Verwendung eines solchen Emergenzbegriffs schliesst den harten Antireduktionismus aus.

Interessant wird die Komplexitätsforschung vor allem dann, wenn es ihr tatsächlich gelingt, „neue Prinzipien“ aufzustellen, mit welchen sich (bestimmte) komplexe Systeme besser erklären lassen. Wohl erst dann wird man klären können, in welchem Verhältnis Komplexität und Emergenz stehen.

Literatur

Das Literaturverzeichnis umfasst sämtliche Werke, aus welchen zitiert bzw. auf welche hingewiesen wurde. Sammelbände sind separat aufgeführt. Sind mehrere Jahreszahlen angegeben, bezieht sich die erste auf die Erst- bzw. Originalausgabe, während die zweite jene Publikation betrifft, die gelesen wurde.

- Ackerman**, Robert (1962); *Some Remarks on Kyburg's Modest Proposal*; Philosophical Review 71; S. 236-240.
- Agnes**, Corrado / Rasetti, Mario (1987); *Complexity, Undecidability and Chaos: A Class of Dynamical Systems with Fractal Orbits*; In: Livi et al. (1987).
- Allen**, P.M. / McGlade, J.M. (1987); *Modelling complex human systems: A fisheries example*; European Journal of Operational Research 30; S. 147-167.
- Allen**, T.F.H. / Starr, Thomas B. (1982); *Hierarchy. Perspectives for Ecological Complexity*; The University of Chicago Press; Chicago and London.
- An der Heiden**, Uwe (1992); *Selbstorganisation in dynamischen Systemen*; In: Krohn (1992b).
- Anderson**, Philip W. / Arrow, Kenneth J. / Pines, David (eds.) (1988); *The Economy as an Evolving Complex System*; Addison-Wesley; Redwood City.
- Anderson**, Philip W. (1972); *More Is Different*; Science 177; S. 393-396.
- Anderson**, Philip W. (1991); *Is Complexity Physics? Is it Science? What is it?*; Physics Today, July; S. 9-11.
- Anderson**, Philip W. (1992); *Complexity II: The Santa Fe Institute*; Physics Today, June; S. 9-11.
- Arrowsmith**, D.K. / Place, C.M. (1990/1994); *Dynamische Systeme*; Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg; Original: An Introduction to Dynamical Systems (1990).
- Arthur**, W. Brian (1989); *The Economy and Complexity*; In: Stein (1989).
- Ashby**, W. Ross (1958a); *An Introduction to Cybernetics*; John Wiley; New York.
- Ashby**, W. Ross (1958b); *Requisite variety and its implications for the control of complex systems*; Cybernetica vol. I, No. 2; S. 83-99.
- Ashby**, W. Ross (1973); *Some peculiarities of complex systems*; Cybernetic Medicine 9; S. 1-7.
- Atlan**, Henri (1974); *On a Formal Definition of Organization*; Journal of theoretical Biology 45; S. 295-304.
- Atlan**, Henri / Ben-Ezra, Esther / Fogelman-Soulie, Françoise / Pellegrin, Didier / Weisbuch, Gerard (1986); *Emergence of Classification Procedures in Automata Networks as a Model for Functional Self-Organization*; Journal of theoretical Biology 120; S. 371-380.
- Atlan**, Henri (1987); *Self Creation of Meaning*; Physica Scripta 36; S. 563-576.
- Atlan**, Henri (1988); *Measures of Biologically Meaningful Complexity*; In: Peliti et al. (1988).
- Atlan**, Henri (1991); *L'intuition du complexe et ses théorisations*; In: Fogelman Soulié (1991).
- Baas**, Nils A. (1994); *Emergence, Hierarchies, and Hyperstructures*; In: Langton (1994).
- Bak**, Per / Tang, Chao / Wiesenfeld, Kurt (1988); *Self-organized criticality*; Physical Review A, July; S. 364-374.
- Bak**, Per / Chen, Kan (1991); *Selbstorganisierte Kritizität*; Spektrum der Wissenschaft, März; S.62-71.
- Baldwin**, Maynard M. (1975); *Portraits of Complexity. Applications of Systems Methodologies to Societal Problems*, Battelle Memorial Institute.
- Barrow**, John D. (1990/1992); *Theorien für Alles. Die philosophischen Ansätze der modernen Physik*; Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg; Original: Theories of Everything (1990).
- Batterman**, Robert W. (1993); *Defining Chaos*; Philosophy of Science 60; S. 43-60.
- Bechtel**, William / Richardson, Robert C. (1983); *Consciousness and Complexity: Evolutionary Perspectives on the Mind-Body Problem*; Australasian Journal of Philosophy 61, Dezember; S. 378-395.
- Bechtel**, William / Richardson, Robert C. (1992); *Emergent Phenomena and Complex Systems*; In: Beckermann et al. (1992).
- Bechtel**, William / Richardson, Robert C. (1993); *Discovering Complexity. Decomposition and Localisation as Strategies in Scientific Research*; Princeton University Press; Princeton.
- Beckermann**, Ansgar / Flohr, Hans / Kim, Jaegwon (eds.) (1992); *Emergence or Reduction. Essays on the Prospects of Nonreductive Physicalism*; Walter de Gruyter; Berlin, New York.
- Beddington**, J.R. / Free, C.A. / Lawton, J.H. (1975); *Dynamic complexity in predator-prey models framed in difference equations*, Nature 255, May; S. 58-60.
- Bennett**, Charles H. (1986); *On the Nature and Origin of Complexity in Discrete, Homogenous, Locally-Interacting Systems*; Foundations of Physics 16; S. 585-592.

- Bennett**, Charles H. / Landauer, Rolf (1987); *The Fundamental Physical Limits of Computation*; Scientific American 253/7; S. 38-46.
- Bennett**, Charles H. (1988a); *Dissipation, Information, Computational Complexity and the Definition of Organization*; In: Pines (1988).
- Bennett**, Charles H. (1988b); *Logical Depth and Physical Complexity*; In: Herken (1988).
- Bennett**, Charles H. (1989); *Computational Measures of Physical Complexity*; In: Stein (1989).
- Bennett**, Charles H. (1990); *How to Define Complexity in Physics, and Why*; In: Zurek (1990a).
- Bergmann**, Aviv (1990); *Self-Organization by Simulated Evolution*; In: Jen (1990).
- Berlyne**, D.E. / Madsen, K.B. (eds.) (1973); *Pleasure, Reward, Preference*; New York, London.
- Bischof**, Norbert (1988); *Ordnung und Organisation als heuristische Prinzipien des reduktiven Denkens*; In: Meier (1988).
- Bishop**, Alan, R. (1990); *Simplifying complexity*; Nature 344, March; S. 290-291.
- Blum**, Harold F. (1963); *Complexity and Organization*; Synthese 15; S. 115-121.
- Blum**, Lenore (1990); *Lectures on a Theory of Computation and Complexity over the Reals (or an Arbitrary Ring)*; In: Jen (1990).
- Börger**, Egon (1992); *Berechenbarkeit, Komplexität, Logik*; Vieweg; Braunschweig.
- Bonner**; John Tyler (1988); *The Evolution of Complexity by Means of Natural Selection*; Princeton University Press; Princeton.
- Bourguignon**, André (1991); *Articulation de la complexité du système nerveux central et de la complexité de l'organisation physique*; In: Fogelman Soulié (1991).
- Bovet**, Daniel Pierre / Crescenzi, Pierluigi L. (1987); *An Introduction to the Theory of Computational Complexity*; In Peliti et al. (1988).
- Bovet**, Daniel Pierre / Crescenzi, Pierluigi (1994); *Introduction to the Theory of Complexity*; Prentice Hall; New York.
- Brock**, William A. (1988); *Nonlinearity and Complex Dynamics in Economics and Finance*; In: Anderson et al. (1988).
- Bronowski**, J. (1970); *New Concepts in the Evolution of Complexity*; Synthese 21; S. 228-246.
- Brudno**, A.A. (1978); *The Complexity of the Trajectories of a Dynamical System*; Russian Mathematical Surveys 33; S. 197-198.
- Brunner** Ronald D. / Brewer, Garry D. (1971); *Organized Complexity*; The Free Press; New York.
- Buiatti**, Marcello (1987) *Information Flux and Constraints in Development and Evolution: A Critical Review*; In: Livi et al. (1987).
- Bunge**, Mario (1962); *The Complexity of Simplicity*; The Journal of Philosophy LIX, March; 113-135.
- Bunge**, Mario (1963); *The Myth of Simplicity*; Prentice Hall Inc.; Englewood Cliffs.
- Çambel**, A.B. (1993); *Applied Chaos Theory. A Paradigm for Complexity*; Academic Press Inc.; Boston.
- Campbell**, David (1989); *Introduction to Nonlinear Phenomena*; In: Stein (1989).
- Carnap**, Rudolf (1928/1974); *Der logische Aufbau der Welt*; Meiner Verlag, Hamburg.
- Casti**; John L. (1979); *Connectivity, Complexity, and Catastrophe in Large-Scale Systems*; John Wiley & Sons; Chichester.
- Casti**, John L. (1984); *System Complexity*; Options IIASA 3; S. 6-9.
- Casti**, John L. / Karlqvist, Anders (eds.) (1986a); *Complexity, Language, and Life: Mathematical Approaches*; Springer-Verlag; Berlin.
- Casti**, John L. (1986b); *On System Complexity: Identification, Measurement, and Management*; In: Casti et al. (1986).
- Casti**, John L. (1992); *The Simply Complex: Trendy Buzzword or Emerging New Science?*; Bulletin of the Santa Fe Institute 7; S. 10-13.
- Casti**, John L. (1994); *Complexification. Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*; Abacus; London.
- Castrodeza**, Carlos (1978); *Evolution, Complexity, and Fitness*; Journal of Theoretical Biology 71; S. 469-471.
- Caws**, Peter (1963); *Science, Computers, and the Complexity of Nature*; Philosophy of Science 30; S. 158-164.
- Cellucci**, Carlos (1985); *Proof Theory and Complexity*; Synthese 62; S. 173-189.
- Chaitin**, Gregory J. (1974); *Information-Theoretic Computational Complexity*; IEEE Transactions on Information Theory 20, January; S. 10-15.
- Chaitin**, Gregory J. (1979); *Towards a Mathematical Definition of „Life“*; In: Levine et al. (1979).
- Checkland**, Peter P. (1976); *Science and the Systems Paradigm*; International Journal of General Systems 3; S. 127-134.

- Cheetham**, Tom (1993); *The Forms of Life: Complexity, History, and Actuality*; Environmental Ethics 15; S. 293-311.
- Churchman**, C. West (1971); *The Design of Inquiring Systems: Basic Concepts of Systems and Organization*; Basic Books Inc.; New York, Berlin.
- Churchman**, C. West (1979/1981); *Der Systemansatz und seine „Feinde“*; Verlag Paul Haupt; Bern; Original: The System Approach and Its Enemies (1979).
- Cohen**, Jack / Stewart, Ian (1994); *The Collapse of Chaos. Discovering Simplicity in a Complex World*; Viking; New York.
- Cornacchio**, Joseph V. (1977a); *Maximum-Entropy Complexity Measures*; International Journal of General Systems 3; S. 215-225.
- Cornacchio**, Joseph V. (1977b); *System Complexity – A Bibliography*; ; International Journal of General Systems 3; S. 267-271.
- Cramer**, Friedrich (1979); *Fundamental Complexity. A Concept in Biological Sciences and Beyond*; Interdisciplinary Science Review 4, No. 2.
- Cramer**, Friedrich (1988); *Chaos und Ordnung. Die komplexe Struktur des Lebendigen*; Deutsche Verlags-Anstalt; Stuttgart.
- Crutchfield**, James P. / Farmer, J. Doyne / Packard, Norman H. / Shaw, Robert S. (1989); *Chaos*; In: Spektrum (1989).
- Csikszentmihalyi**, Mihaly (1970); *Sociological Implications in the Thought of Theilhard de Chardin*; Zygon 5; S. 130-147.
- D’Alessandro**, G. / Politi, A. (1990); *Hierarchical Approach to Complexity with Applications to Dynamical Systems*; Physical Review Letters 64, No. 14; S. 1609-1612.
- Daley**, Robert P. (1976); *Noncomplex Sequences: Characterizations and Examples*; The Journal of Symbolic Logic 41, September; S. 626-638.
- Dasty**, Premysl (1973); *A Measure of the Complexity of a Subsystem*; Cybernetica XVI, No. 1; S. 58-72.
- Davies**, P.C.W. (1989); *The Physics of Complex Organisation*; In: Goodwin et al. (1989).
- Davies**, P.C.W. (1990); *Why is the Physical World so Comprehensible?*; In: Zurek (1990a).
- De Chardin**, Theilhard (1959); *The Phenomenon of Man*; Harper & Bros.; New York.
- De Forcrand**, Ph. / Koukiou, F. / Petritis, D. (1988); *Random Walks, Random Surfaces, and Complexity*; In: Peliti et al. (1988).
- Di Giulio**, Antonietta (1993); *Ökologie – Komplexität – Interdisziplinarität. Wissenschaftshistorische und -theoretische Argumente für einen interdisziplinären Ansatz der Ökologie*; Diplomarbeit an der Philosophisch-historischen Fakultät der Universität Bern; Bern.
- Dodson**, Edward O. (1984); *The Phenomenon of Man Revisited. A Biological Viewpoint on Theilhard de Chardin*; Columbia University Press; New York.
- Doering**, Charles R. (1991); *Modelling Complex Systems: Stochastic Processes, Stochastic Differential Equations, and Fokker-Planck Equations*; In: Nadel et al. (1991).
- Dörner**, Dietrich (1993); *Denken und Handeln in Unbestimmtheit und Komplexität*; Gaia 2, No. 3; S. 128-138.
- Duden** (1982); *Fremdwörterbuch*; Bibliographisches Institut; Mannheim.
- Dupré**, John (1983); *The Disunity of Science*; Mind XCII; S. 321-346.
- Dupuy**, Jean-Pierre (1991); *Sur la complexité du social*; In: Fogelman Soulié (1991).
- Dyke**, Charles (1988); *The Evolutionary Dynamics of Complex Systems*; Oxford University Press; New York, Oxford.
- Eigen**, Manfred / Schuster, Peter (1979); *The Hypercycle – A Principle of Natural Self-Organization*; Heidelberg, New York.
- Eilenberger**, Gert (1990); *Komplexität. Ein neues Paradigma in den Naturwissenschaften*; In: Von Ditfurth (1990).
- Elcock**, E.W. / Michie, Donald (eds.) (1977); *Machine Intelligence 8*; Ellis Horwood Limited; Chichester.
- Epstein**, Irving R. / Kustin, Kenneth, De Kepper, Patrick, Orbán, Miklós (1989); *Oszillierende chemische Reaktionen*; In: Spektrum (1989).
- Eriksson**, Karl-Erik / Lindgren, Kristian / Månsson, Bengt Å. (eds.) (1987); *Structure, Context, Complexity, Organisation*; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; Singapore.
- Eubank**, Stephen / Farmer, Doyne (1990); *An Introduction to Chaos and Randomness*; In: Jen (1990).
- Feigl**, H. / Scriven, M. / Maxwell, G. (eds.) (1958); *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol. II; University of Minnesota Press; Minneapolis.
- Feistel**, Rainer / Ebeling, Werner (1989); *Evolution of Complex Systems. Self-Organization, Entropy and Development*; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, Borton, London.

- Fenton**, N.E. (1991); *The Mathematics of Complexity in Computing and Software Engineering*; In: Johnson et al. (1991).
- Ferdinand**, Arthur E. (1974); *A Theory of System Complexity*; International Journal of General Systems 1; S. 19-33.
- Feyerabend**, Paul (1975/1983); *Wider den Methodenzwang*; Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft; Frankfurt am Main; Original: *Against Method. Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge* (1975).
- Fliessbach**, Torsten (1993); *Statistische Physik*; B.I. Wissenschaftsverlag; Mannheim.
- Flood**, Robert L. (1987); *Complexity: a Definition by Construction of a Conceptual Framework*; Systems Research 4 No. 3; S. 177-185.
- Flood**, Robert L. / Carson, Ewart R. (1993); *Dealing with Complexity. An Introduction to the Theory and Application of System Science*; Plenum Press; New York, London.
- Fogelman Soulié**, Françoise (1991); *Les théories de la complexité*; Editions du Seuil; Paris.
- Fontana**, Walter (1991); *Functional Self-Organization in Complex Systems*; In: Nadel et al. (1991).
- Forrest**, Stephanie (1990); *Emergent Computation: Self-Organization, Collective, and Cooperative Phenomena in Natural and Artificial Computing Networks*; Physica D 42; S. 1-11.
- Frette**, Vidar / Christensen, Kim / Malthe-Sørenssen, Anders / Feder, Jens / Jøssang, Thorstein / Meakin, Paul (1996); *Avalanche dynamics in a pile of rice*; Nature 379, 4. January; S. 49-52.
- Gaines**, Brian R. (1977); *System Identification, Approximation and Complexity*; International Journal of General Systems 3; S. 145-174.
- Gellert**, Walter / Kästner, Herbert / Neuber, Siegfried (1978); *Fachlexikon abc Mathematik*; Verlag Harri Deutsch; Thun, Frankfurt/Main.
- Gell-Mann**, Murray (1994); *Das Quark und der Jaguar. Vom Einfachen zum Komplexen – Die Suche nach einer neuen Erklärung der Welt*; Piper; München, Zürich. Original: *The Quark and the Jaguar* (1994).
- George**, Larry (1977); *Tests for System Complexity*; International Journal for General Systems 3; S. 253-258.
- Gerhard**, Dietrich / Stöcker, Friedrich W. (1986); *Fachlexikon abc Biologie*; Verlag Harri Deutsch; Thun, Frankfurt/M.
- Gleick**, James (1987); *Chaos. Making a New Science*; Penguin Books; New York.
- Good**, I.J. (1968); *Corroboration, Explanation, Evolving Probability, Simplicity and a Sharpened Razor*; British Journal for the Philosophy of Science 19; S. 123-143.
- Good**, I.J. (1974); *A Correction Concerning Complexity*; British Journal for the Philosophy of Science 25; S. 289.
- Good**, I.J. (1977); *Rationality, Evidence, and Induction in Scientific Inference*; In: Elcock et al. (1977).
- Goodman**, Nelson (1955); *Axiomatic Measurement of Simplicity*; The Journal of Philosophy 52, No. 24; S. 709-722.
- Goodwin**, Brian / Saunders, Peter (eds.) (1989); *Theoretical Biology. Epigenetic and Evolutionary Order from Complex Systems*; The John Hopkins University Press; Baltimore, London.
- Gottinger**, Hans W. (1983); *Coping with Complexity*; D. Reidel Publishing Company; Dordrecht.
- Gorgé**, Viktor (1995); *Geschichte und Philosophie der exakten Wissenschaften*; Skript zu einer Vorlesung gehalten an der Universität Bern; Institut für theoretische Physik, Bern.
- Grassberger**, Peter (1986); *Toward a Quantitative Theory of Self-Generated Complexity*; International Journal of Theoretical Physics 25; S. 907-938.
- Grassberger**, Peter (1988); *Complexity and Forecasting in Dynamical Systems*; In: Peliti et al. (1988).
- Gregg**, John R. / Harris, F.T.C. (eds.) (1964); *Form and Strategy in Science*; D. Reidel Publishing Company; Dordrecht.
- Grenander**, Ulf (1986); *Pictures as Complex Systems*; In: Casti et al. (1986).
- Habermas**, Jürgen / Luhmann, Niklas (1971); *Theorie der Gesellschaft oder Sozialtechnologie – Was leistet die Systemforschung?*; Suhrkamp Verlag; Frankfurt am Main.
- Haken**, Hermann (1977/1990); *Synergetik*; Springer-Verlag; Berlin. Original: *Synergetics. An Introduction* (1977).
- Haken**, Hermann (1981/1991a); *Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken*; Ullstein; Frankfurt am Main.
- Haken**, Hermann (1991b); *Die Selbstorganisation der Information in biologischen Systemen aus der Sicht der Synergetik*; In: Küppers (1991a).
- Hayes**, Brian (1984); *Computer Recreations*; Scientific American 250/3; S. 10-16.
- Hedrich**, Reiner (1990); *Komplexe und fundamentale Strukturen. Grenzen des Reduktionismus*; B.I. Wissenschaftsverlag; Mannheim.
- Hedrich**, Reiner (1994); *Die Entdeckung der Komplexität. Skizzen einer strukturwissenschaftlichen Revolution*; Verlag Harri Deutsch; Thun, Frankfurt am Main.
- Held**, G.A. / Solina, D.H. / Keane, D.T. / Haag, W.J. / Horn, P.M. / Grinstein, G. (1990); *Experimental Study of Critical-Mass Fluctuations in an Evolving Sandpile*; Physical Review Letters 65/9; S. 1120-1123.

- Hemminger**, Hansjörg (1994); *Soziobiologie des Menschen – Wissenschaft oder Ideologie?*; Spektrum der Wissenschaft Juni 6/1994; S. 72-80.
- Herken**, Rolf (ed.) (1988); *The Universal Turing Machine. A Half-Century Survey*; Oxford University Press; Oxford.
- Hinegardner**, Ralph / Engelberg, Joseph (1983); *Biological Complexity*; Journal of theoretical Biology 104; S. 7-20.
- Hobbs**, Jesse (1993); *Ex post facto Explanations*; The Journal of Philosophy 90/3; S. 117-136.
- Holland**, John H. (1986); *A Mathematical Framework for Studying Learning in Classifier Systems*; Physica 22D; S. 307-317.
- Holland**, John H. (1988); *The Global Economy as an Adaptive Process*; In: Anderson et al. (1988).
- Holland**, John H. (1992); *Genetische Algorithmen*; Spektrum der Wissenschaft, September 9/1992; S. 44-51.
- Horgan**, John (1995); *From Complexity to Perplexity*; Scientific American 261/6; S. 74-79.
- Hoyningen-Huene**, Paul (1989); *Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns*; Viehweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Braunschweig, Wiesbaden.
- Hoyningen-Huene**, Paul (1994); *Zu Emergenz, Mikro- und Makrodetermination*; In: Lübbe (1994).
- Hubbard**, Barbara Burke / Hubbard, John (1994); *Gesetz und Ordnung im Universum: Die KAM-Theorie*; Spektrum der Wissenschaft 12/1994; S. 86-96.
- Huberman**, B.A. (1989); *The Adaption of Complex Systems*; In: Goodwin et al. (1989).
- Huberman**, B.A. / Hogg, T. (1986); *Complexity and Adaptation*; Physica 22D; S. 376-384.
- Isola**, Stefano (1987); *Understanding complex behaviour. Some remarks on method and interpretation*; In: Livi et al. (1987).
- Jantsch**, Erich (1979); *Die Selbstorganisation des Universums*; dtv; München.
- Jen**, Erica (ed.) (1990); *1989 Lectures in Complex Systems*; Addison-Wesley; Redwood City.
- Johnson**, Jeffrey H. (1986); *A Theory of Stars in Complex Systems*; In: Casti et al. (1986).
- Johnson**, Jeffrey H. / Loomes, M.J. (eds.) (1991); *The Mathematical Revolution Inspired by Computing*; Clarendon Press; Oxford.
- Johnson**, Jeffrey H. (1991); *The Mathematics of Complex Systems*; In: Johnson et al. (1991).
- Jürgens**, Hartmut / Peitgen, Heinz-Otto / Saupe, Dietmar (1989); *Fraktale – eine neue Sprache für komplexe Strukturen*; In: Spektrum (1989).
- Kadanoff**, Leo P. (1991); *Complex Structures from Simple Systems*; Physics Today 44/3; S. 9-11.
- Kampis**, G. / Csányi, V. (1987); *Notes on Order and Complexity*; Journal of theoretical Biology 124; S. 111-121.
- Kanitscheider**, Bernulf (1981); *Wissenschaftstheorie der Naturwissenschaft*; Walter de Gruyter & Co.; Berlin, New York.
- Kanitscheider**, Bernulf (1991); *Selbstorganisation in komplexen Systemen*; Universitas 8; S. 751-760.
- Kanitscheider**, Bernulf (1993); *Von der mechanistischen Welt zum kreativen Universum*; Wissenschaftliche Buchgesellschaft; Darmstadt.
- Kauffman**, Stuart A. (1984); *Emergent Properties in Random Complex Automata*; Physica 10D; S. 145-156.
- Kauffman**, Stuart A. (1987); *Origins of Order in Evolution: Self-Organization and Selection*; In: Livi et al. (1987).
- Kauffman**, Stuart A. (1989); *Principles of Adaption in Complex Systems*; In: Stein (1989).
- Kauffman**, Stuart A. (1991); *Leben am Rande des Chaos*; Spektrum der Wissenschaft 10/1991; S. 90-99.
- Kauffman**, Stuart A. (1993); *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*; Oxford University Press, Oxford.
- Kaye**, Brian (1993); *Chaos & Complexity. Discovering the Surprising Patterns of Science and Technology*; VCH Verlagsgesellschaft; Weinheim.
- Keeley**, Brian L. / Bonabeau, E. (1993); *Is There Room for Philosophy in the Science(s) of Complexity?*; In: Nadel et al. (1993).
- Kemeny**, John G. (1953); *The Use of Simplicity in Induction*; The Philosophical Review; S. 391-408.
- Kemeny**, John G. (1955); *Two Measures of Complexity*; The Journal of Philosophy 52; S. 722-732.
- Klaus**, Georg (ed.) (1967); *Wörterbuch der Kybernetik*; Dieh Verlag, Berlin.
- Klaus**, Georg / Buhr, Manfred (1975); *Philosophisches Wörterbuch*; Leipzig.
- Klir**, George J. (1985); *Complexity: Some General Observations*; Systems Research 2, No. 2; S. 131-140.
- Kolata**, Gina Bari (1977); *Catastrophe Theory: The Emperor Has No Clothes*; Science 196; S. 287, 350/351.
- Koppel**, Moshe (1987); *Complexity, Depth, and Sophistication*; Complex Systems 1; 1087-1091.
- Koppel**, Moshe (1988); *Structure*; In: Herken (1988).
- Koppel**, Moshe / Atlan, Henri (1991); *Les gènes: programme ou données? Le rôle de la signification dans les mesures de complexité*; In: Fogelman Soulié (1991).

- Kornwachs**, Klaus / Von Lucadou, Walther (1975); *Beitrag zum Begriff der Komplexität*; Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft 16; S. 51-60.
- Kornwachs**, Klaus (ed.) (1984); *Offenheit – Zeitlichkeit – Komplexität. Zur Theorie der Offenen Systeme*; Campus Verlag; Frankfurt, New York.
- Kornwachs**, Klaus / Von Lucadou, Walther (1984); *Komplexe Systeme*; In: Kornwachs (1984).
- Krohn**, Wolfgang / Krug, Hans-Jürgen, Küppers, Günter (eds.) (1992a); *Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Band 3*; Duncker & Humblot; Berlin.
- Krohn**, Wolfgang / Küppers, Günter (eds.) (1992b); *Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*; Suhrkamp; Frankfurt am Main.
- Küppers**, Bernd-Olaf (1991a); *Ordnung aus dem Chaos. Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution des Lebens*; Piper; München, Zürich.
- Küppers**, Bernd-Olaf (1991b); *Die Komplexität des Lebendigen. Möglichkeiten und Grenzen objektiver Erkenntnis in der Biologie*; In: Küppers (1991a).
- Küppers**, Bernd-Olaf (1992); *Understanding Complexity*; In: Beckermann et al. (1992).
- Küppers**, Günter / Krohn, Wolfgang (1992); *Selbstorganisation. Zum Stand einer Theorie in den Wissenschaften*; In: Krohn et al. (1992b).
- Kuhn**, Thomas S. (1962/1976); *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*; Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft; Frankfurt am Main; Original: *The Structure of Scientific Revolutions* (1962).
- Kummer**, Christian (1987); *Evolution als Höherentwicklung des Bewusstseins. Über die intentionalen Voraussetzungen der materiellen Selbstorganisation*; Verlag Karl Alber; Freiburg, München.
- Kyburg Jr.**, Henry E. (1961); *A Modest Proposal concerning Simplicity*; *Philosophical Review* 70; S. 390-395.
- Lambert**, Karel / Brittan, Gordon G. (1987/1991); *Eine Einführung in die Wissenschaftsphilosophie*; Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Landauer**, Rolf (1988); *A simple measure of complexity*; *Nature* 336, November; S. 306-307.
- Langton**, Christopher G. (1986); *Studying Artificial Life with Cellular Automata*; *Physica* 22D; S. 120-149.
- Langton**, Christopher G. (1992); *Artificial Life*; In: Nadel et al. (1992).
- Langton**, Christopher G. (ed.) (1994); *Artificial Life III*; Addison-Wesley; Redwood City.
- Lay**, Rupert (1969); *Komplexität und Bewusstsein*; *Acta Teilhardiana* VI; S. 64-68.
- Leeuwenberg**, E. (1973); *Meaning of Perceptual Complexity*; In: Berlyne (1973).
- Levine**, Raphael D. / Tribus, Myron (eds.) (1979); *The Maximum Entropy Formalism*; The MIT Press; Cambridge.
- Levinton**, Jeffrey S. (1993); *Die explosive Entfaltung der Tierwelt im Kambrium*; *Spektrum der Wissenschaft* 1/1993.
- Lévy-Leblond**, Jean-Marc (1991); *La physique, une science sans complexe?*; In: Fogelman Soulié (1991).
- Lewin**, Roger (1992/1993); *Die Komplexitätstheorie. Wissenschaft nach der Chaosforschung*; Hoffmann und Campe; Hamburg; Original: *Complexity, Life at the Edge of Chaos* (1992).
- Lewins**, Richard (1973); *The Limits of Complexity*; In: Pattee (1973a).
- Lewins**, Richard (1977); *Qualitative Analysis of Complex Systems*; In: Matthews (1977).
- Liegner**, Christoph M. / Del Re, Giuseppe (1987); *The Relation of Chemistry to other Fields of Science: Atomism, Reductionism, and Inversion of Reductionism*; *Epistemologia* X; S. 269-284.
- Lindgren**, Kristian / Nordahl, Mats G. (1988); *Complexity Measures and Cellular Automata*; *Complex Systems* 2; S. 409-440.
- Livi**, R. / Ruffo, S. / Ciliberto, S. / Buiatti, M. (eds.) (1987); *Chaos and Complexity*; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; Singapore.
- Lloyd**, Seth / Pagels, Heinz (1988); *Complexity as Thermodynamic Depth*; *Annals of Physics* 188; S. 186-213.
- Lloyd**, Seth (1990); *Physical Measures of Complexity*; In: Jen (1990).
- Lloyd**, Seth (1995); *Quanten-Computer*; *Spektrum der Wissenschaft*, Dezember 12/1995; S. 62-68.
- Löfgren**, Lars (1977); *Complexity of Descriptions of Systems: A Foundational Study*; *International Journal of General Systems* 3; S. 197-214.
- Lübbe**, Weyma (ed.) (1994); *Kausalität und Zurechnung. Über Verantwortung in komplexen kulturellen Prozessen*; Walter de Gruyter; Berlin, New York.
- Luhmann**, Niklas (1986/1990); *Ökologische Kommunikation. Kann die moderne Gesellschaft sich auf ökologische Gefährdungen einstellen?*; Westdeutscher Verlag; Opladen.
- Maddox**, John (1990); *Complicated measures of complexity*; *Nature* 344, April; S. 705.
- Mainzer**, Klaus (1992); *Chaos, Selbstorganisation und Symmetrie. Bemerkungen zu drei aktuellen Forschungsprogrammen*; In: Krohn et al. (1992a).

- Mainzer**, Klaus (1994); *Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*; Springer-Verlag; Berlin.
- Mandelbrot**, Benoît B. (1982a); *The Fractal Geometry of Nature*; Freeman; San Francisco.
- Mandelbrot**, Benoît B. (1982b); *The Many Faces of Scaling: Fractals, Geometry of Nature, and Economics*; In: Schieve et al. (1982).
- Marques**, Ivan (1975); *On Degrees of Unsolvability and Complexity Properties*; The Journal of Symbolic Logic 40, No. 4; S. 529-540.
- Maruyama**, Magoroh (1962); *Generating Complex Patterns by means of Simple Rules of Interaction*; Methodos XIV, No. 54; S. 17-25.
- Matthews**, David E. (ed.) (1977); *Mathematics and the Life Sciences*; Lecture Notes in Biomathematics; Springer Verlag; Berlin.
- May**, Robert M. (1972); *Will a Large Complex System be Stable?*; Nature 238, August; 413-414.
- May**, Robert M. (1973); *Stability and Complexity in Model Ecosystems*; Princeton University Press, Princeton.
- May**, Robert M. / Oster, George F. (1976); *Bifurcations and Dynamic Complexity in Simple Ecological Models*; The American Naturalist 110, No. 974; S. 573-599.
- Mayr**, Ernst (1979); *Teleologisch und teleonomisch. Evolution und die Vielfalt des Lebens*; Heidelberg, Berlin.
- McCoy**, J. Wynne (1977); *Complexity in Organic Evolution*; Journal of Theoretical Biology 68; S. 457-458.
- McIntyre**, Lee C. (1993); *Complexity and Social Scientific Laws*; Synthese 97; S. 209-227.
- McShea**, Daniel, W. (1991); *Complexity and Evolution: What Everybody Knows*; Biology and Philosophy 6; S. 303-324.
- Meier**, Heinrich (ed.) (1988); *Die Herausforderung der Evolutionsbiologie*; R. Piper GmbH & Co, KG; München.
- Meyer**, Jean-Arcady (1988); *Complexity in Ecological Systems*; In: Peliti et al. 1988.
- Meyer**, Jean-Arcady (1991); *Sur la complexité des systèmes écologiques*; In: Fogelman Soulié (1991).
- Mittelstrass**, Jürgen (1984); *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*; BI Wissenschaftsverlag.
- Mittenthal**, Jay E. (1989); *Physical Aspects of the Organization of Development*; In: Stein (1989).
- Morin**, Edgar (1991); *De la complexité, complexus*; In: Fogelman Soulié (1991).
- Mukerjee**, Madhusree (1996); *Duale Strings – Elemente einer allumfassenden Theorie?*; Spektrum der Wissenschaft 3/1996; S. 42-48.
- Musmann**, Frank (1995); *Komplexe Natur, komplexe Wissenschaft. Selbstorganisation, Chaos, Komplexität und der Durchbruch des Systemdenkens in den Naturwissenschaften*; Leske + Budrich; Opladen.
- Nadal**, Jean-Pierre (1988); *Neural Networks that Learn Temporal Sequences*; In: Peliti et al. (1988).
- Nadel**, Lynn / Stein, Daniel L. (eds.) (1991); *1990 Lectures in Complex Systems*; Addison-Wesley, Redwood City.
- Nadel**, Lynn / Stein, Daniel L. (eds.) (1992); *1991 Lectures in Complex Systems*; Addison-Wesley, Redwood City.
- Nadel**, Lynn / Stein, Daniel L. (eds.) (1993); *1992 Lectures in Complex Systems*; Addison-Wesley, Redwood City.
- Nagel**, Ernest / Newman, James R. (1958/1992); *Der Gödelsche Beweis*; Scientia Nova; Oldenbourg; Original: Gödel's proof (1958).
- Nagel**, Ernest (1961/1979); *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*; Routledge & Kegan Paul; London, Henley.
- Nicolis**, Grégoire / Ilya Prigogine (1987/1989); *Exploring Complexity. An Introduction*; W.H. Freeman and Company; New York. Original: Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften (1987).
- Niedersen**, Uwe (ed.) (1990); *Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Band 1*; Duncker & Humblot; Berlin.
- Niedersen**, Uwe / Pohlmann, Ludwig (1990); *Komplexität, Singularität und Determination. Die Koordination der Heterogenität*; In: Niedersen (1990).
- Niedersen**, Uwe / Pohlmann, Ludwig (1991); *Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur- Sozial- und Beisteswissenschaften. Band 2: Der Mensch in Ordnung und Chaos*; Duncker & Humblot; Berlin.
- Nusser**, Karl-Heinz (1978); *System- und Handlungstheorie bei Luhmann. Bemerkungen zu ihrem Zusammenhang*; Zeitschrift für philosophische Forschung 32; 539-555.
- Oppenheim**, P. / Putnam, H. (1958); *The Unity of Science as a Working Hypothesis*; In: Feigl et al. (1958).
- Oreskes**, Naomi / Shrader-Frechette, Kristin / Belitz, Kenneth (1994); *Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences*; Science 263, February; S. 641-646.
- Packard**, Norman (1988); *Adaption towards the Edge of Chaos*; Technical Reports 88-5; Center of Complex Systems Research, University of Illinois; Urbana.
- Packel**, Edward W. / Traub, J.F. (1987); *Information-based complexity*; Nature 328, July; S. 29-33.

- Pagels**, Heinz (1988); *The Dreams of Reason. The Computer and the Rise of the Science of Complexity*; Simon and Schuster; New York.
- Pap**, Arthur (1952); *The Concept of Absolute Emergence*; British Journal for the Philosophy of Science 2; S. 302-311.
- Papentin**, Frank (1980); *On Order and Complexity. I. General Considerations*; Journal of theoretical Biology 87; S. 421-456.
- Papentin**, Frank (1982); *On Order and Complexity. II. Application to Chemical and Biochemical Structures*; Journal of theoretical Biology 95; S. 225-245.
- Parisi**, Giorgio (1987); *Facing Complexity*; Physica Scripta 35; S. 123-124.
- Parisi**, Giorgio (1988); *On Complexity*; In: Peliti et al. (1988).
- Paslack**, Rainer (1991); *Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas*; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Braunschweig, Wiesbaden.
- Patarnello**, Stefano / Carnevali, Paolo (1988); *Boolean Networks which Learn to Compute*; In: Peliti et al. (1988).
- Pattee**, Howard H. (ed.) (1973a); *Hierarchy Theory. The Challenge of Complex Systems*; George Braziller, New York.
- Pattee**, Howard H. (1973b); *The Physical Basis and Origin of Hierarchical Control*; In Pattee (1973a).
- Pattee**, Howard H. (1977); *Dynamic and Linguistic Modes of Complex Systems*; International Journal of General Systems 3; S. 259-266.
- Paul**, Wolfgang J. (1978); *Die Komplexitätstheorie*; B.G. Teubner; Stuttgart.
- Peak**, David / Frame, Michael (1994/1995); *Komplexität. Das gezähmte Chaos*; Birkhäuser Verlag; Basel; Original: Chaos under Control. The Art and Science of Complexity (1994).
- Peliti**, Luca (1987); *Statistical Mechanical Models of the Emergence of Biological Order*; In: Livi et al. (1987).
- Peliti**, Luca / Vulpiani, A. (eds.) (1988); *Measures of Complexity*; Lecture Notes in Physics; Springer-Verlag, Berlin.
- Pines**, David (ed.) (1988); *Emerging Syntheses in Science*; Addison-Wesley; Redwood City.
- Pippenger**, Nicholas (1978); *Complexity Theory*; Scientific American 238/6; S. 90-100.
- Polanyi**, Michael (1968); *Life's Irreducible Structure*; Science 160; S. 1308-1312.
- Popper**, Karl (1934/1989); *Logik der Forschung*; J.C.B. Mohr; Tübingen.
- Prigogine**, Ilya (1979/1988); *Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*; R. Piper & Co. Verlag; München; Original: From Being to Becoming – Time and Complexity in Physical Sciences (1979).
- Prigogine**, Ilya / Allen, P.M. (1982); *The Challenge of Complexity*; In: Schieve et al. (1982).
- Prigogine**, Ilya / Stengers Isabelle (1990); *Entwicklung und Irreversibilität*; In: Niedersen (1990).
- Procaccia**, Itamar (1988); *Complex or just complicated?*; Nature 333, June; S. 498-499.
- Quine**, Willard van Orman (1964); *On Simple Theories of a Complex World*; In: Gregg et al. (1964).
- Reed**, Michael / Harvey, David L. (1992); *The New Sciences and the Old: Complexity and Realism in the Social Sciences*; Journal for the Theory of Social Behaviour 22/4; S. 351-380.
- Richardson**, I.W. / Louie, A.H. / Swaminathan, S. (1982); *A Phenomenological Calculus for Complex Systems*; Journal of theoretical Biology 94; S. 61-76.
- Riedl**, Rupert (1975); *Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution*; Verlag Paul Parey; Hamburg, Berlin.
- Rissanen**, Jorma (1986a); *Complexity of Strings in the Class of Markov Sources*; IEEE Transactions on Information Theory IT-32, No. 4; S. 526-532.
- Rissanen**, Jorma (1986b); *Stochastic Complexity and Modelling*; The Annals of Statistics 14, No. 3; S. 1080-1100.
- Rissanen**, Jorma (1990); *Complexity of Models*; In: Zurek (1990a).
- Ritter**, Joachim / Gründer, Karlfried (Hg.) (div. Jahrgänge); *Historisches Wörterbuch der Philosophie*; Schwalbe + Co. Verlag; Basel, Stuttgart.
- Rosen**, Robert (1977); *Complexity as a System Property*; International Journal of General Systems 3; S. 227-232.
- Rosen**, Robert (1978); *Fundamentals of Measurement and Representation of Natural Systems*; Elsevier North-Holland Inc.; New York.
- Rosen**, Robert (1985a); *Theoretical Biology and Complexity. Three Essays on the Natural Philosophy of Complex Systems*; Academic Press Inc.; Orlando.
- Rosen**, Robert (1985b); *Organisms as Causal Systems Which Are Not Mechanisms: an Essay into the Nature of Complexity*; In: Rosen (1985a).
- Rosen**, Robert (1986a); *On Information and Complexity*; In: Casti et al. (1986).
- Rosen**, Robert (1986b); *The Physics of Complexity*; In: Trappl (1986).

- Rosen**, Robert (1987); *On complex systems*; European Journal of Operational Research 30; S. 129-134.
- Roth**, Gerhard / Schwegler, Helmut (1990); *Self-Organization, Emergent Properties and the Unity of the World*; Philosophica 46; S. 45-64.
- Ruelle**, David (1988); *Can Nonlinear Dynamics Help Economists?*; In: Anderson et al. (1988).
- Ruelle**, David (1991/1994); *Zufall und Chaos*; Springer-Verlag; Berlin; Original: Chance and Chaos (1991).
- Sabisch**, Helmut / Teichmann, Dieter (1987); *Komplexität, Differenziertheit und Integration – bestimmende Aspekte der Bewertung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts im Sozialismus*; Deutsche Zeitschrift für Philosophie 35/6; S. 481-491.
- Sahal**, Devendra (1976); *Elements of an Emerging Theory of Complexity Per Se*; Cybernetica 19; S. 5-38.
- Sandkühler**, Hans Jürg (ed.) (1990); *Europäische Enzyklopädie zu Philosophie und Wissenschaften*; Felix Meiner Verlag; Hamburg.
- Saunders**, P.T. / Ho, M.W. (1976); *On the Increase in Complexity in Evolution*; Journal of theoretical Biology 63; S. 375-384.
- Saunders**, P.T. / Ho, M.W. (1977); *In Defense of Complexity*; Journal of theoretical Biology 68; S. 235-237.
- Saunders**, P.T. / Ho, M.W. (1981); *On the Increase in Complexity in Evolution II. The Relativity of Complexity and the Principle of Minimum Increase*; Journal of theoretical Biology 90; S. 515-530.
- Schieve**, William C. / Allen, Peter M. (eds.) (1982); *Self-Organization and Dissipative Structures. Applications in the Physical and Social Sciences*; University of Texas Press; Austin.
- Schlosser**, Gerhard (1993); *Einheit der Welt und Einheitswissenschaft. Grundlegung einer allgemeinen Systemtheorie*; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Braunschweig, Wiesbaden.
- Schöning**, Uwe (1995); *Theoretische Informatik – kurzgefasst*; Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg.
- Schurz**, Gerhard / Dorn, Georg J.W. (Eds.) (1991); *Advances in Scientific Philosophy*; Editions Rodopi B.V.; Amsterdam – Atlanta GA.
- Schuster**, Heinz Georg (1989); *Deterministic Chaos. An Introduction*; VCH Verlagsgesellschaft; Weinheim.
- Schuster**, Peter (1991a); *Molekulare Evolution und Ursprung des Lebens*; In: Küppers B. (1991a).
- Schuster**, Peter (1991b); *Katastrophen, Chaos und Fraktale. Modeströmungen in den Wissenschaften oder Beginn eines Verstehens komplexer Systeme?*; In: Niedersen et al. (1991).
- Schwegler**, Helmut (1992); *Systemtheorie als Weg zur Vereinheitlichung der Wissenschaften?*; In: Krohn et al. (1992b).
- Scriven**, Michael / Feigl, Herbert (eds.) (1956); *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*; University of Minnesota Press; Minneapolis.
- Scriven**, Michael (1956); *A Possible Distinction between Traditional Scientific Disciplines and the Study of Human Behaviour*; In: Scriven et al. (1956).
- Scuricini**, Giovan B. (1988); *Complexity in Large Technological Systems*; In: Peliti et al. (1988).
- Seidman**, Stephen B. (1991); *The Mathematics of Complex Computational Systems*; In: Johnson et al. (1991).
- Serra**, Roberto / Andretta, Massimo / Compiani, Mario / Zanarini, Gianni (1986); *Introduction to the Physics of Complex Systems. The mesoscopic approach to fluctuations, non linearity and self-organization*; Pergamon Press; Oxford.
- Serra**, Roberto / Zanarini, Gianni (1990); *Complex Systems and Cognitive Processes*; Springer-Verlag; Berlin.
- Shannon**, Claude E. / Weaver, Warren (1949); *The Mathematical Theory of Communication*; University of Illinois Press; Urbana.
- Shannon**, Claude E. / McCarthy, J. (eds.) (1956); *Automata Studies*; Princeton University Press; Princeton.
- Shanon**, Benny (1991); *Réflexions sur la complexité de la cognition humaine*; In: Fogelman Soulié (1991).
- Sherrington**, David (1990); *Complexity Due to Disorder and Frustration*; In: Jen (1990).
- Shiner**, J.S. (1995); *Self-organization and Order in Growing Systems*; Abstract aus: Conference Proceedings „International Twin-Conference on Complexity and Self-Organization“; Berlin.
- Sickel**, Sharon (1977); *Variable Range Restrictions in Resolution Theorem Proving*; In: Elcock et al. (1977).
- Simon**, Herbert A. (1962); *The Architecture of Complexity*; Proceedings of the American Philosophical Society 106, No. 6; S. 467-482.
- Simon**, Herbert A. (1973); *The Organization of Complex Systems*; In: Pattee (1973a).
- Simon**, Herbert A. (1969/1990); *Die Wissenschaft des Künstlichen*; Kammerer & Unverzagt; Berlin; Original: The Science of the Artificial (1969).
- Spektrum** der Wissenschaft (1989); *Chaos und Fraktale*; Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg.
- Springer**, Michael (1996); *Reis-Lawinen – sortenweise selbstorganisiert*; Spektrum der Wissenschaft April 4/1996; S. 14/15.

- Stegmüller**, Wolfgang (1987); *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie*, Band III; Alfred Kröner Verlag; Stuttgart.
- Stegmüller**, Wolfgang (1989); *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie*, Band I; Alfred Kröner Verlag; Stuttgart.
- Stein**, Daniel L. (ed.) (1989a); *Lectures in the Science of Complexity*; Addison-Wesley; Redwood City.
- Stein**, Daniel L. (1989b); *Spingläser*; In: Spektrum (1989).
- Stephan**, Achim / Beckermann, Ansgar (1994); *Emergenz*; Information Philosophie 3/1994; S. 46-51.
- Stockmeyer**, Larry (1987); *Classifying the Computational Complexity of Problems*; The Journal of Symbolic Logic 52, No. 1; S. 1-43.
- Stöckler**, Manfred (1990); *Emergenz. Bausteine für eine Begriffsexplikation*; Conceptus XXIV; S. 7-24.
- Stöckler**, Manfred (1991); *Reductionism and the New Theories of Self-Organization*; In: Schurz et al. (1991).
- Stöhr**, Hans-Jürgen (1989); *Komplexität und System – die Frage nach ihrer Beziehung zur Entwicklung*; Deutsche Zeitschrift für Philosophie 37; S.534-536.
- Thom**, René (1972/1989); *Structural Stability and Morphogenesis: An Outline of a General Theory of Models*; Addison-Wesley; Redwood City. Original: *Stabilité structurelle et morphogénèse* (1972).
- Thompson**, R. Paul (1982); *Explaining Complexity in Evolution*; Dialogue XXI, S. 255-259.
- Trappl**, Robert (ed.) (1986); *Power, Autonomy, Utopia. New Approaches toward Complex Systems*; Plenum Press, New York, London.
- Traub**, J.F. / Wozniakowski, H. (1991); *Theory and Applications of Information-Based Complexity*; In: Nadel et al. (1991).
- Tribus**, Myron (1979); *Thirty Years of Information Theory*; In: Levine et al. (1979).
- Turney**, Peter (1989); *The Architecture of Complexity: A New Blueprint*; Synthese 79; S. 515-542.
- Ulrich**, Werner (1987); *The Metaphysics of Social System Design*; In: Van Gigch (1987a).
- Van Emden**, M.H. (1971); *An Analysis of Complexity*; Mathematical Centre Tracts, Amsterdam.
- Van Gigch**, John P. (ed.) (1987a); *Decision Making about Decision Making: Metamodels and Metasystems*; Abacus Press, Cambridge.
- Van Gigch**, John P. (1987b); *Methodological Comparisons of the Science, Systems and Metasystem Paradigms*; In Van Gigch (1987a).
- Vemuri**, V. (1978); *Modeling Complex Systems. An Introduction*; Academic Press, New York.
- Vichniac**, Gérard Y. (1987); *Cellular Automata and Complex Systems*; In: Peliti et al. (1987).
- Von Ditfurth**, Hoimar / Fischer, Ernst Peter (eds.) (1990); *Mannheimer Forum 89/90. ein Panorama der Naturwissenschaften*; R. Piper GmbH & Co. KG; München.
- Von Hayek**, F.A. (1961/1972); *Die Theorie komplexer Phänomene*, J.C.B. Mohr, Tübingen; Original: *The Theory of Complex Phenomena* (1961).
- Von Kutschera**, Franz (1981); *Grundfragen der Erkenntnistheorie*; Walter de Gruyter; Berlin, New York.
- Von Neumann**, John (1956); *Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components*; In: Shannon et al. (1956).
- Von Neumann**, John (1966); *The Theory of Self-Reproducing Automata*; Edited and completed by Arthur W. Burks; University of Illinois Press; Urbana, London.
- Waddington**, C.H. (ed.) (1969a); *Towards a Theoretical Biology, Volume 2*; Adline Publishing Company; Chicago.
- Waddington**, C.H. (1969b); *Paradigm for an Evolutionary Process*; In: Waddington (1969a).
- Waldrop**, M. Mitchell (1992); *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*; Touchstone, New York.
- Weaver**, Warren (1948); *Science and Complexity*; American Scientist 36; S. 536-544.
- Weisbuch**, Gérard (1988); *Complex systems, organization and networks of automata*; In: Peliti et al. (1988).
- West**, Bruce J. /Salk, Jonas (1987); *Complexity, organization and uncertainty*; European Journal of Operational Research 30; S. 117-128.
- Wicken**, Jeffrey S. (1979); *The Generation of Complexity in Evolution: A Thermodynamic and Information-Theoretical Discussion*; Journal of theoretical Biology 77; S. 349-365.
- Wiener**, Norbert (1948); *Cybernetics – or Control and Communication in the Animal and the Machine*; Paris, New York.
- Wolfram**, Stephen (1984a); *Universality and Complexity in Cellular Automata*; Physica 10D; S. 1-35.
- Wolfram**, Stephen (1984b); *Cellular Automata as models of complexity*; Nature 311; S. 419-424.
- Wolfram**, Stephen (1988); *Complex Systems Theory*; In: Pines (1988).
- Wolschin**, Georg (1989); *Wege zum Chaos*; In: Spektrum (1989).
- Yagil**, Gad (1985); *On the Structural Complexity of Simple Biosystems*; Journal of theoretical Biology 112; S. 1-23.

- Yagil**, Gad (1993); *On the Structural Complexity of Designed Systems*; In: Nadel et al. (1993).
- Yates**, F. Eugene (1978); *Complexity and the limits to knowledge*; American Journal of Physiology 4; S. R201-R204.
- Yildirim**, Cemal (1970); *Towards an Understanding of Science*; Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie 1; S. 104-118.
- Yorke**, James / Li, Tien-Yien (1975); *Period Three Implies Chaos*; American Mathematical Monthly 82; S. 985-992.
- Zurek**, Wojciech H. (ed.) (1990a); *Complexity, Entropy and the Physics of Information*; Addison-Wesley; Redwood City.
- Zurek**, Wojciech H. (1990b); *Algorithmic Information Content, Church-Turing Thesis, Physical Entropy, and Maxwell's Demon*; In: Zurek (1990a).
- Zvonkin**, A.K. / Levin, L.A. (1970); *The Complexity of Finite Objects and the Development of the Concepts of Information and Randomness by Means of the Theory of Algorithms*; Russian Mathematical Surveys 25; S. 83-124.