



Prof. Dr. Werner Ebeling (HU Berlin)

Komplexe Strukturen: Entropie und Information

Für Bürger von Heute und Morgen: **20**
Elemente eines zukunftstauglichen Welt- und Menschenbildes

Vortrag vom 30.4.04, zusammengefasst und ergänzt von Bertram Köhler und Hans-Volker Pürschel

Was sind komplexe Strukturen?

Komplexe Strukturen liegen zwischen den Extremen der maximal geordneten, periodischen und der maximal ungeordneten, unkorrelierten Strukturen. Sie sind charakterisiert durch eine Vielzahl von Elementen, zwischen denen zahlreiche, hierarchisch organisierte Verbindungen und Wechselwirkungen bestehen. Komplexe Strukturen entstanden und entstehen im Ergebnis der Evolution, einer Kette von aufeinanderfolgenden Selbstorganisationsprozessen, die aus dem unstrukturierten Anfangszustand der Welt, dem Chaos, historisch zur komplexen Ordnung des Kosmos führten.

Historisches zum Prinzip der Selbstorganisation

Historisch wurde der Begriff der Selbstorganisation zum ersten Male in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts von Schelling im Zusammenhang mit der Entwicklung seiner Naturphilosophie verwendet. In der Entwicklung der Naturwissenschaften spielte er aber bis Mitte des 20. Jahrhunderts keine Rolle. Vielmehr dominierte seit der Einführung des Entropiebegriffes in die Wärmelehre durch Rudolf Clausius um 1850 die Vorstellung einer ständigen allgemeinen Zunahme von Chaos und Unordnung in der Welt, die sich nach dem II. Hauptsatz der Thermodynamik in einer ständigen Zunahme der Entropie repräsentiert. Selbstorganisation aber ist ein Prozess der Strukturbildung, der dieser vorherrschenden Tendenz zur Vermehrung der Unordnung entgegengerichtet ist. Sie wurde deshalb als dem II. Hauptsatz angeblich widersprechend abgelehnt. Vor allem durch die grundlegenden Arbeiten von Prigogine zur Thermodynamik irreversibler Prozesse wurde erst in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts die Bedeutung der Selbstorganisation für alle Evolutionsprozesse erkannt. Demnach besteht das grundlegende Prinzip der Selbstorganisation eines beliebigen Systems in der Zufuhr von vorhandener freier Energie und dem Export der bei der Strukturbildung entstehenden Entropie, also dem Export von Unordnung. Somit ist die Zufuhr von Strahlungsenergie der Sonne hoher Temperatur (10^{17} W bei 5800 K) und der Entropieexport in den kalten Weltraum die thermodynamische Voraussetzung für die Möglichkeit der Entstehung des Lebens auf der Erde durch Selbstorganisation.

Komplexe Netzwerke

Komplexe Netzwerke sind die Abstraktionen realer komplexer Systeme. Die Knoten des Netzes sind die Elemente des Systems und die Verbindungslinien oder Kanten des Netzes beschreiben die Wechselwirkungen der Elemente. Komplexe Netzwerke spiegeln die statistischen Eigenschaften der abstrahierten realen, durch Selbstorganisation entstandenen Systeme wider. In einem komplexen Netzwerk fällt die Häufigkeit der Knoten mit wachsender Anzahl der jeweils in sie einlaufenden Verbindungen nach einem Potenzgesetz ab. Der statistisch bestimmbare Exponent ist unabhängig von der Größe des betrachteten Netzes oder Netzausschnittes typisch für die Art des jeweiligen Netzes: Telefonnetz -3 ; Internet $-2,5$; Website-Verlinkung $-2,3$. Die Skalenunabhängigkeit der Exponenten ist eine fraktale Eigenschaft dieser Netze.

Was ist Leben?

Ein lebendes System ist ein komplexes System, das durch Selbstorganisation in natürlicher Evolution entstanden ist. Letztere ist eine unbegrenzte Folge von Prozessen der Selbstorganisation, die zum Aufbau qualitativ neuartiger, komplexerer Strukturen und Systeme führt. Darüber hinaus müssen aber noch weitere Kriterien erfüllt sein, damit ein komplexes System

als lebendig bezeichnet werden kann.

- Das System muss in der Lage sein, sich selbst zu reproduzieren.
- Es muss mit der Umgebung Informationen austauschen und verarbeiten können.
- Das System muss relativ abgeschlossen sein und individuelle Eigenschaften besitzen.

Komplexität und Entropie einer Information

Information ist keine physikalische Größe, sondern eine binäre Relation zwischen Sender und Empfänger, durch die eine beim Empfänger vorhandene Unbestimmtheit beseitigt wird. Ein Maß für diese Unbestimmtheit ist die Shannon-Informationsentropie. Die Quelle sendet aufgrund der ihr möglichen Zustände eine Folge von Symbolen (Buchstaben), aus welcher der Empfänger bestimmte Eigenschaften der Quelle erkennen kann. Die Struktur der von einer Quelle gelieferten Symbolsequenzen charakterisiert also bestimmte Eigenschaften der Quelle, insbesondere deren Komplexität. Die Shannon-Informationsentropie einer Symbolsequenz der Länge n bestimmt sich aus der Anzahl ihrer unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten. Sie gibt bei geeigneter Normierung die maximal in dieser Sequenz speicherbare Informationsmenge an (\sim Informationskapazität).

Besteht die Information z.B. aus nur einem beliebigen Buchstaben i von λ möglichen Buchstaben, so beträgt die Unbestimmtheit H

$$H = -\sum p(i) \cdot \ln(p(i)) / \ln(\lambda),$$

wenn $p(i)$ die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen des Buchstaben i ist. Bei einer Quelle, die alle Buchstaben gleichwahrscheinlich sendet, gilt

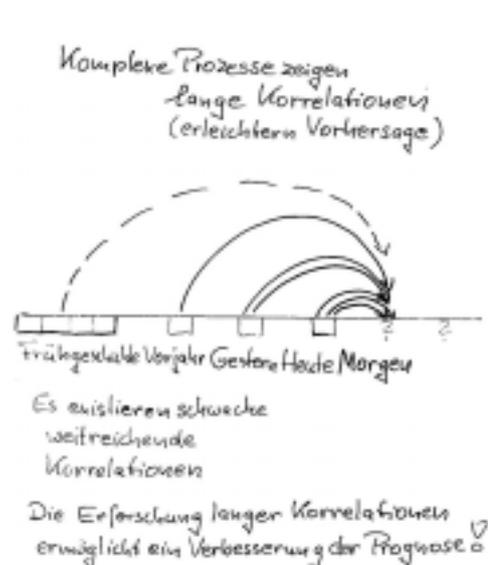
$$p(i) = 1/\lambda.$$

und die Unbestimmtheit ist mit

$$H = 1$$

maximal, d.h. der Empfänger weiß nicht welcher Buchstabe kommen wird. Ist die Information angekommen, dann ist für einen Buchstaben $p=1$, für alle anderen Null, und $H = 0$, d.h. die Unbestimmtheit ist beseitigt. Besitzt der Empfänger ein Vorwissen, z.B. dass der Buchstabe e häufiger ist als die übrigen, so ist die übertragene Information geringer, weil die anfängliche Unbestimmtheit $H < 1$ war.

Beispiel: Bei $\lambda=4$ Symbolen mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten des Auftretens (z.B. $p(1)=0,5$; $p(2)=0,25$; $p(3)=p(4)=0,125$) ergibt sich eine Informationsentropie pro Symbol von $H=0,875$. Der durchschnittliche Informationsgehalt pro Buchstabe ist dann also geringer als bei gleichwahrscheinlichen Buchstaben, weil ein Teil der übermittelten Information in Form einer Erwartung des Empfängers bereits bekannt ist.



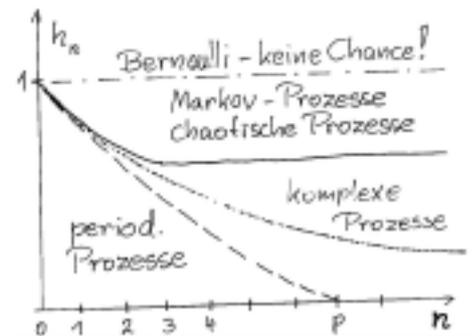
Besteht eine Information aus einer Folge von Symbolen, die aus dem Ablauf eines komplexen Prozesses entstanden ist, so kann die Wahrscheinlichkeit $p(i)$ für das Auftreten eines bestimmten Symbolen i von der Folge der vorangegangenen Symbole abhängen. Die daraus resultierende bedingte Entropie h gibt die Unsicherheit der Voraussage des nächsten Symbols an. Diese bedingte Entropie h kann als ein quantitatives Maß für die Komplexität des erzeugenden Prozesses dienen. Je länger der zu analysierende Prozess beobachtet wurde, desto geringer wird die Unsicherheit h in der Voraussage des nächsten Symbolen. **(Abb.1)**

Beispiel: Weiss der Empfänger zunächst nicht, dass der Buchstabe e häufiger ist als die übrigen, so ist die Unsicherheit zunächst 1 und nimmt nach längerer Beobachtung ab.

Der Verlauf der bedingten Entropien $h(n)$ mit wachsender Anzahl empfangener Symbole n ist charakteristisch für die Art des beobachteten Prozesses. **(Abb.2)**. Der asymptotisch für große n erreichte Wert von h charakterisiert die Informationsentropie der Quelle H .

- **Bernoulli-Prozesse** sind vollkommen zufällig, es gibt keinerlei Korrelationen zwischen den Symbolen der Folge, die bedingte Entropie h ist und bleibt 1, unabhängig von der Länge der Beobachtung n .
- Bei **Markov-Prozessen** und **chaotischen Prozessen** gibt es nur kurzreichweitige Korrelationen. Die Unsicherheit (Entropie) vermindert sich nur anfänglich und bleibt bei längerer Beobachtung nahe bei 1.
- Komplexe Prozesse besitzen langreichweitige Korrelationen, ihre bedingte Entropie sinkt beständig mit zunehmender Länge der Beobachtung, ohne aber Null zu erreichen.
- Bei **periodischen Prozessen** sinkt die Entropie nach hinreichend langer Beobachtung auf Null, sie sind dann vollständig vorhersagbar.

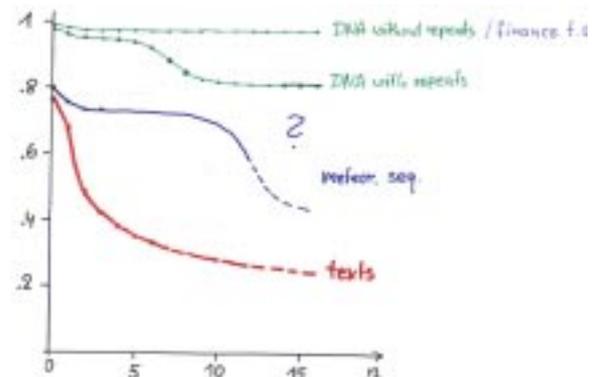
Unsicherheit fällt mit der Länge der vorausgehenden Beobachtung n
Es gibt verschiedene Arten von Prozessen!



Analyse natürlicher Sequenzen

Mit den dargestellten Methoden der Entropieanalyse untersuchte Ebeling verschiedene Symbolsequenzen, die durch Prozesse der biologischen oder kulturellen Evolution entstanden sind (**Abb.3**).

Dabei stellte sich heraus, dass **DNA-Sequenzen** i.A. eine große Entropie und keine langreichweitigen Korrelationen besitzen, es treten aber gehäuft Wiederholungen bestimmter Nukleotidsequenzen auf, die den Entropieparameter der Sequenzen deutlich herabsetzen. (h bleibt in der Nähe von 1, die Anordnung der Nukleotidsequenzen ist unkorreliert, aber Wiederholungen sind deutlich erkennbar).



Meteorologische Sequenzen weisen dagegen langreichweitige Korrelationen auf, die aber noch eine hohe Unsicherheit beinhalten.

Texte weisen eine noch höhere Komplexität auf, was durch langreichweitige Korrelationen und ein langsames Absinken der bedingten Entropie angezeigt wird. (**Abb.3**), während **Musikstücke** ebenfalls langreichweitige Korrelationen, aber einen höheren Anteil von Ordnung und niedrigere Entropie aufweisen. Ordnung und Vorhersagbarkeit nehmen bei der Musik von Beethoven über Mozart zu Bach zu.

Theorie der Ästhetik

Untersuchungen zur Komplexität von Kunstwerken veranlassten Birkhoff zu Aussagen über eine mathematische Theorie der Ästhetik:

Wir empfinden ein Werk als „schön“, wenn es auf der Grenze zwischen Ordnung (Möglichkeit der Vorhersage des folgenden Strukturelements) und Chaos (ständig neue Elemente, keine Vorhersagbarkeit) liegt.

Schlussfolgerungen zur Komplexität und Vorhersagbarkeit von Prozessen

1. Stabil deterministische und periodische Prozesse (Sequenzen) erlauben genaue Vorhersagen und Extrapolationen, sind aber nicht komplex.
2. Instabil deterministische (chaotische) und stochastische Prozesse erlauben nur beschränkte Vorhersagen und Extrapolationen. Ihre Unsicherheit zeigt Sättigung, unabhängig von der Geschichte wird die Vergangenheit total vergessen.
3. Komplexe Prozesse liegen als Grenzfall dazwischen. Sie zeigen historisches Verhalten und beschränkte Voraussagbarkeit. Die Erforschung der Geschichte verbessert die Prognose.

Diskussion

Dr. Pürschel stellte die Frage, ob der Entropiesatz auch für Prozesse in der Gesellschaft anwendbar sei und infolgedessen gesellschaftliche Strukturierungsprozesse notwendig mit der Entstehung gesellschaftlicher Unordnung verbunden sind, die exportiert werden muss. Prof.

Ebeling beantwortete diese Frage nicht eindeutig. Zwar sei der Entropiesatz von genereller Bedeutung, aber eine Übertragung auf gesellschaftliche Prozesse nicht ohne weiteres möglich. So sei der Export von Müll aus Deutschland nach Rumänien sicher keine zulässige Lösung für das Entropieproblem, auch sollte man nicht Müll in den Weltraum schießen. Zweifellos wird in der Wirtschaft Entropie produziert, aber dieser Prozess ist derzeit in keiner volkswirtschaftlichen Theorie richtig eingeordnet. Ebeling meinte, man solle zunächst dafür sorgen, dass der derzeit anfallende Müll so geordnet und dokumentiert abgelegt wird, dass spätere Generationen ohne unnötige Erschwernisse an die Stofftrennung und Wiedergewinnung der Rohstoffe gehen können, wenn durch Beherrschung der Kernfusion die zweifellos dafür erforderlichen großen Energiemengen zur Verfügung stehen werden.

Obwohl Entropie überall eine Rolle spiele, sei ihre Bedeutung sehr kontextabhängig und oft ungeklärt. So sei zum Beispiel die in einem Lichtschalter enthaltene thermodynamische Entropie für dessen Wirkungsweise völlig bedeutungslos, entscheidend ist nur das eine Bit an Informationsentropie, das die Schalterstellung ein oder aus charakterisiert.

In der weiteren Diskussion wurde versucht, die Bedeutung und die Unterschiede von freier und gebundener Information näher zu bestimmen. Geklärt wurde:

- **Gebundene Information** ist Bestandteil einer Struktur und existiert unabhängig davon, ob sie für Lebewesen eine Bedeutung hat oder nicht. Die gebundene Information steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Entropie der Struktur und vermindert diese gegenüber dem thermodynamischen Gleichgewichtszustand, da ein Teil aller möglichen Mikro-Zustände geordnet ist. Bildung von Strukturen bedeutet Herstellung von Ordnung und damit Verminderung der Entropie.
- **Freie Information** ist Bestandteil einer Beziehung zwischen einem Sender und einem Empfänger. Ihr Informationsgehalt ist in Symbolen fixiert und unabhängig vom Träger der Information. Freie Information hat einen Zweck, der nur für Lebewesen von Bedeutung ist. Sie kann aus gebundener Information extrahiert und benutzt werden. Im Zuge der Evolution verwandelt sich gebundene Information in freie Information, die für die Reproduktion der Strukturen genutzt wird. Z.B. sind Gene die Träger von freier Information.

Prof. Ebeling verglich die Rolle der Information mit der Rolle des Geldes:

„Die Rolle der Information erinnert uns in mancher Hinsicht an die Rolle des Geldes in der Gesellschaft. Die Analogien zwischen Information und Geld, dem Informationsträger des Tauscherts, sind nicht nur formal. Gebrauchswerte sind materielle Eigenschaften von Gegenständen oder Waren, die sich selbst darstellen. Tauschwerte dagegen abstrahieren von der konkreten Form der Ware und sind gegen ihren Träger invariant. Geld kann als Münze oder Schein oder Scheck gehandelt werden. Es dient stets einem Zweck, es hat nur einen Sinn, wenn es zwischen zwei Partnern ausgetauscht wird, z.B. wenn man es für eine Ware oder Handlung erhält und letztendlich wieder in eine Ware oder Dienstleistung zurückverwandeln kann.“

Da Prof. Ebeling mehrmals betonte, dass „Information“ nur im Zusammenhang mit Leben existiert und tote natürliche Gegenstände keinerlei Information enthalten, blieb offen, inwieweit eine nicht von Lebewesen geschaffene Struktur überhaupt Information trägt. Demnach wäre gebundene Information lediglich die einem Informationsträger von einem Lebewesen aufgeprägte freie Information. Die über ein Objekt existierende Information entstünde dann erst in dem Moment, in dem ein (lebender) Empfänger die Struktur des Objektes aufklärt. Dies aber steht im Widerspruch zu folgender Aussage in Ebelings Buch „Komplexe Strukturen...“ S. 52: *Gebundene Information liegt grundsätzlich in jedem physikalischen System vor – „sie existiert einfach“. Ein universelles quantitatives Maß für diese Information ist die Entropie des betrachteten Zustandes. Diese Informationsform ist gewissermaßen verhüllt, sie ist keine eigentliche Information im Sinne der klassischen Informationstheorie.*

Damit blieb verschwommen, ob nun die in einer physikalischen Struktur gebundene Information überhaupt Information oder eigentlich keine Information ist und der in Ebelings Buch eingeführte Begriff der strukturellen Information blieb unerwähnt und ungeklärt. Es entstand damit der Eindruck, dass der Begriff der Information in Ebelings Buch anders definiert wurde und damit einen anderen Inhalt hatte als im Vortrag zum Ausdruck gebracht, was bedeuten würde, da sich auch bei Ebeling der Informationsbegriff mit der Zeit wandelte.

Sehr voneinander abweichende Bedeutungen des Begriffes Information werden z. B. auch in der Magisterarbeit von Bernd Porr: „**Die Systemtheorie Niklas Luhmanns aus der Sicht der Naturwissenschaften und ihre Anwendung in der Kommunikationswissenschaft**“ konstatiert. Danach gibt es bei Luhmann keine Informationsübertragung vom Sender zum Empfänger, sondern der Sender sendet eine Mitteilung, die überhaupt erst beim Empfänger je nach der ihr von ihm zugemessenen Bedeutung zu einer Information für ihn wird. Hier hätte also der Begriff Information nur die eingeschränkte Bedeutung, die Ebeling in seinem Buch als „pragmatische Information“ bezeichnet. Das bedeutet letztlich, dass die Luhmannsche Informationstheorie mit der Shannonschen nicht kompatibel ist.

Noch weiter in dieser Richtung geht Anton Zeilinger in seinem Buch „Einsteins Schleier“. Zeilinger behauptet: „Wirklichkeit und Information sind dasselbe“. Dahinter steht seine Auffassung, dass in Wirklichkeit nur das existiert, was der Mensch aufgeklärt hat.

Nach dem Buch „Komplexe Strukturen....“ zusammengestellte Ergänzungen zum Vortrag

Entropie u. potentielle Information

Information bedeutet Verminderung der Unbestimmtheit eines Systemzustandes für einen Beobachter des Systems.

Entropie beschreibt die Unbestimmtheit eines Systems und bedeutet damit die **potentielle Information** des Systems, d.h. die Information, die überhaupt in dem System speicherbar ist (~Informationskapazität).

Im Zuge der Evolution wächst die Gesamtentropie und damit auch die potentielle Information der Welt. Die in einer gegebenen Situation enthaltene Information ist bestimmt durch die Anzahl der Entscheidungen von Ur-Alternativen, die zu dieser gegebenen Situation geführt haben. Mit der Evolution wächst einerseits diese **faktische Information** an, gleichzeitig aber wächst auch die potentielle Information weiter an, die zu späteren Zeiten faktisch werden könnte.

Entropie und Selbstorganisation

Selbstorganisation bezeichnet die spontane Strukturbildung in Systemen, die aus vielen gleichartigen Teilsystemen (Atomen, Zellen, Individuen, ...) bestehen, welche sich in unstrukturiertem Zustand weitgehend regellos, statistisch verhalten - je nach Art ihrer Wechselwirkungen untereinander. Selbstorganisation setzt ein, wenn durch Veränderung der inneren oder äußeren Bedingungen sog. Kontrollparameter kritische Werte überschreiten. Ein bisheriges stationäres Fließgleichgewicht wird dann instabil. Die Teilsysteme ordnen sich ganz individuell nach den auf sie wirkenden Bedingungen zu ganzheitlichen Gruppen, die im Gesamtsystem unterschiedliche Rollen spielen. Die Strukturierung vermindert die Entropie. Sie wird als Unordnung aus dem System exportiert. Es bildet sich ein neuer stationärer Fließgleichgewichtszustand heraus. Beispiele: Wassermoleküle ordnen sich im Temperaturgradienten zu Rollströmungszellen. Menschen mit ziemlich gleichwertigen Anlagen teilen sich in Berufsgruppen.

Gebundene und freie Information: Siehe unter Diskussion.

Evolution der Informationsverarbeitung

Verbunden mit der chemischen, biologischen und sozio-kulturellen Evolution entwickelten sich gleichzeitig und mit ihr verflochten die Informationsverarbeitung in den Makromolekülen der Gene, in den Neuronen der Lebewesen und in Kultur und Wissenschaft der Gesellschaft. Dabei wiederholte sich in allen drei Entwicklungsstufen mehrfach ein Übergang von gebundener zu freier Information, der als Ritualisation bzw. Symbolisierung bezeichnet wird. Der erste derartige Ritualisationsvorgang ist die evolutionäre Erfindung des genetischen Codes, einer Art „chemischer Stenografie“, die neben die direkte physikalisch-chemische Interaktion der Makromoleküle tritt. In der Verhaltensforschung bedeutet Ritualisation die Entstehung von Signalhandlungen aus Gebrauchshandlungen. Der Übergang vom konkreten Gebrauchswert von Waren und Leistungen zu ihrem durch Geld symbolisierten abstrakten Tauschwert kann vermutlich als Ritualisationsübergang im Bereich der kulturellen (memetischen) Evolution gedeutet werden. Ritualisation erscheint demnach als ein evolutionärer Schlüsselmechanismus bei der Entwicklung der Informationsverarbeitung.

Strukturelle und funktionale Information

Strukturelle Information repräsentiert als „Information 1. Art“ die strukturelle Determiniertheit eines Systems und codiert auf materieller Grundlage Sachverhalte. Gebundene Information enthält immer strukturelle Information, aber auch freie Information besitzt eine Struktur und enthält damit ebenfalls strukturelle Information.

Funktionale Information ist eine „Information 2. Art“. Sie aktiviert, interpretiert, deutet die „Information 1. Art“. Sie ist kontextabhängig und repräsentiert die von einem Rezipienten aus struktureller Information herausgelesene und interpretierte Bedeutung der Information. Während strukturelle Information objektiv gegeben ist, existiert funktionale Information nur im Hinblick auf ihre Bedeutung für den Rezipienten und ist deshalb subjektiv.

Funktionale Information, die sich auf gebundene Information bezieht, hat nur Bedeutung im Hinblick auf die Struktur, an die sie gebunden ist. Funktionale Information, die sich auf freie Information bezieht, gewinnt Selbständigkeit und kann als freie Information ebenfalls ausgetauscht werden. Damit können auch die Deutungsmuster für strukturelle Information als funktionale Information ausgetauscht werden.

Pragmatische Information

Wenn strukturelle Information durch die funktionale Informationsverarbeitung des Empfängers richtig interpretiert wird, so bedeutet dies noch nicht, dass diese Information beim Empfänger auch eine Wirkung auslöst. Information, die auf der Grundlage eines bereits vorhandenen Wissens verstanden wird und einen gewissen Anteil neuen Wissens enthält, heißt **pragmatische Information**. Nur diese löst auch eine Wirkung aus. Dabei liegt das Maximum der pragmatischen Information zwischen erstmaliger Neuheit und wiederholender Bestätigung. Beide Anteile sind notwendig, wenn eine Wirkung erzielt werden soll. Lebende Systeme operieren in der Nähe dieses Maximums. Diesem Sachverhalt entspricht auch der strukturelle Aufbau natürlicher Sequenzen, die weder zufällig-chaotisch noch rein periodisch sind, sondern langreichweitige Korrelationen aufweisen. Dies bedeutet, dass die pragmatische Information an ihrer Komplexität gemessen werden muss. Nicht voll erfasst werden kann durch dieses Komplexitätsmaß der pragmatischen Information die Komponente der Emergenz, die bei Evolutionsprozessen aber immer eine gewisse Rolle spielt und die aus einer Synthese der empfangenen Information mit dem Vorwissen des Empfängers entspringt.

Pragmatische Information beeinflusst unmittelbar die Fitness eines Lebewesens, wie folgendes Beispiel verdeutlichen soll: Ein Löwe ist ein Objekt, das umfangreiche strukturelle Information in sich enthält. Wenn ich in der Steppe einen Löwen sehe, wird ein Teil dieser strukturellen Information als freie Information an mich übertragen. Wenn ich noch nie einen Löwen gesehen habe und nichts über einen Löwen weiß, löst diese Information bei mir keine Wirkung aus. Als gebildeter Mensch habe ich aber funktionelle Information über einen Löwen als Vorwissen gespeichert, mit deren Hilfe ich die ankommende freie Information zu pragmatischer Information verarbeiten kann, die eine Wirkung auslöst und mich dazu veranlasst auszureißen.

In der Diskussion schlug Pürschel vor, den Wert von (pragmatischer) Information durch den Fitnessgewinn durch sie veranlaßten Verhaltens zu messen.

Zusammenspiel struktureller, funktioneller und pragmatischer Information

Kommunikation ist der Austausch von (strukturellen) Informationen zwischen agierenden Partnern (mit Hilfe eines Mediums). Funktionale Information kann z.B. ein Algorithmus sein, der empfangene strukturelle Information auswertet und verarbeitet. Daraus entsteht pragmatische Information, aus der beim Empfänger der strukturellen Information eine Wirkung in Form von Verhalten resultiert.

Zur Veranschaulichung dieser Informationsbegriffe kann ein einfaches **Agentenmodell** dienen, das durch folgende Eigenschaften definiert ist:

Die gedächtnislosen Agenten können sich selbständig planlos auf einer gerasterten Fläche bewegen und hinterlassen auf den besuchten Positionen jeweils eine Markierung.

Die Markierung auf der Fläche ist eine strukturelle Information, die gemäß dem II. Hauptsatz der Thermodynamik allmählich verblasst und ggf. auch auf der Fläche diffundieren kann.

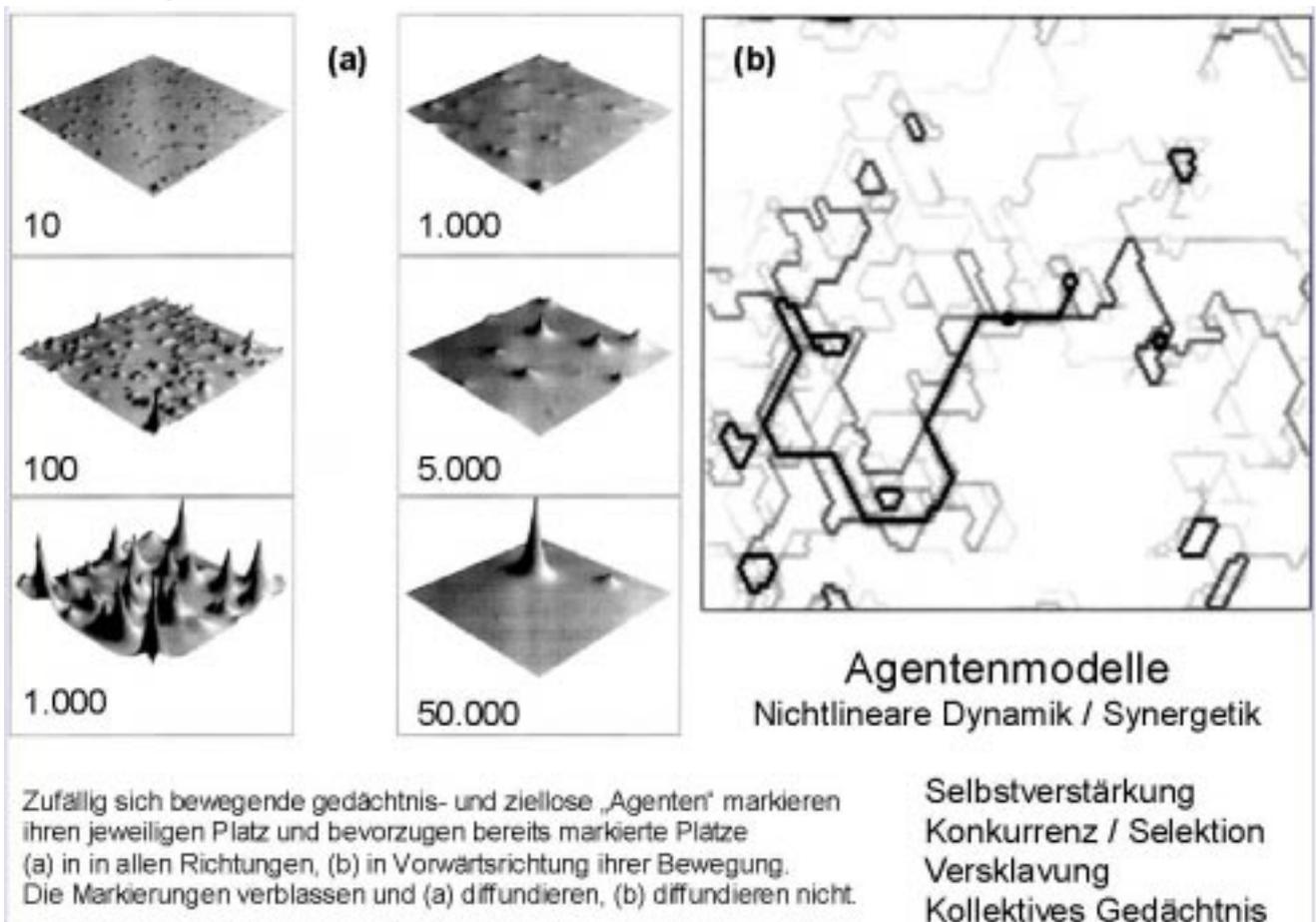
Die Agenten können keine Information akkumulieren, verfügen aber über funktionale Information in Form eines Algorithmus' zur Interpretation der vorgefundenen strukturellen Information, der ihnen sagt: „Bewege dich zufällig in alle Richtungen, aber vorzugsweise in Richtung der stärksten Markierung in deiner unmittelbaren Nachbarschaft“.

Die Agenten erzeugen aus der vorgefundenen strukturellen Information mit Hilfe ihrer internen funktionalen Information die pragmatische Information, die sie vorzugsweise auf markierte Nachbarpunkte lenkt. In einem Zyklus „schreiben - lesen - handeln“ kommunizieren die Agenten indirekt untereinander. In gewisser Weise ahmt jeder Agent das Verhalten der anderen Agenten nach.

Selbstorganisation durch Information im Agentenmodell

Wird das soeben definierte Agentenmodell auf einem Computer simuliert, so vollziehen sich folgende Selbstorganisationsprozesse:

Zunächst zufällig verteilte Agenten versammeln sich in mehreren Zentren, sobald durch Zufall in verschiedenen Punkten eine überkritische Markierungs(Informations)dichte erreicht wurde (es kommen mehr Markierungen hinzu als durch Verblässen und Diffusion verschwinden). In diesen Zentren wächst die Markierungsstärke immer weiter an (Phase der Selbstverstärkung). Da die Agenten statistisch mit geringer Wahrscheinlichkeit die markierten Zentren auch verlassen können, verkleinern sich die kleineren Zentren, nachdem es nur noch wenige freie Agenten gibt und darum die kritische Markierungsstärke unterschritten wurde, während die größeren Zentren weiter anwachsen. Die Zentren treten in Konkurrenz um freie Agenten, die kleineren werden wegselektiert (Phase der Konkurrenz und Selektion).



Am Ende konzentrieren sich alle Agenten in einem einzigen Zentrum (siehe Abb.4 links). Können in einem modifizierten Modell die Agenten nur in ihrer Vorwärtsrichtung Markierungen erkennen, ihre Bewegungsrichtung aber statistisch umkehren, so bilden sich keine Zentren, sondern es entstehen Wege, längs denen die Agenten wandern. Da die Markierungen verblässen, wenn sie nicht erneuert werden, entstehen Wege endlicher Länge, die gerade noch ständig erneuert werden können (s. Abb. 4 rechts).

Versklavungsprinzip und kollektive Information

Man erkennt hier in beiden Fällen Beispiele für den „Versklavungseffekt“:

Das individuelle Verhaltensmodell der Agenten erzeugt auf der übergeordneten Ebene emergente Strukturen (ein Zentrum, einige Wege), welche die einzelnen Agenten im Ganzen nicht erkennen können, die aber dennoch - zufällig einmal entstanden - das weitere Verhalten der Individuen bestimmen. Zwar können das Zentrum und die Wege zufällig auch verlassen werden, aber je stärker sie bereits ausgebaut sind, um so seltener verändern sie sich. Selbstorganisation

findet jedoch nur dort statt, wo neue emergente Information erzeugt und nicht nur die alte immer wieder erneuert wird.

Obwohl auf der Ebene der Agenten nur lokale Information in Form der Markierungen erzeugt wird, die von anderen Agenten auch nur lokal gelesen und genutzt wird, entsteht auf einer höheren Ebene „selbstorganisatorisch“ ein Wegesystem, das emergente Information enthält. Dadurch werden auf der höheren Ebene Ordnungsparameter erzeugt, welche die individuellen Agenten bevorzugt auf bestimmte Wege orientieren und damit „versklaven“. Die von den gedächtnislosen Agenten immer wieder aufgefrischten Wege stellen also so etwas wie ein kollektives Gedächtnis dar, dessen Informationsinhalt das individuelle Verhalten der Agenten bestimmt.

Dass damit wirklich für die Agenten nutzbare, pragmatische Information entsteht, kann man in einem abgewandelten Agentenmodell sehr deutlich erkennen: Legt man auf der Bewegungsfläche der Agenten zufällig verteilte „Futterplätze“ an, bei deren Erreichen die Agenten in die Lage versetzt werden, andersfarbige „stärkere“ Markierungspunkte zu setzen, so entstehen Wege, welche die Futterplätze miteinander verbinden, bis einer der Plätze „leergefressen“ ist. Dann beginnt die statistische Suche nach neuen Futterplätzen. Wesentlich für das Finden neuer Plätze ist dabei die Zufallskomponente in der Bewegung der Agenten. Der Zufall ist ein wesentliches Element der Evolution.

Gesellschaftliche Relevanz

Das Agentenmodell simuliert gewisse Verhaltensweisen, die auch in der menschlichen Gesellschaft wirksam zu sein scheinen. Man vergleiche z.B. die in der Vorlesung von Prof. Dörner über Ideologische Massenbewegungen dargestellten Erscheinungen, bei denen durch Nachahmung individueller Verhaltensweisen gesellschaftliche Normen herausgebildet werden, die später die Verhaltensweisen großer Gruppen beeinflussen und in bestimmte Bahnen lenken, die nur schwer wieder verlassen werden können. Auf diese Weise bilden sich auf einer übergeordneten kollektiven Ebene Gesetzmäßigkeiten heraus, die von den Individuen nicht beabsichtigt waren und nicht verstanden werden. Auch unser Geldsystem - einmal entstanden - scheint einen verhaltenssteuernden Zwang auszuüben, der in seinen Wirkungen weit über die Absichten des Einzelnen hinausgeht.

Literatur

W. Ebeling, J. Freund, F. Schweitzer
„Komplexe Strukturen: Entropie und Information“
B.G. Teubner, Stuttgart und Leipzig 1998



WZFG e.V.
Berlin-Buch

Forschung für zukunftstaugliches Verhalten
Förderung regenerativer Energien
zukunftsorientierte Kulturarbeit
Öffentlichkeitsarbeit

WERKSTATT FÜR ZUKUNFTS-FORSCHUNG UND -GESTALTUNG (WZFG e.V.) auf dem Biomedizinischen Forschungscampus Berlin-Buch
Geschäftsstelle, PF, 13092 Berlin, od. Robert-Rössle-S. 10, 13125 Berlin, T=030/94063845, F=/9494161 d.; T=030/4241718, F=42085416 p.
www.zukunfts-werkstatt.org / kontakt@zukunfts-werkstatt.org

Vorstand: Dr. Hans-Volker Pürschel (Vorsitzender - Physiker/Zukunftsforscher/Kulturarbeiter), Uwe Frömberg (Vorstandsmitglied - Informatikingenieur), Anna Franziska Schwarzbach (Vorstandsmitglied - Dipl. Architektin/Bildhauerein). **Bankverbindung:** Kto. 397 2629 005, Berliner Volksbank, BLZ 100 900 00. **Gemeinnützigkeit:** Für Wissenschaft, Kultur, Bildung wurde dem Verein am 19.10.00 die Gemeinnützigkeit und die Berechtigung, Spendenquittungen auszustellen, durch das Finanzamt Für Körperschaften I, Gerichtstr. 27, 13347 Berlin, vorläufig zuerkannt und am 3.6.02 bestätigt.