

Selbstorganisation und Information[†]

Frank Schweitzer

Institut für Physik der Humboldt-Universität, Unter den Linden 6, 10099 Berlin

e-mail: frank@physik.hu-berlin.de

1 Einleitung: Zum Informationsbegriff in der Umgangssprache

Eigentlich müßten diese Ausführungen didaktisch damit beginnen, zunächst die Begriffe "Information" und "Selbstorganisation" zu erklären, um dann zu zeigen, in welchem Verhältnis sie zueinander stehen.

Aber bereits der Versuch einer Begriffsbestimmung zeigt, daß das Zeitalter der Babylonischen Sprachverwirrung auch in den Naturwissenschaften noch lange nicht vorbei ist - und ebenso wenig, wie eine Einheit der Wissenschaften in Sicht wäre, ebenso wenig ist auch eine einheitliche Informationstheorie oder eine einheitliche Selbstorganisationstheorie in Sicht. Aus diesem Grunde werde ich mich darauf beschränken, Bruchstücke zu diesem Thema zu liefern. Das schließt, neben dem fragmentarischen Charakter meiner Darlegungen, auch einen subjektiven Standpunkt zum Thema "Selbstorganisation und Information" ein.

Zunächst nehme ich meine Zuflucht bei einer ethymologischen Betrachtung des Wortes "Information", wie es in unserer Alltagssprache vorkommt. Den Ausgangspunkt bildet das lateinische *informare* (gestalten, formen, bilden), das im Spätmittelhochdeutschen des 14. Jahrhunderts zu *informieren* im Sinne von "unterrichten, durch Unterweisung bilden, befähigen" wurde. So wird es auch noch in der heutigen Umgangssprache gebraucht: Wenn wir einen Beitrag als *informativ* einschätzen, dann meinen wir auch, daß er "belehrend, unterrichtend" ist.

Hier deutet sich bereits ein Problem an, das uns noch weiter beschäftigen wird: Information ist keinesfalls jede x-beliebige Nachricht, sondern eine Nachricht mit einer bestimmten *Wirkung* beim Empfänger: sie soll ihn bilden.

Einen zweiten Aspekt möchte ich einleitend hervorheben: Information erschließt sich erst in der Relation, im Verhältnis, beispielsweise zwischen zwei Personen: "Information ist ein Phänomen

[†] Vortrag, gehalten in der Ringvorlesung "Komplexität und Selbstorganisation - "Chaos" in Natur und Kulturwissenschaften" im Rahmen des *studium generale* an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 3. Mai 1995

unseres zwischenmenschlichen Existierens, nämlich das der Mitteilung von Bedeutungsgehalten"¹ Information ist Mitteilung - also etwas, das man mit anderen teilt. Eine Information, die niemand teilt, ist keine Information.

In ähnlicher Weise spricht Kant in seiner Schrift "Was heißt: Sich im Denken orientieren?" auch vom Denken: Gedanken hat man nicht selbst, sondern nur im Verein mit anderen - Gedanken sind die mit-geteilten Gedanken. Das heißt, das denkende Ich ist eigentlich nur die Kreuzungsstelle von Gedanken, die es mit anderen teilt.² Auch die leider außer Gebrauch gekommene Redewendung: "Es dünkt mich..." ist noch ein Rudiment der alten Einsicht, daß wir unsere Gedanken nicht selbst haben.

Dieser kurze Exkurs weist uns auch auf die enge Beziehung zwischen Information und Kommunikation hin, die am Ende dieses Vortrages noch eine Rolle spielen wird.

2 Potentielle Information: Zum Informationsbegriff in der Physik

2.1 Statistische Entropie und Informationsentropie

Ganz im Gegensatz zur alltagssprachlichen Verwendung steht der Informationsbegriff in der Physik. Dort taucht der Begriff Information zunächst einmal gar nicht explizit auf, sondern eine andere Größe von fundamentaler Bedeutung in der Physik: die Entropie.

In der statistischen Interpretation der Entropie durch Boltzmann, Planck und Gibbs ist die Entropie verknüpft mit der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit W :

$$S = k_B \ln W$$

W ist ein Maß für die Zahl der möglichen Mikrozustände, die zu einem gegebenen Makrozustand führen können. Als Makrozustände werden hier Zustände des Gesamtsystems bezeichnet, wobei die Frage auftritt, wodurch diese Makrozustände auf der tieferliegenden, mikroskopischen, Ebene konstituiert werden. Dafür gibt es nun eine unausdenklich große Zahl von Möglichkeiten, die alle eine bestimmte Wahrscheinlichkeit haben - und die Entropie sagt uns, wie groß diese Zahl von Möglichkeiten ist

Der Begriff Information kommt ins Spiel, als Shannon sich in den 40er Jahren dieses Jahrhunderts mit der informationstheoretischen Frage beschäftigte, wie groß die Unsicherheit ist, wenn man bei der nachrichtentechnischen Übertragung einer Sequenz (eines Textes beispielsweise) den nächstfolgenden Buchstaben erraten muß und nur die vorhergehenden Buchstaben kennt, wobei Shannon vom Inhalt des Textes völlig abgesehen hat.

¹ RAFAEL CAPURRO, Zur Genealogie der Information, Abstract des Vortrags auf dem 125. WE-Heraeus-Seminar "Der Informationsbegriff aus interdisziplinärer Sicht", Cottbus, 1.-4. März 1994

² vgl. hierzu auch RAFAEL CAPURRO, On the Genealogy of Information, in: K. KORNWACHS, K. JACOBY (Eds.): Information. New Questions to a Multidisciplinary Concept, Berlin: Akademie-Verlag, 1996, pp. 259-270

Im Ergebnis seiner Überlegungen fand Shannon ganz formal die folgende Gleichung für die mittlere Unsicherheit der Vorhersage:

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \log p_i$$

Wenn s die Zahl der Buchstaben im Alphabet ist und p_i die Wahrscheinlichkeit, mit der der Buchstabe i in einem Text auftritt, dann ist H als die Summe ist ein Maß für die mittlere Unsicherheit oder Unbestimmtheit der Vorhersage.

Einer Anekdote zufolge, soll Shannon den bekannten Kybernetiker J. v. Neumann gefragt haben, wie er denn diese Größe H nennen sollte, worauf dieser geantwortet haben soll, er möge sie doch Entropie nennen, weil sowieso niemand so richtig wüßte, was das ist.

Die Größe H heißt also "Informationsentropie" - und sie hat diesen Namen zurecht, denn es läßt sich folgende Äquivalenz zeigen (allerdings nur unter der Voraussetzung, daß das "Alphabet" in H ein vollständiger Satz von Variablen ist):

$$S = k_B H$$

Damit ist uns also ein Zusammenhang zwischen Entropie und Information gegeben.³ Entropie kann verstanden werden als ein Maß für die Information, die benötigt wird, um den Mikrozustand eines gegebenen Makrozustandes aufzuklären.⁴ Mit anderen Worten: Entropie ist ein Maß für die Zahl der Fragen, die gestellt werden müßten, um den Mikrozustand eines gegebenen Makrozustandes aufzuklären.

2.2 Evolution als Generierung von potentieller Information

Wenn wir uns die Welt als Ganzes als ein abgeschlossenes System denken, dann gibt es für die zeitliche Entwicklung der Entropie ein fundamentales Gesetz, das als 2. Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet wird und schon Mitte des 19. Jahrhunderts von Rudolph Clausius, damals Dozent an der Artillerie-Schule in Berlin, entdeckt wurde.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, daß die Entropie in abgeschlossenen Systemen im Verlauf der Zeit zunimmt. Das heißt, wenn die Entropie im Verlauf der Evolution wächst, dann wächst auch die Zahl der möglichen Mikrozustände - und unseren obigen Überlegungen zufolge wächst damit auch die Information, die benötigt wird, um den Mikorzustand eines gegebenen Makrozustands aufzuklären.

Man kann jetzt den Versuch unternehmen, diese Information dadurch zu erhalten, daß man einen gegebenen Zustand darstellt als einen Entscheidungsbaum von Fragen, die jeweils mit Ja oder Nein

³ vgl. auch: M.W. WOLKENSTEIN, Entropie und Information, Thun: Deutsch, 1990

⁴ WERNER EBELING, RAINER FEISTEL, Chaos und Kosmos. Prinzipien der Evolution, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994, S. 193

beantwortet werden können. C.F. v. Weizsäcker, beispielsweise, hat eine Theorie vorgeschlagen⁵, die einen solchen Entscheidungsbaum auf sogenannten Ur-Alternativen aufbaut. Ein Ur (Uralternative, Zustandsvektor u_r)⁶ ist eine Entscheidung auf elementarster Grundlage, die einen Informationsgehalt von 1 bit generiert (also zwischen Ja und Nein entscheidet). Gemäß seiner Theorie würden alle Objekte und alle Zustände dieser Welt aus solchen Uren aufgebaut: "Postulat letzter Objekte. *Alle Objekte bestehen aus letzten Objekten mit $n=2$* . Ich nenne diese letzten Objekte Urobjekte und ihre Alternativen Uralternativen."⁷

Die Information einer Situation ist in dieser Beschreibung gleich der Anzahl der in sie eingehenden Uralternativen: "Die Information eines Ereignisses kann auch definiert werden als die Anzahl völlig unentschiedener einfacher Alternativen, die durch das Eintreten des Ereignisses entschieden werden"⁸. Auch "Masse ist Information": die Ruhmasse eines Teilchens wäre "die Anzahl der zum Aufbau des ruhenden Teilchens notwendigen Ur-Alternativen, also exakt die im Teilchen investierte Information".⁹ Ein Nukleon zum Beispiel würde aus 10^{40} Uren bestehen - und das Universum zum jetzigen Zeitpunkt aus etwa 10^{120} Uren.¹⁰ Diese Zahl charakterisiert die maximale Information, die zum gegebenen Zeitpunkt innerhalb des Universums überhaupt existieren kann, als Bits, als Zahl von unterscheidbaren Ur-Alternativen.

In diesem Sinne kann Evolution auf quantenmechanischer Grundlage interpretiert werden als ein Prozeß, bei dem ständig zwischen Ur-Alternativen entschieden wird und - im Vollzug dieser Entscheidung - Information generiert wird. Da die Entropie aber im Verlauf der Evolution immer zunimmt, wird auch die Zahl der Uralternativen, die zur Klärung entschieden werden müssen, ständig zunehmen. Dies bedeutet im obigen Kontext, daß die Zahl der *Fragen* wächst, um einen existierenden Mikrozustand aufzuklären.

Das heißt letztlich, die Information, die aus den entscheidbaren Ur-Alternativen gewonnen wird, ist keine *faktische*, sondern eine *potentielle* oder eine virtuelle Information. In diesem Sinne wird sie auch von C.F. von Weizsäcker verstanden, wenn er schreibt: "Positive Entropie ist *potentielle* (oder virtuelle) Information."¹¹ und "Evolution als Wachstum potentieller Information"¹²

Der Begriff der potentiellen Information, wie er hier verwendet wird, ist vielleicht am ehesten faßbar, indem man sich vorstellt, daß die Ur-Alternativen einen *Informationsraum* aufspannen,

⁵ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Quantentheorie elementarer Objekte, Nova Acta Leopoldina, N.F. Nummer 230, Band 49, sowie (ders.): Die Einheit der Natur, München: dtv, 1974 (darin: Abschnitt II.5: Die Quantentheorie), (ders.) Aufbau der Physik, München: dtv, 3. Aufl. 1994 (darin: 9. Kapitel, 2.b. Uralternativen)

⁶ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Quantentheorie elementarer Objekte, Nova Acta Leopoldina, N.F. Nummer 230, Band 49, S. 15

⁷ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Die Einheit der Natur, München: dtv, 1974, S. 269

⁸ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Die Einheit der Natur, München: dtv, 1974, S. 347

⁹ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Die Einheit der Natur, München: dtv, 1974, S. 361, S. 363

¹⁰ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Die Einheit der Natur, München: dtv, 1974, S. 272

¹¹ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Aufbau der Physik, München: dtv, 3. Aufl. 1994, S. 167

¹² CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Aufbau der Physik, München: dtv, 3. Aufl. 1994, S. 174

dessen Dimension mit der Zahl der entscheidbaren Alternativen wächst. Dieser Informationsraum verkörpert damit die *potentiellen* Möglichkeiten, die aus beliebigen Entscheidungen von Ja-Nein-Alternativen resultieren können. Der *faktische* Zustand wäre in diesem Bild nur ein Punkt in jenem hochdimensionalen Raum, der gerade durch die Entscheidung zwischen den entsprechenden Ur-Alternativen *lokalisiert* wird.

Was wir also aus der physikalischen Betrachtung gewonnen haben, ist keine faktische Information, sondern potentielle Information, eine Diskrepanz, die aus der Verknüpfung des Informationsgehaltes mit dem Entropiebegriff resultiert.

Information, wie wir sie allgemeinsprachlich verstehen, soll aber faktische Information darstellen und nicht als ein Maß für faktische *Unbestimmtheit* interpretiert werden. Um dies zu erreichen, bedarf es einer differenzierteren Diskussion des Informationsbegriffs. Dazu soll zunächst eine Unterscheidung von *struktureller* und *funktionaler* Information vorgenommen werden.¹³

3 Strukturelle Information

3.1 Symbolische Sequenzen

Als *strukturelle* Information¹⁴ wird hier diejenige Information bezeichnet, die mit einer vorliegenden (materiellen) Struktur zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort gegeben ist; sie ist mit der physikalischen Natur eines Zustandes verbunden, sei es durch ein geologisches Gestein oder durch die DNA. Die strukturelle Information erfaßt also den Informationsgehalt, wie er auf materieller Grundlage codiert ist, sie repräsentiert die *strukturelle Determiniertheit* eines Zustandes.

Das in diesem Aufsatz zugrundegelegte Verständnis von "struktureller Information" steht in enger Beziehung zu dem Begriff "gebundene Information"¹⁵, den Ebeling und Feistel verwenden. Den Autoren zufolge wäre die Entropie ein quantitatives Maß, um die gebundene Information eines Zustandes zumindest näherungsweise anzugeben.

¹³ vgl. dazu auch FRANK SCHWEITZER, Strukturelle, funktionale und pragmatische Information - zur Kontextabhängigkeit und Evolution der Information, in: N. FENZL, W. HOFKIRCHNER, G. STOCKINGER (Hrsg), *Information und Selbstorganisation. Annäherung an eine vereinheitlichte Theorie der Information*, Studien-Verlag, Innsbruck-Wien 1998, S. 341-364

¹⁴ Der Begriff "strukturelle Information" wird hier *nicht* in demselben Sinne verwendet wie bei STONIER, der zwischen struktureller und kinetischer Information unterscheidet und strukturelle Information an die Existenz eines Gleichgewichtszustandes knüpft. Entsprechend werden dann von STONIER auch die "Transformationen zwischen kinetischer und struktureller Information" abgehandelt, wobei die Analogie zur Energieumwandlung in der klassischen Mechanik deutlich strapaziert wird (vgl. TOM STONIER, *Information und die innere Struktur des Universums*, Berlin: Springer, 1991).

¹⁵ WERNER EBELING, RAINER FEISTEL, *Chaos und Kosmos. Prinzipien der Evolution*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994, S. 55, S. 219 ff.

Eine Möglichkeit, strukturelle Information abzubilden, sind Strings oder symbolische Sequenzen, also Strukturen der folgenden Art: $s_0s_1s_2\dots s_ns_{n+1}\dots$, wobei die s_i im folgenden generell als "Buchstaben" bezeichnet werden sollen.

Allgemein läßt sich zeigen, daß dynamische Vorgänge mit Hilfe von Symbolischen Dynamiken auf Sequenzen abgebildet werden können,¹⁶ indem der Zustandsraum diskretisiert und die einzelnen Zellen mit den "Buchstaben" eines vorgegebenen Alphabets benannt werden. Die Anordnung der "Buchstaben" in der Sequenz ergibt sich dann durch die Reihenfolge, mit der die verschiedenen Zellen des Zustandsraumes angelaufen werden. Der Informationsgehalt eines Strings ist dabei natürlich immer an das Alphabet geknüpft, auf das er aufbaut - aber dies ist nur eine scheinbare Einschränkung, die durch entsprechenden Transformationen aufgehoben werden kann.

Die "Herkunft" der Strings kann ganz verschieden sein (Beispiele sind eine (räumlich angeordnete) Folge von Buchstaben (Text) oder eine zeitlich angeordnete Folge von Tönen (Musik), ein natürliches Protein, das aus Basenpaaren gebildet wird (DNA) oder ein Binärcode im Computer (...00101001001100...), die Aktienkurse der New Yorker Börse oder die Positionen eines Zufallswanderers auf einem Gitter.) Daß heißt, für die Repräsentanz der strukturellen Information in Strings ist es letztlich unerheblich, ob s_i die Information ist, die zum Zeitpunkt i generiert wurde, oder ob es die Information ist, die durch Entscheidung einer Alternative auf dem Level i des Entscheidungsbaums entstanden ist - oder ob s_i einfach die Information ist, die an der Stelle i eines natürlichen Strings steht.¹⁷

Die Bedeutung, die der strukturellen Information gerade in den Naturwissenschaften beigemessen wird, spiegelt sich in den zahlreichen Methoden zur Sequenzanalyse wider, die in den letzten Jahren entwickelt wurden. Von großem Interesse sind dabei sogenannte "natürliche" Sequenzen, wie zum Beispiel die DNA als Abfolge von Basenpaaren, literarische Texte als Abfolge von Buchstaben oder Musik als Abfolge von Tönen.

3.2 Statistische Analyse von Symbolsequenzen

Die informationstheoretischen Methoden, mit denen die Informationscodierung in Sequenzen untersucht werden kann, gehen über die einfache Berechnung der Shannonschen Informationsentropie

¹⁶ H. BAI-LIN, *Elementary Symbolic Dynamics*, Singapore: World Scientific, 1989

¹⁷ vgl. dazu auch FRANK SCHWEITZER, *Strukturelle, funktionale und pragmatische Information - zur Kontextabhängigkeit und Evolution der Information*, in: N. FENZL, W. HOFKIRCHNER, G. STOCKINGER (Hrsg), *Information und Selbstorganisation. Annäherung an eine vereinheitlichte Theorie der Information*, Studien-Verlag, Innsbruck-Wien 1998, S. 341-364

weit hinaus¹⁸ und analysieren auch die Korrelationen innerhalb der Sequenz (die wechselseitigen Beziehungen zwischen Zeichen an verschiedenen Stellen des Strings).

Zur näheren Erläuterung¹⁹ betrachten wir ein *Alphabet*, bestehend aus λ Buchstaben: $A_1, A_2, \dots, A_\lambda$. Bei der DNA zum Beispiel ist $\lambda=4$ (A, C, G, T); für den Computer ist $\lambda=2$ (0,1), das deutsche Alphabet wäre durch die Zahl der Buchstaben gegeben usw. Als *Sequenz* bezeichnen wir dann eine endliche Folge von Buchstaben des Alphabets, die die Länge k haben soll. Ein *Block* ist eine Teilsequenz der Länge n aus der Sequenz ($n < k$). Die Wahrscheinlichkeit, einen bestimmten Block der Länge n innerhalb der Sequenz zu finden, bezeichnen wir mit $p^{(n)}(A_1, A_2, \dots, A_n)$.

Wieviele Möglichkeiten gibt es, mit λ Buchstaben einen Block der Länge n zu bilden? Aus kombinatorischen Gründen gerade $N_n = \lambda^n$, also unausdenklich viele Möglichkeiten. Betrachtet man das Beispiel der DNA, dann ergibt sich bereits bei einer Sequenzlänge von 70 ($\lambda=4, n = 70$) eine Zahl von Möglichkeiten, die größer ist als 10^{40} . Dieser Umstand wird als *kombinatorische Explosion* bezeichnet. Das heißt, natürliche Sequenzen, wie die DNA, sind keine Zufallsrealisierungen, und während der Evolution wurden auch nicht alle Möglichkeiten durchgetestet.

Dieses sicher einleuchtende Fazit führt zu der sehr viel komplizierteren Frage, nach welchen Regeln die Zahl von Möglichkeiten eingeschränkt wurde. Dieses Problem wird hier mit informationstheoretischen Methoden behandelt, das heißt, Sequenzen werden hinsichtlich ihres strukturellen Aufbaus, der Abfolge ihrer Buchstaben, analysiert.

Der erste Schritt dieser quantitativen Analyse besteht in der Berechnung von *Blockentropien*. Hat man die Häufigkeit bestimmt, mit der Blöcke der Länge n in der vorliegenden Sequenz vorkommen, so ergibt sich die Blockentropie H_n wie folgt:

$$H_n = - \sum p^{(n)}(A_1 \dots A_n) \log p^{(n)}(A_1 \dots A_n)$$

Aus den Blockentropien lassen sich dann *bedingte Entropien* h_n berechnen:

$$h_n = H_{n+1} - H_n$$

Die Größe h_n ist ein Maß für die Ungewißheit des Buchstabens, der nach dem n -Block folgt. Stellt man den Verlauf von h_n graphisch dar (vgl. Abb. 1 und Abb. 2), dann kann die Fläche unterhalb der h_n -Kurve als ein Maß für die *effektive Komplexität* einer Struktur interpretiert werden.²⁰

¹⁸ vgl. PETER GRASSBERGER, Estimation of Information Content of Symbol Sequences and Efficient Codes, IEEE Trans. Inf. Theory **35** (1989) 669; W. LI, On the Relationship Between Complexity and Entropy for Markov Chains and Regular Languages, Complex Systems **5** (1991) 399, H. ATMANSPACHER, H. SCHEINGRABER (Eds.): Information Dynamics, New York: Plenum Press, 1991

¹⁹ vgl. WERNER EBELING, RAINER FEISTEL, Chaos und Kosmos. Prinzipien der Evolution, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994, S. 197 ff.

²⁰ PETER GRASSBERGER, J. Stat. Phys. 45 (1986) 27

²¹ Die Verwendung der Abbildung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von JAN FREUND.

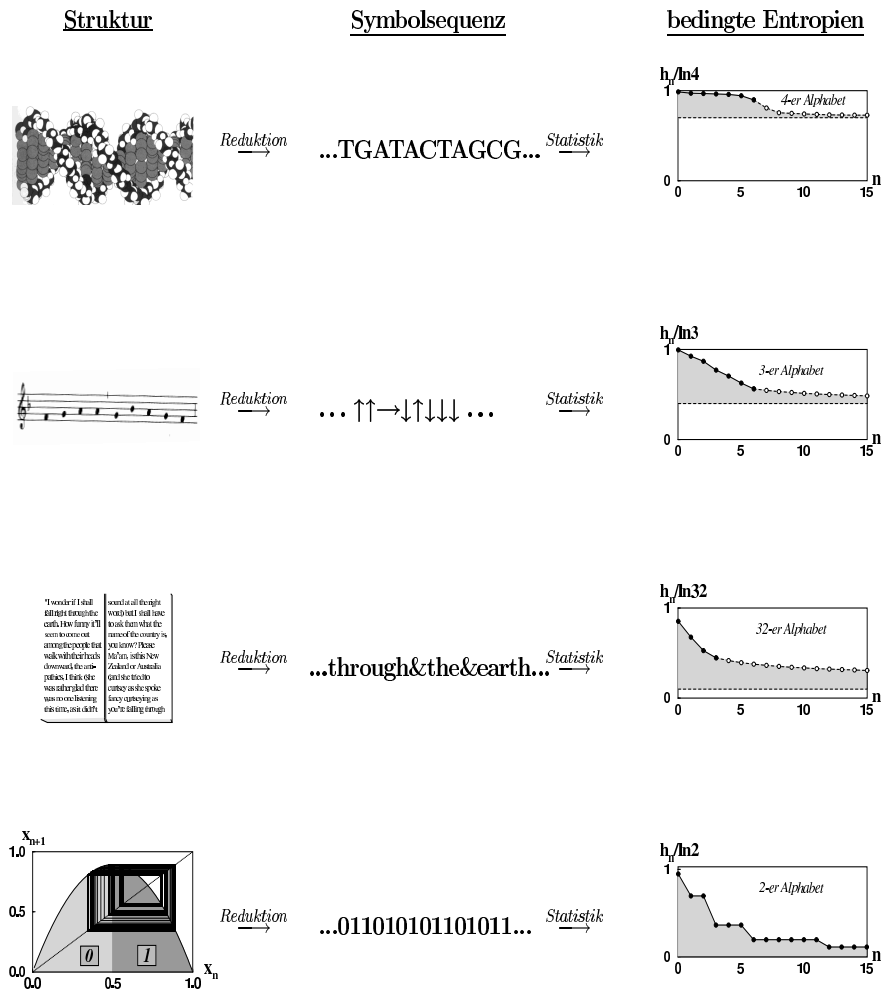


Abbildung 1: Beispiele für verschiedene Strukturen (von oben nach unten: DNA, Musik, Text, mathematische Abbildung), ihre Repräsentanz durch Symbolsequenzen und deren statistischen Analyse (Berechnung bedingter Entropien, siehe dazu folgenden Abschnitt).²¹

Das Ergebnis der Analyse verschiedener charakteristischer Sequenzen (vgl. auch Abb. 2) läßt folgende Schlußfolgerung zu:

Bei *periodische Sequenzen*, das heißt, bei einer völlig periodischen Anordnung der Buchstaben, geht die Unsicherheit, einen Buchstaben richtig vorherzusagen, nach der ersten Periode gegen

²² aus: JAN FREUND, Information, Long-Range Correlations and Extended Memory of Symbol Sequences, in: K. KORNWACHS, K. JACOBY (Eds.): *Information. New Questions to a Multidisciplinary Concept*, Berlin: Akademie-Verlag, 1996. Die Verwendung der Abbildung erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Autors.

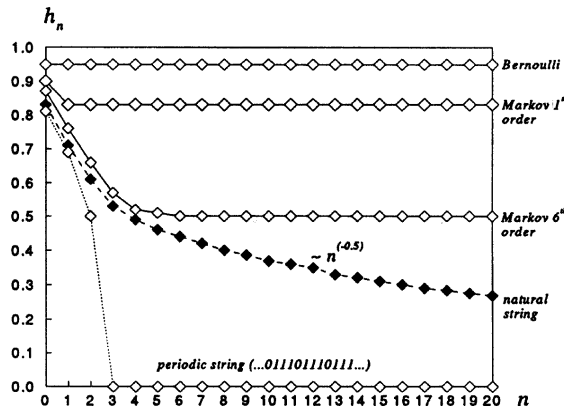


Abbildung 2: Schematische Darstellung der bedingten Entropie als Funktion der Stringlänge für verschiedene charakteristische Sequenzen.²²

Null. Damit geht aber auch der Neuigkeitswert der Sequenz gegen Null, und die Information wird redundant.

Ist die Anordnung der Buchstaben in einem String dagegen völlig ungeordnet, also chaotisch (man spricht auch von *Bernoulli-Sequenzen*), dann bleibt die Unsicherheit für die Vorhersage immer gleich groß, das heißt, die Sequenz hat einen hohen "Neuigkeitswert", der der kombinatorischen Explosion entspricht.

Bei sogenannten *Markov-Sequenzen n-ter Ordnung* weist die Sequenz ein kurzes "Gedächtnis" auf, das die Unsicherheit der Vorhersage in Abhängigkeit von der Ordnung n kurzfristig verringert, danach aber bleibt Unsicherheit wieder gleich.

Die große Ausnahme von den genannten Sequenztypen bilden die *natürlichen Sequenzen*. Diese sind strukturell gerade so aufgebaut, daß sie weder vollkommen chaotisch, noch vollkommen periodisch sind, wie auch der Verlauf der bedingten Entropien in Abb. 2 zeigt. Natürliche Sequenzen liegen also in der Abfolge ihrer "Buchstaben" *auf der Grenze zwischen Ordnung und Chaos*, oder - mit anderen Worten - zwischen Redundanz und Neuigkeit. Die strukturelle Information dieser natürlichen Sequenzen ist durch *langreichweitige Korrelationen* gekennzeichnet, das heißt, es sind noch Beziehungen zwischen "Buchstaben" nachweisbar, die an voneinander entfernten Stellen innerhalb der Sequenz stehen. Dies spiegelt sich in Abb. 2 in einer langsamen, potenzgesetzartigen Abnahme der bedingten Entropien wider, was einen entsprechend hohen Wert für die effektive Komplexität bedeutet.

Damit hat die Analyse der strukturellen Information ergeben, daß natürliche Sequenzen strukturell gerade so aufgebaut sind, daß in ihnen möglichst viel Information "verpackt" wird. Darüber

hinaus zeigt sich auch,²³ daß die Korrelationen in verschiedenen natürlichen informationstragenden Sequenzen jeweils nach ähnlichen Gesetzen abklingen - daß also unter diesem Blickwinkel eine Art struktureller "Verwandtschaft" zwischen literarischen Texten und der DNA existiert.

4 Pragmatische Information

Bei der String-Analyse wird lediglich der *syntaktische* Aspekt von Information erfaßt - also die strukturelle Verknüpfung innerhalb eines Strings, unabhängig von seiner Bedeutung. Einen Versuch, die Bedeutungsebene in den Informationsbegriff zu integrieren, bildet das Konzept der "semantischen Information", das hier aber nicht weiter diskutiert werden soll.²⁴ Es basiert darauf, Aussagen in logische Elementarsätze zu zerlegen, die jeweils mit "wahr" oder "falsch" beurteilt werden können - eine Art logischer Atomismus, wie er auch bei Wittgenstein zu finden ist. Hier existieren Analogien zu dem oben beschriebenen Ansatz C.F. v. Weizsäcker, Objekte in entscheidbare Uralternativen zu zerlegen.

Eine andere Möglichkeit, die Bedeutung von Information zu berücksichtigen, bildet das Konzept der "pragmatischen Information"²⁵, das mit den Begriffen "Erstmaligkeit" (oder "Neuheit") und "Bestätigung" operiert. Die pragmatische Information soll ein Maß für die Wirkung der Information beim Empfänger sein; sie ist immer dann minimal (oder Null), wenn die Information bereits vollständig bekannt, also redundant ist (Erstmaligkeit Null, Bestätigung 100 Prozent) - oder wenn die Information nicht an bereits Bekanntes anknüpft, also vollkommen neu und damit unverständlich ist (Erstmaligkeit 100 Prozent, Bestätigung Null). Zum Vergleich ist die Shannonsche Informationsentropie gerade dann maximal, wenn die Erstmaligkeit 100 Prozent beträgt, während sie im anderen Grenzfall minimal wird.

E. und C. v. Weizsäcker²⁶ haben 1972 die These vertreten, daß lebende Systeme zwischen diesen beiden Grenzfällen und damit in der Nähe des Maximums der pragmatischen Information operieren. Das heißt, die für die Evolution bedeutsame Information muß einerseits einen gewissen Neuheits-

²³ WERNER EBELING, GREGOIRE NICOLIS, Entropy of Symbolic Sequences: the Role of Correlations, *Europhys. Lett.* **14** (1991) 191, WERNER EBELING, THORSTEN PÖSCHEL, Long range correlations in literary English, *Europhys. Lett.* **26** (1994) 241, WERNER EBELING, ALEXANDER NEIMAN, Long-range correlations between letters and sentences in texts, *Physica A* **215** (1995) 233-241

²⁴ R. CARNAP, Y. BAR-HILLEL, On the Outline of a Theory of Semantic Information [1952];, sowie: Y. BAR-HILLEL: Semantic Information and its Measures, in: Y. BAR-HILLEL: *Language and Information*, Reading, Mass. 1964, pp. 221-274

²⁵ E. UND C. V. WEIZSÄCKER, Wiederaufnahme der begrifflichen Frage: Was ist Information, *Nova Acta Leopoldina*, N.F. Nummer 206, Band 37 (1972) 535-555, E.V. WEIZSÄCKER, Erstmaligkeit und Bestätigung als Komponenten der pragmatischen Information, in: (ders.) (Hrsg.): *Offene Systeme*, Bd. I, Stuttgart 1974, S. 82-113, vgl. auch: CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, *Aufbau der Physik*, München: dtv, 3. Aufl. 1994, S. 200-207

²⁶ E. UND C. V. WEIZSÄCKER, Wiederaufnahme der begrifflichen Frage: Was ist Information, *Nova Acta Leopoldina*, N.F. Nummer 206, Band 37 (1972) 535-555

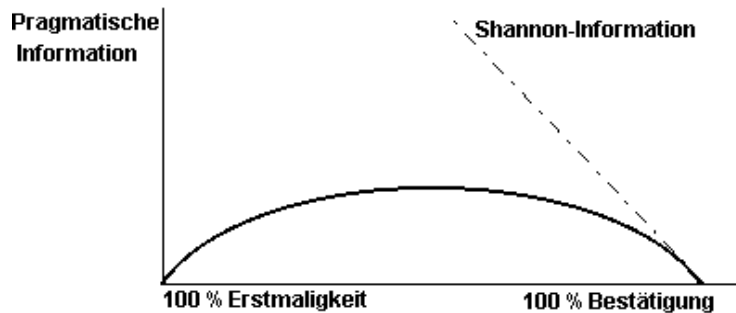


Abbildung 3: Schematische Darstellung der pragmatischen Information.

wert haben, der andererseits aber auf der Grundlage der bereits vorhandenen Information auch verstanden werden kann.

Diese These läßt sich durch die quantitative Analysen stützen, die wir bereits über den Aufbau der strukturellen Information in natürlichen Sequenzen gewonnen haben: Natürliche Sequenzen sind bereits *strukturell* so aufgebaut, daß sie der Anforderung an eine möglichst große pragmatische Information entsprechen. Natürliche Sequenzen sind weder chaotisch (Erstmaligkeit 100 Prozent, Bestätigung Null), noch sind sie periodisch (Erstmaligkeit Null, Bestätigung 100 Prozent), sondern sie weisen eine "Mischung" aus redundanten und neuen Anteilen auf, so daß die Korrelationen möglichst langreichweitig sind. Erst die richtige Mischung aus diesen beiden Anteilen gewährleistet einen möglichst große Wirk-Information.

Damit bestätigt die informationstheoretische Analyse der strukturellen Information natürlicher Sequenzen die These, daß in der Evolution nicht die syntaktische Information maximiert wurde, die einzig den Neuheitswert mißt, sondern es wurde die pragmatische Information optimiert als diejenige, die letztlich auch verstanden werden kann. Vermutlich war dieses Optimum an pragmatischer Information auch der Selektionsvorteil der entsprechenden Sequenzen, die wir heute als "natürlich" bezeichnen, weil sie aus einer langen Evolution hervorgegangen sind.

Von hier aus ergibt sich ein erweiterter Blick auf den pragmatischen Informationsbegriff, und es wäre daher überdenkenswert, die Analyse der strukturellen Information zur quantitativen Messung der pragmatischen Information heranzuziehen.

5 Funktionale Information

5.1 Übergang von struktureller zu pragmatischer Information

Die strukturelle Information repräsentiert den syntaktischen Aspekt der Information, sie läßt aber die Bedeutung der Information außer acht. Mit dem pragmatischen Informationsbegriff wurde bereits angedeutet, daß Information auch verstanden werden muß, um zu wirken. Diese Forderung schlägt sich, wie wir gesehen haben, bereits in der strukturellen Information nieder: Es sind gewisse strukturelle Gesetzmäßigkeiten nötig, um eine wirksame Information und letztlich ein Verstehen zu ermöglichen - ohne daß die semantische Ebene jedoch aus der Struktur extrahiert werden könnte.

Die Diskussion darüber, wie die Lücke zwischen der strukturellen und der Bedeutungsebene von Information geschlossen werden kann, ist noch keineswegs entschieden; insbesondere bleibt die Frage zu klären, *wie* die Wirkung oder das Verständnis von Information aus den Anfangsbedingungen heraus entstehen kann.²⁷ In den Kognitionswissenschaften wird neuerdings die These diskutiert, die Entstehung von Bedeutung durch einen Selbstorganisationsprozeß zu erklären und damit dem bereits erwähnten Konzept der "semantischen Information" einen neuen, anti-reduktionistischen Inhalt zu geben.²⁸ Semantische Information entsteht in diesem Kontext nicht durch Aufsummation logischer Elementarsätze, sondern als Emergenzphänomen über den möglichen Zuständen des Gehirns.

Im Rahmen des pragmatischen Informationskonzeptes wird bereits eine Information 2. Art vorausgesetzt, durch die die Information 1. Art verstanden werden kann. So C.F. v. Weizsäcker mit seiner These: "Information ist nur, was verstanden wird."²⁹ - ohne daß hier die Frage nach dem Ursprung der Information 2. Art beantwortet wird.

Diese Information 2. Art wird im folgenden als *funktionale* Information bezeichnet. Sie hat die Aufgabe, die Information 1. Art, die als strukturelle Information auf "materieller" Grundlage einen Sachverhalt codiert, zu *aktivieren* bzw. zu *interpretieren* - zu "deuten". Mit der Unterscheidung zwischen struktureller und funktionaler Information wird berücksichtigt, daß in einer komplexen Struktur, wie beispielsweise der DNA, viele verschiedene Informationen enthalten sind, die je nach den Umständen "herausgelesen", aktiviert werden können. Beispielsweise sind schon kernhaltige Zellen in der Lage, in Abhängigkeit vom physikalischen und chemischen Milieu innerhalb der Zelle die genetische Information unterschiedlich zu interpretieren. Die funktionale Information ist also

²⁷ vgl. dazu: HERMANN HAKEN, MARIA HAKEN-KRELL, Entstehung biologischer Information und Ordnung, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1989; HERMANN HAKEN, Die Selbstorganisation der Information in biologischen Systemen aus der Sicht der Synergetik, in: BERND-OLAF KÜPPERS (Hrsg.): Ordnung aus dem Chaos. Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution des Lebens, München: Piper, 1987, S. 127-156

²⁸ G. ROTH: Kognition - Die Entstehung von Bedeutung im Gehirn, und: M. STADLER, P. KRUSE: Zur Emergenz psychischer Qualitäten, in: WOLFGANG KROHN, GÜNTER KÜPPERS (Hrsg.): Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung, Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1992

²⁹ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Die Einheit der Natur, München: dtv, 1974, S. 351

kontextabhängig - sie existiert nur im Hinblick auf einen Rezipienten, der bei der "Deutung" der strukturellen Information immer auf die mit der funktionalen Information gegebenen Referenz-zustände zurückgreifen muß.

Unter Benutzung der Terminologie, die sich im Anschluß an die Autopoiese-Theorie etabliert hat, können wir auch sagen: die strukturelle Information repräsentiert die *strukturelle Determiniertheit* des Informationssystems, während die funktionale Information die Selbstreferentialität, die *operationale Geschlossenheit* des Informationssystems beschreibt.³⁰

Um die Wirkungsweise funktionaler Information zu umschreiben, scheint ein Vergleich mit dem quantenmechanischen Meßprozeß angebracht: Wir wissen, daß ein Mikroobjekt (zum Beispiel ein Elektron) erst durch den Meßprozeß als das konstituiert wird, als das es uns erscheint: als Welle oder als Teilchen; das heißt, die Information über das Teilchen kann nicht unabhängig vom Meßprozeß gesehen werden. Mit der Art der (experimentellen) Fragestellung wird aus dem Raum möglicher Informationen über das Objekt eine bestimmte Information gewissermaßen herausprojiziert.

Ähnliche Verhältnisse liegen auch in dem Verhältnis von struktureller und funktionaler Information vor. Erst durch den Akt der Rezeption, der wiederum von der funktionalen Information bestimmt ist, wird aus der nativen, verhüllten, strukturellen Information Wirk-Information. Auf diese Weise existiert zwischen der strukturellen und der funktionalen Information eine Art komplementärer Einheit, die Ausdruck der Kontextabhängigkeit von Information ist. Unter Bezugnahme auf den pragmatischen Informationsbegriff kann dieser Zusammenhang auch so formuliert werden: *durch die funktionale Information wird der Übergang von struktureller zu pragmatischer Information ermöglicht.*

Diese Komplementarität sollte Berücksichtigung finden, wenn in der Informationstheorie darüber gestritten wird, ob Information als objektive Größe mit eigenem ontologischen Status, vielleicht gar als dritte Grundgröße des Universums angesehen werden kann. So schrieb C.F. v. Weizsäcker: "Man beginnt sich daher heute daran zu gewöhnen, daß Information als eine dritte, von Materie und Bewußtsein verschiedene Sache aufgefaßt werden muß"³¹ Sicherlich könnte man der strukturellen Information einen solchen Status zubilligen - und der Physik der Informationsprozesse, die sich einzig mit struktureller Information befaßt, wird hiermit auch ihr Platz zugewiesen. Um aber den Charakter von Information als Ganzes zu verstehen, dazu bedarf es einer Art "quantenmechanischer Revolution" in der Informationstheorie, durch die der Blick auf die Konstruktion von Information im Rezeptionsprozeß gerichtet wird. Strukturelle und funktionale Information erscheinen dann als zwei Seiten einer Medaille, die nur im Rahmen bestimmter Näherungen unabhängig voneinander diskutiert werden können.

³⁰ vgl. dazu auch FRANK SCHWEITZER, Strukturelle, funktionale und pragmatische Information - zur Kontextabhängigkeit und Evolution der Information, in: N. FENZL, W. HOFKIRCHNER, G. STOCKINGER (Hrsg.), *Information und Selbstorganisation. Annäherung an eine vereinheitlichte Theorie der Information*, Studien-Verlag, Innsbruck-Wien 1998, S. 341-364

³¹ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, *Die Einheit der Natur*, München: dtv, 1974, S. 51

5.2 Symbol- und Sinntransfer

R. Feistel³² hat darauf hingewiesen, daß die strukturelle Information im Zuge der Evolution einen Wandel von gebundener zu freier Information erlebt. Gebundene Information ist untrennbar mit der physikalischen Natur eines Zustands verbunden, aber durch Extraktion und Symbolisierung kann aus ihr freie Information entstehen. Dieser Vorgang, auch als Ritualisation bezeichnet, weist wesentliche Züge eines kinetischen Phasenübergangs 2. Art auf. Er dient quasi einer "Entmaterialisierung" von struktureller Information und ist die Grundvoraussetzung dafür, daß überhaupt Information in Symbolen gespeichert, ausgetauscht und weiterverarbeitet werden kann.³³ In gewisser Weise ist freie Information ärmer als gebundene Information, weil sie nur einen ausgewählten Teilaspekt der ursprünglichen Struktur repräsentiert. Gleichzeitig entsteht damit aber ein neuer Freiheitsgrad: Durch die Symbolisierung wird strukturelle Information eingefroren, sie ist gespeichert und unterliegt nicht mehr den systemspezifischen Gesetzen der gebundenen Information.

Der beschriebene Ritualisationsprozeß hat auch Bedeutung für das Verhältnis von struktureller und funktionaler Information, das wir hier behandeln: Solange die strukturelle Information gebunden ist, bleibt die funktionale Information, die die strukturelle Information erst aktiviert und interpretiert, ebenfalls an diese materielle Grundlage gebunden. Mit dem Übergang von gebundener zu freier Information aber hat es die funktionale Information mit Symbolen zu tun und ist in diesem Sinne verselbständigt. Ebenso wie freie strukturelle Information ausgetauscht, kopiert und weiterverarbeitet werden kann, kann nun auch die freie funktionale Information ausgetauscht werden.

Dies bedeutet, daß nunmehr auch die Deutungsmuster für strukturelle Information übertragen werden können: mit dem *Symboltransfer* wird auch ein *Sinntransfer* ermöglicht - ein Vorgang, der weitreichende Konsequenzen hat, wenn man von der biologischen zur soziologischen Ebene der Informationsverarbeitung übergeht. Gerade der gesellschaftliche Informationsverarbeitungsprozeß lebt ganz entscheidend von dem Ritualisationsvorgang, durch den strukturelle Information symbolisiert und eingefroren wird, und dem darauf aufbauenden Transfer von Deutungsmustern.

Damit ist die Frage, inwieweit Information auf strukturelle bzw. syntaktische Aspekte reduziert werden kann, im Rahmen dieser Überlegungen zugunsten einer komplementären Beschreibung von struktureller und funktionaler Information beantwortet worden.

³² RAINER FEISTEL, Ritualisation und die Selbstorganisation der Information, in: UWE NIEDERSEN, LUDWIG POHLMANN (Hrsg.): *Selbstorganisation und Determination* (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 1), Berlin: Duncker&Humblot, 1990, S. 83-98,

³³ vgl. auch: WERNER EBELING, RAINER FEISTEL, *Chaos und Kosmos. Prinzipien der Evolution*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994, Kapitel 4: Information und Wert, S. 55-67

6 Selbstorganisation und Generierung von Information in einem Modell künstlicher Agenten

6.1 Selbstorganisation und Information

Wir wollen nun erklären, wie sich Selbstorganisation durch Information vollziehen kann und knüpfen dazu an die Überlegungen zum Informationsverständnis der Umgangssprache in Kapitel 1 an. Dort wurde Information einerseits charakterisiert als das Mitgeteilte; andererseits sollte Information eine bestimmte Wirkung erzeugen. In unserem Zusammenhang ist es die strukturelle Information, die mitgeteilt wird, weil sie durch Symbole ausgetauscht werden kann. Die wirksame Information dagegen ist die pragmatische Information, die erst im Rezipienten aus der Wechselwirkung von struktureller und funktionaler Information entsteht.

Dabei ist die funktionale Information ein Algorithmus, der die strukturelle Information verarbeitet, verwertet. Dies aber ist genau das Problem der Informatik: "Der zentrale Begriff der Informatik ist nicht die Information, sondern der Algorithmus" (P. Scheffe), während in der Physik vornehmlich die strukturelle Information behandelt wird. Auf diese Weise sind beide Bereiche klar voneinander geschieden; in der Generierung pragmatischer Information finden sie wieder zusammen.

Im Kapitel 1 wurde bereits auf die enge Beziehung von Information und Informationsaustausch (Kommunikation) hingewiesen. Ein solcher Austausch ist angewiesen auf den Gebrauch eines Mediums ("der Mittler"), um strukturelle Information mitzuteilen - sei es durch Sprache, Bücher, elektronische Medien usw., das heißt, auch die "direkte" Kommunikation ist nur als ein Spezialfall der indirekten Kommunikation anzusehen.

Für uns ist im folgenden die Frage von Interesse, wie sich durch den Austausch von Information Selbstorganisation vollzieht.

Es ist hier nicht der Platz, die Entwicklung des Selbstorganisationsgedankens bis in die Gegenwart hinein nachzuzeichnen;³⁴ nur zwei Anmerkungen seien hier gestattet:

1. Selbstorganisationstheorie heute umfaßt - auch in philosophischer Hinsicht - mehr als das, was Kant, der den Begriff als erster gebrauchte, darunter in bezug auf den Organismus verstehen

³⁴ vgl. dazu WOLFGANG KROHN, HANS-JÜRGEN KRUG, GÜNTER KÜPPERS (Hrsg.), *Konzepte von Chaos und Selbstorganisation in der Geschichte der Wissenschaften (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 3)*, Berlin: Duncker&Humblot, 1992, RAINER PASLACK, *Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines Wissenschaftsparadigmas*, Reihe: *Wissenschaftstheorie, Wissenschaft und Philosophie*, Bd. 32, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden 1991, RAINER PASLACK / PETER KNOST, *Zur Geschichte der Selbstorganisationsforschung: ideengeschichtliche Einführung und Bibliographie (1940-1990)*, Kleine, Bielefeld, 1990, WERNER EBELING, JAN FREUND, HORST MALCHOW, ANDREA SCHARNHORST, FRANK SCHWEITZER, OLE STEUERNAGEL, *Anwendungsmöglichkeiten von Prinzipien der Selbstorganisation (Studie für den SFB 230)*, in: *Analyse&Bewertung Zukünftiger Technologien: Technologieanalyse Nichtlineare Dynamik* (Hrsg. VDI-Technologiezentrum und DECHEMA im Auftrage des BMFT), Düsseldorf 1993, Anhang 2, 66 S.

wollte.³⁵ Unter verschiedenen Namen, wie Synergetik, Autopoiese, dissipative Strukturbildung, selbstreferentielle Systeme, Chaostheorie, haben sich inzwischen Konzepte etabliert, die die Herausbildung von Strukturen in der anorganischen und organischen Natur, in sozialen Systemen, bei Kognitionsprozessen oder komplexen künstlerischen Produktionen als Selbstorganisationsprozeß beschreiben. Die Breite der Anwendungen des Selbstorganisationsansatzes verdeutlicht, daß es sich dabei um einen fruchtbaren Zugang für das Verständnis komplexer dynamischer Systeme handelt.

2. Selbstorganisationstheorie heute ist noch weit davon entfernt, bereits als *einheitliches* Paradigma für die Wissenschaft zu gelten. Dem steht bisher nicht nur der unterschiedliche Begriffsapparat, sondern auch die teilweise Inkompatibilität der verschiedenen Konzepte entgegen.

Wir verwenden in diesem Aufsatz den Begriff "Selbstorganisationstheorie", um diese Konzepte unter einem Namen zusammenzufassen - ohne damit allerdings die zwischen ihnen bestehenden Unterschiede verwischen oder vereinheitlichen zu wollen. Der Schwerpunkt unserer weiteren Betrachtungen liegt dabei auf den naturwissenschaftlich orientierten Selbstorganisationskonzepten.

Wollte man den Kerngedanken der Selbstorganisationstheorie auf einfache Weise zusammenfassen, dann könnte man diesen Zugang als "bottom-up" anstelle eines "top down"-Zuganges bezeichnen, wie er für hierarchische Planungsstrukturen kennzeichnend ist. In der Selbstorganisationstheorie unterscheidet man zwischen einer mikroskopischen Ebene, auf der "Individuen" mit relativer Freiheit miteinander wechselwirken, und einer makroskopischen Ebene des Gesamtsystems. Die "Individuen" der mikroskopischen Ebene können physikalische Teilchen, aber auch biologische Zellen, ökonomische Agenten oder Autos oder Fußgänger sein. Auf der makroskopischen Ebene entstehen aus der Wechselwirkung dieser "Individuen" neue Eigenschaften des Gesamtsystems, die als Strukturen sichtbar werden. Je nachdem, welches System betrachtet wird, können dies physikochemische Strukturen, Zellverbände, Handelsmärkte, Verkehrsstaus oder virtuelle Fußgängergruppen sein. Die Herausbildung derartiger Strukturen wird als Emergenzphänomen bezeichnet, weil die neuen Systemqualitäten sich zumeist sprunghaft herausbilden.

Um zu verstehen, wie diese Strukturen entstehen, muß die mesoskopische Ebene berücksichtigt werden, die zwischen der mikroskopischen und der makroskopischen Ebene vermittelt. Auf dieser Ebene vollzieht sich die Dynamik, die den Strukturbildungsprozeß entscheidend beeinflusst: die Herausbildung von Ordnungsparametern, die das System "versklaven", sowie Konkurrenz und Selektion. Auf diese Weise haben wir einen wechselseitigen Zusammenhang zwischen der mikroskopischen und der makroskopischen Ebene: einerseits sind es die "Individuen", die Systeme konstituieren - andererseits "versklaven" Systeme ihre Individuen, wenn sie sich einmal etabliert haben.

³⁵ WOLFGANG KROHN, GÜNTER KÜPPERS, Die natürlichen Ursachen der Zwecke. Kants Ansätze zu einer Theorie der Selbstorganisation, in: WOLFGANG KROHN, HANS-JÜRGEN KRUG, GÜNTER KÜPPERS (Hrsg.), *Konzepte von Chaos und Selbstorganisation in der Geschichte der Wissenschaften (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 3)*, Berlin: Duncker&Humblot, 1992, S. 31-50

In dem Kontext dieses Aufsatzes ergeben sich aus diesem Zusammenhang zwei Fragen, die im folgenden beantwortet werden sollen: 1. Wie erfolgt die "Versklavung" von Individuen durch Informationsaustausch? 2. Welche Emergenzphänomene finden wir auf der globalen Informationsebene?

6.2 Generierung und Akkumulation von Information

Für die genauere Diskussion der Wechselwirkung von struktureller und funktionaler Information bedienen wir uns eines einfachen, an der Physik orientierten Modells³⁶, das einen Selbstorganisationsprozeß auf der Grundlage von Information simuliert.

Auf einer unstrukturierten Oberfläche soll sich eine Anzahl von Agenten bewegen. Diese Agenten sind gedächtnislos, das heißt, sie können selbst keine Information speichern und bewegen sich daher auch plan- und ziellos auf dieser Oberfläche.

Es stellt sich die Frage, inwieweit die Agenten tatsächlich gedächtnislos sein müssen. Diese Bedingung ist natürlich nicht notwendig - in den Wissenschaften, die sich mit *Artificial Life* und *Artificial Intelligence* beschäftigen, werden verschiedene Modelle für künstliche Agenten mit Gedächtnis diskutiert.³⁷ Wir haben diese Annahme hier verwendet, um zu zeigen, daß der Selbstorganisationsprozeß sich tatsächlich auf der Grundlage der rückgekoppelten Informationsgenerierung und -verwertung vollzieht und nicht auf irgendeine Art in den Individuen verankert ist (zum Beispiel durch spezielle Regeln, die Absichten, Wünsche, Ziele ausdrücken.)³⁸ In dem hier diskutierten Modell verhalten sich die Agenten eher wie physikalische Partikel, die spontan auf lokale Gradienten reagieren, ohne eine bestimmte Absicht zu verfolgen.

Allerdings generiert jeder Agent bei jedem Schritt Information, indem er lokal eine Markierung setzt; er schreibt mit dieser Markierung praktisch auf jeden Platz, den er aufgesucht hat: "hier war ich schon". Zunächst sollen alle Agenten dieselbe Art von Markierungen benutzen. Die Markierung codiert also Information auf materieller Grundlage. Da die Markierungen auf der Oberfläche gespeichert werden, ist die Information auf diese Weise unabhängig von den Agenten.

Die Markierungen selbst haben eine Eigendynamik, sie können verblassen und damit langsam wieder verschwinden, wenn sie nicht ständig erneuert werden. Wenn andererseits ein Platz (von einem oder verschiedenen Agenten) mehrmals aufgesucht wird, nimmt die Stärke der Markierung zu; die

³⁶ FRANK SCHWEITZER, LUTZ SCHIMANSKY-GEIER, Clustering of active walkers in a two-component reaction-diffusion system, *Physica A* **206** (1994) 359-379, (dies.), Clustering of Active Walkers: Phase Transitions from Local Interactions, in: M. MILLONAS (Ed.), *Fluctuations and Order: The New Synthesis*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1996, pp. 293-305

³⁷ vgl. zum Beispiel: J.-A. MEYER, S.W. WILSON (Eds.), *From Animals to Animats*, Proc. 1st Intern. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior, Cambridge, MA: MIT Press, 1991, CHRISTOPHER G. LANGTON (Ed.), *Artificial Life III.*, Proc. Workshop on Artificial Life, June 1992, Santa Fe, NM, Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity, Proc. Vol. XVII, Reading, MA: Addison-Wesley, 1994

³⁸ vgl. dazu PATTY MAES (Ed.), *Designing Autonomous Agents. Theory and Practice From Biology to Engineering and Back*, Cambridge, MA: MIT Press, 1992

Information kann also lokal akkumuliert werden. Außerdem kann die Information sich eigenständig ausbreiten (hier durch Diffusion der Markierungen). Die Oberfläche ist damit charakterisiert durch eine Informationsdichte $b(r, t)$, die angibt wie stark die Markierung an einem bestimmten Ort r zu einer gegebenen Zeit t ist.

Diese Information wiederum kann von jedem Agenten gelesen werden, wenn sie sich direktem Umkreis seines Platzes befindet (Bei einer Realisierung auf einem Gitter bedeutet dies, daß der Agent genau die nächsten Nachbarplätze erkennen kann, nicht aber Gitterplätze, die mehr als einen Schritt entfernt sind.) Werden Markierungen in der unmittelbaren Umgebung entdeckt, dann können sie die Bewegungsrichtung des Agenten beeinflussen: der Agent wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit der stärksten Markierung folgen. Da das Modell probabilistisch ist, existiert allerdings stets auch die Möglichkeit, daß der Agent eine zufällige Richtung einschlägt, obwohl er eine Markierung gefunden hat.

Bevor wir die Dynamik dieses Modells diskutieren, soll der Bezug zu den oben eingeführten Informationsbegriffen hergestellt werden. Die strukturelle Information ist hier gegeben durch die Informationsdichte $b(r, t)$, die natürlich auch als symbolische Sequenz dargestellt werden kann. Sie existiert auf "materieller Grundlage" in Form von Markierungen. Die Informationsdichte an einem bestimmten Ort r gibt zugleich die lokale Information an.

Die funktionale Information, die die Aufgabe hat, die strukturelle Information im Hinblick auf den Rezipienten zu interpretieren, existiert im vorliegenden Modell als ein Satz von einfachen Regeln, nach denen ein Agent verfährt - also durch das kleine Programm, das er fortlaufend abarbeitet:

1. der Agent prüft *lokal*, ob sich in seiner unmittelbaren Umgebung Markierungen befinden,
2. der Agent fällt eine Entscheidung über die Richtung des nächsten Schrittes in Abhängigkeit von der Stärke der lokalen Markierungen,
3. der Agent setzt an seinen jetzigen Platz eine Markierung,
4. der Agent bewegt sich auf seinen neuen Platz und wiederholt dann 1.

Mit den Regeln (1) bis (4) ist vorgegeben, was die Agenten an Wirk-Information aus der vorhandenen strukturellen Information herauslesen können, das heißt, die funktionale Information ermöglicht den Übergang von struktureller zu pragmatischer Information. Dabei zeigt sich, daß strukturelle und funktionale Information durchaus unterschiedlichen Charakter haben: im betrachteten Beispiel ist die strukturelle Information einfach ein skalares Feld, während die funktionale Information einen *Algorithmus* darstellt, durch den diesem Feld pragmatische Information entnommen werden kann.

Dieser Algorithmus kann in der Tat von sehr simplen, gedächtnislosen Agenten abgearbeitet werden, da es keinerlei *interner* Informationsspeicherung bedarf - physikalisch gesehen, bewegen sich die Agenten fortlaufend in die Richtung des größten lokalen Gradienten eines Potentials, das sie selbst

verändern können. Da die Agenten nicht *direkt*, sondern nur über die externe Informationsdichte miteinander wechselwirken, beschreibt das vorliegende Modell eine *indirekte Kommunikation*, die sich über den Zyklus "schreiben - lesen - handeln" vollzieht.

Der Selbstorganisationsprozeß, der sich auf der Grundlage dieser indirekten Kommunikation vollzieht, soll am Beispiel einer Computersimulation erläutert werden (Abb. 4). Die Bilder 4 a-f stellen die Informationsdichte $b(r, t)$ zu verschiedenen Zeitpunkten dar. Ausgangszustand der Simulation war eine Oberfläche ohne jegliche Markierungen, auf der 100 Agenten zufällig verteilt wurden.

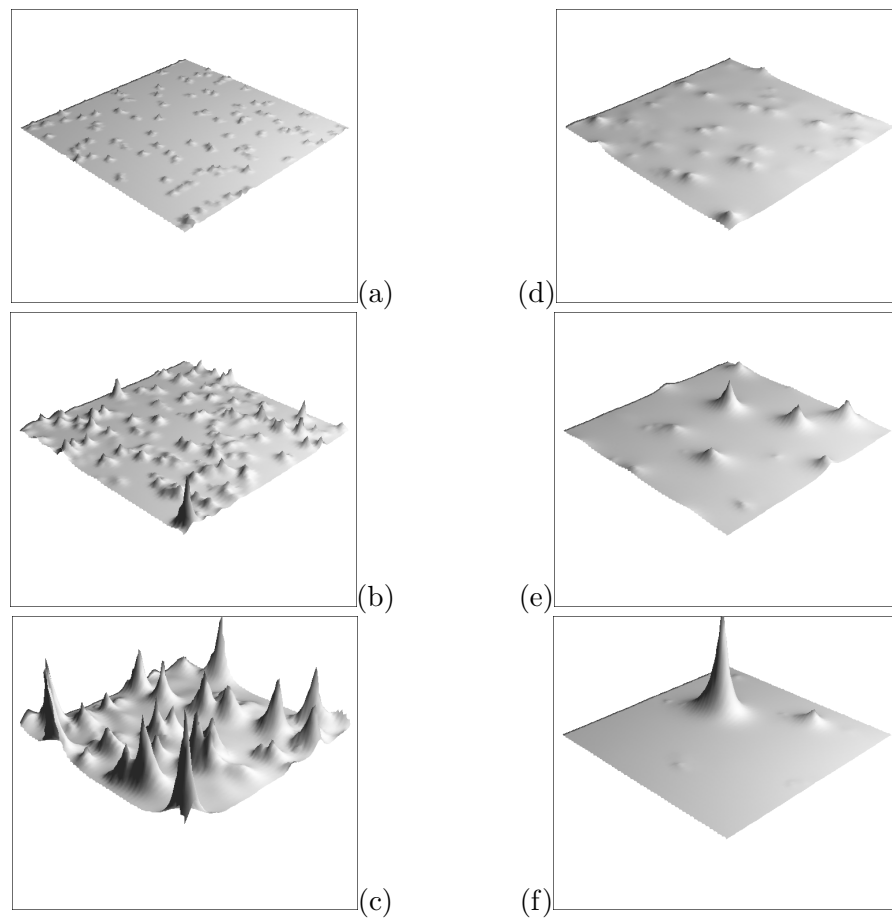


Abbildung 4: Entwicklung der Informationsdichte $b(r, t)$ nach (a) 10, (b) 100, (c) und (d) 1000, (e) 5000 und (f) 50000 Simulationsschritten. (Anzahl der Agenten: 100, trianguläres Gitter der Größe 100×100). Bei den Abb. d-f wurde der Maßstab gegenüber Abb. a-c um das 10fache vergrößert, um die weitere Entwicklung der Informationsdichte zu erfassen. Die Dichte von Abb. (d) entspricht damit derjenigen von Abb. (c) bei einem 10fach vergrößerten Maßstab.³⁹

In Abb. 4a sehen wir, daß von den Agenten zunächst lokal Information in Form von Markierungen aufgebaut wird. Dabei läuft ein Selbstverstärkungsprozeß ab (Abb.4 b,c), denn dort, wo der Agent eine Markierung findet, setzt er mit einer größeren Wahrscheinlichkeit wieder eine - aber wenn dies nicht fortlaufend geschieht, verblasen die Markierungen wieder, außerdem können sie diffundieren.

Die Simulation zeigt deutlich zwei verschiedene dynamische Regimes für die Entwicklung der Informationsdichte: anfänglich existiert eine Phase, wo an *vielen* Orten lokal Information angehäuft wird, erkenntlich an den hohen *spikes*, die die Maxima der Informationsdichte markieren und daher mit *Informationszentren* vergleichbar sind. Dann aber folgt eine Phase (Abb. 4 d-f), in der diese Informationszentren beginnen, miteinander zu konkurrieren - was dazu führt, daß die Zahl der *spikes* wieder abnimmt - bis sich schließlich ein Zentrum durchgesetzt hat.

Worum konkurrieren diese Zentren? Sie konkurrieren um die Agenten, die die Information, in diesem Fall die Markierungen, erst produzieren! Durch die Diffusion bedingt, existiert die Information natürlich überall, aber sie hat nicht überall einen überkritischen Wert, sondern nur in den Zentren. Die Agenten, in ihrem Bestreben, sich in die Richtung der größten lokalen Informationsdichte zu bewegen, werden auf diese Weise nach und nach in die verschiedenen lokalen Informationszentren hineingezogen. Bei einer begrenzten Zahl von Agenten können aber nicht alle Informationszentren gleichermaßen wachsen, so daß letztlich nur diejenigen überleben, die das größte Attraktionspotential auf die Agenten ausüben, während die anderen Zentren nach und nach ihre ehemals überkritische Größe verlieren und wieder verschwinden. Die damit frei werdenden Agenten werden von den noch existierenden Zentren gebunden, so daß die produzierte Information mit der Zeit in immer weniger Zentren akkumuliert wird. Für diesen Konkurrenz- und Selektionsprozeß können Selektionsgleichungen hergeleitet werden, die dieselbe Form haben wie die bekannten Eigen-Fischer-Gleichungen für die präbiotische Evolution.⁴⁰

Die nichtlineare Rückkopplung der Informationsdichte $b(r, t)$ auf die Bewegung der Agenten wird durch das Haken'sche *Versklavungsprinzip*⁴¹ adäquat beschrieben: Die Agenten schaffen durch die Produktion von Markierungen gemeinsam eine Informationsebene, über die sie miteinander kommunizieren. Wenn diese Ebene einmal existiert und ihr Einfluß durch eine ausreichenden Informationsdichte $b(r, t)$ überkritisch geworden ist, dann beginnt sie, das weitere Verhalten der Agenten zu versklaven, indem aus der ehemals freien Bewegung der Agenten auf der Oberfläche mit der Zeit eine gebundene Bewegung wird, die sich um die erst geschaffenen Informationszentren konzentriert.

³⁹ aus: FRANK SCHWEITZER, LUTZ SCHIMANSKY-GEIER, Clustering of active walkers in a two-component reaction-diffusion system, *Physica A* **206** (1994) 359-379

⁴⁰ FRANK SCHWEITZER, LUTZ SCHIMANSKY-GEIER, Clustering of active walkers in a two-component reaction-diffusion system, *Physica A* **206** (1994) 359-379

⁴¹ HERMANN HAKEN, *Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions in Physics, Chemistry and Biology*, Berlin: Springer, 2. Aufl. 1978

6.3 Erzeugung eines kollektiven Gedächtnisses

Die Wirkung dieses Versklavungsprinzips soll im Hinblick auf die Generierung eines kollektiven Gedächtnisses näher untersucht werden.⁴²

Dazu betrachten wir das eben diskutierte Modell in einer etwas abgewandelten Form: die Agenten verfügen über dieselbe funktionale Information wie bisher, allerdings mit dem Unterschied, daß sie nur Markierungen erkennen können, die sich in dem Halbkreis vor ihnen befindet, der in Bewegungsrichtung liegt. (Praktisch heißt dies, die Agenten können nicht *zugleich* nach vorn und nach hinten schauen - natürlich können sie aber zufällig ihre Bewegungsrichtung umkehren.) Außerdem nehmen wir an, daß die Information jetzt nicht diffundiert, aber die Markierungen können wie bisher verblassen.

Unter diesen Modifikationen erhalten wir mit demselben Modell eine andere Struktur der Informationsdichte $b(r, t)$; es sind keine Informationsspiques mehr, sondern die Markierungen bilden Spuren, die die Wege kennzeichnen, die die Agenten beschritten haben (Abb. 5). Auch hier gibt es wieder Konkurrenz und Selektion: Spuren, die nicht ständig verstärkt werden, verschwinden wieder. Die Struktur, die zum Schluß erhalten wird, entspricht genau dem Wegenetz, das die Agenten letztlich gemeinschaftlich unterhalten können. Dabei ist, bedingt durch den Einfluß von Fluktuationen während der Herausbildung des Wegenetzes, jede der entstehenden Strukturen einmalig.

Interpretiert man diesen Vorgang, dann ist in dieser Struktur praktisch die Geschichte der Agenten-Community festgeschrieben: die Struktur ist historisch durch das gemeinschaftliche Handeln aller Agenten entstanden, und sie hat alle Aktionen der Agenten hinsichtlich der dabei generierten Information gespeichert, wobei diese Information mit der Zeit auch wieder verblassen kann. Für die Agenten, die selbst kein Gedächtnis haben, repräsentiert diese Struktur eine Art *kollektives Gedächtnis*, in dem durch die Informationsdichte $b(r, t)$ genau die Information angegeben wird, die nach einer bestimmten Zeit noch im System *verfügbar* ist. Verfügbarkeit bedeutet hier, daß diese Information (als strukturelle Information) tatsächlich noch durch funktionale Information aktiviert werden kann und damit *wirksam* wird.

In dieses kollektive Gedächtnis gehen die Informationen, die zu unterschiedlichen Zeiten generiert wurden, gewichtet ein. Dieser Prozeß ist aber durch die nichtlineare Rückkopplung durchaus differenziert zu betrachten: natürlich ist die Information, die in den frühen Stadien der Entwicklung generiert wurde, längst verblaßt - auf der anderen Seite waren die ersten Markierungen, die von den Agenten gesetzt wurden, auch diejenigen, durch die das System seine frühe Prägung erhalten hat. Dieser Vorgang wird in der Physik als Symmetriebrechung bezeichnet: bevor überhaupt Markierungen gesetzt wurden, ist die Symmetrie des Systems noch erhalten - das heißt, es gibt keine

⁴² vgl. dazu auch FRANK SCHWEITZER, Strukturelle, funktionale und pragmatische Information - zur Kontextabhängigkeit und Evolution der Information, in: N. FENZL, W. HOFKIRCHNER, G. STOCKINGER (Hrsg), *Information und Selbstorganisation. Annäherung an eine vereinheitlichte Theorie der Information*, Studien-Verlag, Innsbruck-Wien 1998, S. 341-364

Unterscheidung zwischen markierten und nicht markierten Plätzen. Mit dem Setzen von Markierungen aber wird diese Unterscheidung existent und die Symmetrie des Systems ist gebrochen. Symmetriebrüche sind ein charakteristisches Merkmal von Evolutionsprozessen, vergleichbar der Entscheidung von Alternativen bzw. der Bifurkation des Systemverhaltens an kritischen Punkten.⁴³

Die frühe Information kann im Verlauf der Evolution des Systems durch "Verwertung" verstärkt werden; wird sie ständig "aufgefrischt", dann steht sie auf diese Weise auch noch zu späteren Zeiten zur Verfügung. Wird sie aber nicht laufend verstärkt, dann verblaßt sie mit der Zeit und hat auf die spätere Entwicklung des Systems keinen entscheidenden Einfluß mehr. In diesem Zusammenhang sei noch einmal auf die im Kapitel 5.1. erwähnte These C.F. v. Weizsäcker verwiesen, die wie folgt kommentiert wird: "Information existiert nur, wenn und insofern Information erzeugt wird."⁴⁴

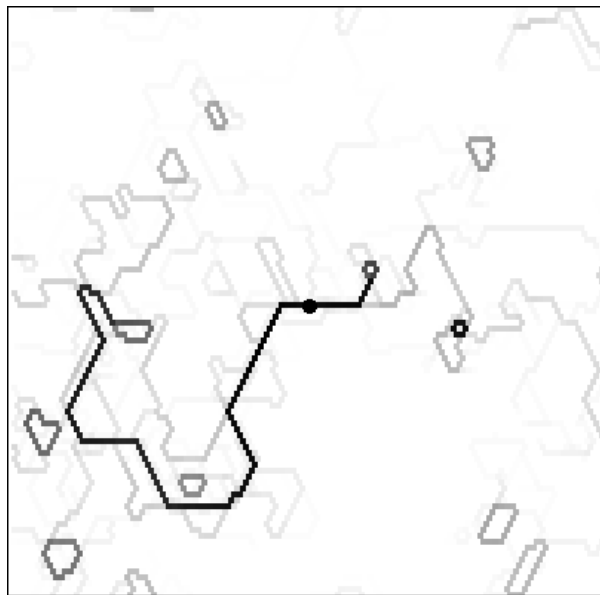


Abbildung 5: Informationsdichte $b(r, t)$ nach 10000 Simulationsschritten (Anzahl der Agenten: 100, trianguläres Gitter der Größe 100x100). Anhand der Stärke der Markierungen ist deutlich die Herausbildung von Haupt- und Nebenwegen zu erkennen.⁴⁵

⁴³ vgl. zum Beispiel: GREGOIRE NICOLIS, ILYA PRIGOGINE, *Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaft*, München: Piper, 1987, darin: Abschnitt 2.7. "Bifurkation und Symmetriebrechung", S. 108-112

⁴⁴ CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, *Die Einheit der Natur*, München: dtv, 1974, S. 352

⁴⁵ aus: DIRK HELBING, PETER MOLNAR, FRANK SCHWEITZER, *Computer Simulation of Pedestrian Dynamics and Trail Formation*, in: *Evolution of Natural Structures. Principles, Strategies, and Models in Architecture and Nature* (Proc. III. International Symposium of the SFB 230), Stuttgart 1994, pp. 229-234, vgl. auch: DIRK HELBING, MARTIN HILLIGES, PETER MOLNAR, FRANK SCHWEITZER, ARNE WUNDERLIN, *Strukturbildung dynamischer*

Auf diese Weise charakterisiert die Struktur, die hier als Beispiel diskutiert wird, tatsächlich ein kollektives Gedächtnis für die Agenten. Nur diejenigen Wege, die wirklich ständig benutzt und damit aufgefrischt werden, bleiben im Verlauf der Entwicklung erhalten. Daneben können zu allen Zeiten auch stets neue Markierungen gesetzt werden: die Agenten sind nicht gezwungen, sich stets auf alten, eingefahrenen Wegen zu bewegen, sondern sie haben (im Rahmen eines probabilistischen Modells) auch die Möglichkeit, "Neuland zu betreten". Die Frage ist aber, ob die damit generierte neue Information im Verlauf der Evolution auch weiter verstärkt und als neuer "Aus-Weg" akzeptiert wird, oder ob sie mit der Zeit wieder verblaßt und vergessen wird. Hier wird der Versklavungseffekt durch die einmal hervorgebrachten Wege deutlich: je stärker die Wege ausgebaut sind, das heißt, je mehr die Information auf bestimmte Bereiche beschränkt ist, um so schwerer ist es, daß sich neue Wege etablieren.

Das kollektive Gedächtnis versklavt die Agenten, indem es sie bevorzugt auf vorhandene Wege einschränkt - da aber andererseits dieses kollektive Gedächtnis erst durch die Agenten hervorgebracht wurde, werden die Agenten letztlich von ihrer eigenen Geschichte versklavt, die ihre Gegenwart mitbestimmt.

6.4 Mehrwertige Information

Abschließend sei noch ein weiterer Aspekt des bereits behandelten Modells diskutiert. Dazu werden, unter Beibehaltung der prinzipiellen Dynamik des Modells, einige weitere Modifikationen eingeführt.

Wir nehmen an, daß die Agenten jetzt ein Zentrum haben (Nest, Haus, Stadt usw.), das mit verschiedenen Plätzen in der Umgebung (Futterplätze, Handelsplätze usw.) verbunden werden soll. Diese Verbindungen sollen wiederum von gedächtnislosen Agenten aufgebaut werden, das heißt von Agenten, die wissen weder, wo die Futterplätze sind, noch wo ihr Nest ist. Diese Aufgabe ist in der Tat ohne Vorwissen und ohne Navigation lösbar und hat eine eminente praktische Bedeutung für jegliche Art von selbstorganisierter Netzwerkbildung.⁴⁶ Die Agenten haben keine Repräsentanz ihrer Umgebung; alles, was sie "wissen", ist durch die vorgegebene funktionale Information (Algorithmus) und durch die strukturelle Information (Markierungen) bestimmt. Die Agenten handeln dabei ausschließlich *lokal*: die Markierung wird lokal gelesen und lokal geschrieben, die Richtung für die weitere Bewegung wird lokal bestimmt und die Entscheidung darüber ist sofort vergessen, da sie nicht gespeichert werden kann.

In dem Modell wird angenommen, daß die Agenten, die einen Futterplatz entdeckt haben, von den nicht erfolgreichen Agenten dadurch unterschieden werden, daß sie für die weitere Markierung eine

Systeme, in: Die Architektur des Komplexen, ARCH+ 121 (März 1994), S. 69-75

⁴⁶ Zur biologischen Relevanz dieses Modells vgl. FRANK SCHWEITZER, KEN LAO, FERREYDOON FAMILY, Active Random Walker Simulate Trunk Trail Formation by Ants, *BioSystems* 41 (1997) 153-166

andere Farbe verwenden (zum Beispiel rot statt blau). Es ändert sich, wohlgermerkt, nicht der Algorithmus, sondern nur die Art der Markierung: von den erfolgreichen Agenten wird also zusätzliche *strukturelle* Information generiert. Falls ein erfolgreicher Agent anhand alter (blauer) Markierungen zum Ausgangszentrum zurückfindet, verläßt eine Anzahl weiterer Agenten das Zentrum. Diese Agenten können nur durch erfolgreiche Agenten aktiviert werden, und sie richten sich auch nur nach den (roten) Markierungen, die der erfolgreiche Agent gesetzt hat, während sie selbst, solange sie noch nicht erfolgreich sind, noch blaue Markierungen setzen. Sind sie selbst erfolgreich, dann machen sie es genau umgekehrt - sie setzen die rote Markierungen und sehen nach den blauen.

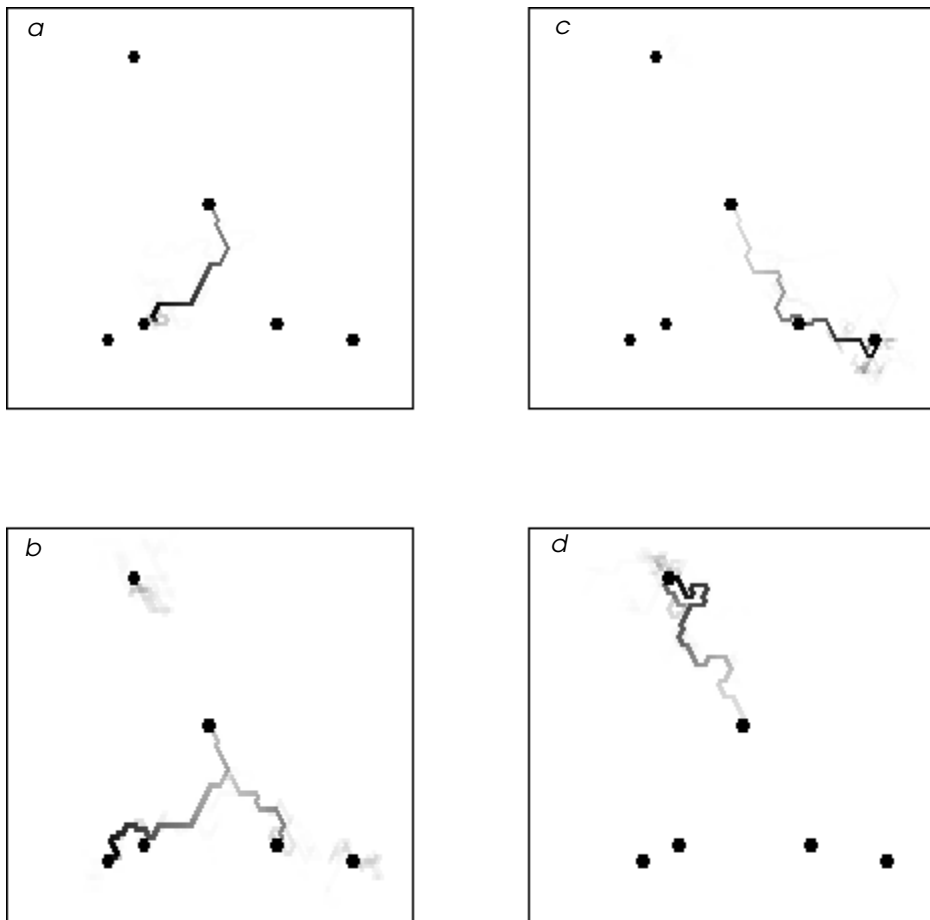


Abbildung 6: Herausbildung von Verbindungen zwischen einem Zentrum und fünf umliegenden Plätzen durch lokale Interaktion von künstlichen Agenten unter Verwendung von zwei verschiedenen Markierungen. Die Abb. zeigen die Gesamtdichte der Information nach (a) 2000, (b) 4000, (c) 8500 und (d) 15000 Simulationsschritten.⁴⁷

Durch diese Modifikation des Modells existieren also zwei verschiedene Arten struktureller Information im System: die der erfolgreichen Agenten und die der nicht erfolgreichen, wobei die nicht erfolgreichen Agenten, die durch die erfolgreichen rekrutiert oder aktiviert wurden, versuchen, sich immer nach der Information der erfolgreichen Agenten zu richten, sofern diese verfügbar ist.

In der Computersimulation dieses Modells lassen sich wiederum zwei verschiedene dynamische Regimes beobachten: Zunächst startet ein Schwarm von Agenten, die unkorrelierte Bewegungen ausführen und zufällig Erfolg haben, indem sie einen der Futterplätze entdecken. Damit beginnen sie, eine Spur des Erfolgs zu legen und die Informationslandschaft entscheidend zu verändern. Gelingt es ihnen, zum Zentrum zurückzukehren und andere Agenten zu aktivieren, dann kann diese Spur verstärkt werden, wobei der Übergang in das zweite dynamische Regime erfolgt. Dieses ist optisch eindrücklich sichtbar in der Entstehung eines Weges zwischen dem Zentrum und dem Futterplatz (Abb. 6 a-d).

Dieser Weg ist ein echtes Emergenzphänomen, das durch einen Selbstorganisationsprozeß entsteht. Es ist weder im Algorithmus, noch in den Markierungen vorgeschrieben, daß die Agenten einen Weg zu bauen hätten, dies geschieht einzig durch die Art der nichtlinearen Rückkopplung zwischen den Agenten.

In dem hier diskutierten Modell bricht die Struktur schlagartig durch und nicht etwa allmählich: sobald die Erfolgswinformation einen kritischen Wert übersteigt, entsteht der Weg innerhalb sehr kurzer Zeit. Das heißt, die Existenz des Weges ist an die Existenz der einer überkritischen Erfolgswinformation geknüpft - nur die Erfolgswinformation vermag die Agenten zu den Plätzen zu leiten, wo sie beispielsweise Ressourcen ausbeuten können (in Form von Futterquellen).

Die Existenz des Weges versklavt natürlich wiederum die weitere Entwicklung des Systems, da die Agenten infolge der hohen Informationsdichte, die sich in den Wegen akkumuliert hat, zum großen Teil an diese gebunden sind. Wenn aber beispielsweise, wie in dem hier diskutierten Modell simuliert, die Ressourcen an den entsprechenden Plätzen aufgebraucht sind, dann wird von den Agenten keine Erfolgswinformation mehr produziert und der Weg, der praktisch nutzlos geworden ist, beginnt wieder zu verblassen - das heißt, die gespeicherte Information wird nach und nach vergessen. Statt dessen entdecken die nun "freien" Agenten neue Futterquellen, zu denen neue Wege aufgebaut werden (Abb. 6 b-d). Natürlich macht sich auch hier der Einfluß der vorhandenen Prägungen bemerkbar, was daran ersichtlich ist, daß auch bei den neuen Wegen Teile der alten Wege integriert werden, sofern sie Verwendung finden können.

⁴⁷ aus: FRANK SCHWEITZER, KEN LAO, FEREDOON FAMILY, Active Random Walker Simulate Trunk Trail Formation by Ants, *BioSystems* **41** (1997) 153-166

7 Zusammenfassende Diskussion

Die vorhergehenden Abschnitte haben anhand eines einfachen Modells gezeigt, wie sich eine Anzahl künstlicher Agenten über die Erzeugung und Verwertung von Information selbst organisiert und dabei gemeinschaftlich Strukturen aufbaut. Der Begriff Selbstorganisation hat hier durchaus seine Berechtigung, denn während des Prozesses wird in der Tat Information generiert - einer Vereinbarung von H. v. Foerster und K. Fuchs-Kittowski zufolge sollte der Begriff "Selbstorganisation" nur dort verwendet werden, wo tatsächlich Information entsteht, ansonsten soll der Begriff "Selbststrukturierung" Anwendung finden, der auch für konservative Systeme gilt.⁴⁸

Während des ablaufenden Selbstorganisationsprozesses wird mit Hilfe von funktionaler Information ständig aus vorhandener struktureller Information pragmatische Information gewonnen. Diese pragmatische Information beeinflusst die Bewegung der Agenten und hat daher einen Einfluß auf die weitere Erzeugung struktureller Information.

Die Entstehung von Information läuft auf zwei verschiedenen Ebenen ab: Zum einen entsteht die Information lokal, indem die Agenten Markierungen setzen, die die verschiedenen Plätze hinsichtlich der Informationsdichte voneinander unterscheiden; zum anderen wird auf der Ebene des Gesamtsystems eine neue Art von (globaler) Information erzeugt, die von dem einzelnen Agenten nicht als Ganzes wahrgenommen werden kann, gleichwohl aber dessen Aktion beeinflusst.

Diese globale Information wurde hier in Analogie zu einem kollektiven Gedächtnis diskutiert, das durch drei verschiedene Prozesse strukturiert wird:

- (a) die gemeinschaftliche Generierung von neuer Information,
- (b) die gemeinschaftliche Erhaltung von vorhandener Information,
- (c) das schrittweise Vergessen von Information, die nicht ständig verstärkt wird.

Auf diese Weise werden die individuellen Agenten, die selbst kein Gedächtnis haben und für die es kein Vergessen und Erinnern gibt, rückgekoppelt mit der Geschichte ihres Gesamtsystems konfrontiert. Das kollektive Gedächtnis ist gewissermaßen die Ebene, über die die Agenten indirekt miteinander kommunizieren, indem sie "schreiben, lesen und handeln".

Diese Ebene spielt in der Synergetik die Rolle des Ordners, der, von den Agenten gemeinschaftlich kreiert, auf deren Bewegung zurückwirkt und diese versklavt. Durch die Rückkopplung zwischen der Ebene der Agenten und der Ebene des kollektiven Gedächtnisses können sich beide nur gleichzeitig, also im Sinne einer Ko-Evolution, entwickeln - die sich dabei vollziehende Ausdifferenzierung der Informations-"Landschaft" erfolgt also selbstreferentiell und nicht durch Steuerung von außen. In dem dabei ablaufenden Selbstorganisationsprozeß können sich, je nachdem, ob die Information

⁴⁸ KLAUS FUCHS-KITTOWSKI, private Mitteilung

diffundieren kann oder nicht oder ob verschiedene Arten von struktureller Information zugelassen werden, durchaus verschiedene Strukturen innerhalb der Informations-"Landschaft" etablieren, so daß Selbstorganisation und Entstehung von Information hier eng miteinander verkoppelt sind. Dies weist auf die *aktiven Rolle von Information* im Strukturbildungsprozeß hin.

Der Vorteil des hier diskutierten Modells liegt unter anderem darin, daß auf eine sehr einsichtige Weise gezeigt werden kann, wie emergente Strukturen durch nichtlineare, indirekte Wechselwirkung zwischen Agenten entstehen können - ein Prozeß, bei dem Komplexität generiert wird: durch die kollektive Wechselwirkung der Agenten werden komplizierte Aufgaben gelöst (wie das Entdecken und Verbinden von vorher nicht bekannten Punkten), die auf der Ebene des Individuums gar nicht "verstanden" werden können, weil es keine Entsprechung dafür gibt.

Um von hieraus den Bogen zur Diskussion um die syntaktische und pragmatische Information zu schlagen: Information ist, zumindest im Rahmen dieses Modells, darauf angewiesen, daß sie wahrgenommen, rezipiert wird. Ein Buch, das niemand liest, ist in diesem Sinne soviel wert wie ein Buch, das nicht geschrieben wurde. Nur die Information, die wirkt, bleibt als Information bestehen, alle andere Information wird vergessen.

Diese Einsicht freilich wird nur im Rahmen eines *evolutiven* Verständnisses von Information möglich, und nicht durch einen Informationsbegriff, der sich allein an die syntaktische oder strukturelle Ebene der Information hält. Wirksame, pragmatische Information ist keine Invariante der Entwicklung, sondern sie *entsteht* ständig neu durch das komplementäre Verhältnis von funktionaler und struktureller Information - und zwar als faktische, nicht als potentielle Information.

Literatur

- H. ATMANSPACHER, H. SCHEINGRABER (Eds.): *Information Dynamics*, New York: Plenum Press, 1991
- H. BAI-LIN, *Elementary Symbolic Dynamics*, Singapore: World Scientific, 1989
- Y. BAR-HILLEL, *Semantic Information and its Measures*, in: Y. BAR-HILLEL (Ed.): *Language and Information*, Reading, Mass. 1964, pp. 221-274
- RAFAEL CAPURRO, *On the Genealogy of Information*, in: K. KORNWACHS, K. JACOBY (Eds.), *Information. New Questions to a Multidisciplinary Concept*, Berlin: Akademie-Verlag, 1996, pp. 259-270
- R. CARNAP, Y. BAR-HILLEL, *On the Outline of a Theory of Semantic Information [1952]*, in: Y. BAR-HILLEL, *Language and Information*, Reading, Mass. 1964, pp. 221-274
- WERNER EBELING, RAINER FEISTEL, *Chaos und Kosmos. Prinzipien der Evolution*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994, S. 193

- WERNER EBELING, JAN FREUND, HORST MALCHOW, ANDREA SCHARNHORST, FRANK SCHWEITZER, OLE STEUERNAGEL, Anwendungsmöglichkeiten von Prinzipien der Selbstorganisation (Studie für den SFB 230), in: *Analyse&Bewertung Zukünftiger Technologien: Technologieanalyse Nichtlineare Dynamik* (Hrsg. VDI-Technologiezentrum und DECHEMA im Auftrag des BMFT), Düsseldorf 1993, Anhang 2, 66 S.
- WERNER EBELING, ALEXANDER NEIMAN, Long-range correlations between letters and sentences in texts, *Physica A* **215** (1995) 233-241
- WERNER EBELING, GREGOIRE NICOLIS, Entropy of Symbolic Sequences: the Role of Correlations, *Europhys. Lett.* **14** (1991) 191,
- WERNER EBELING, THORSTEN PÖSCHEL, Long range correlations in literary English, *Europhys. Lett.* **26** (1994) 241
- RAINER FEISTEL, Ritualisation und die Selbstorganisation der Information, in: UWE NIEDERSEN, LUDWIG POHLMANN (Hrsg.): *Selbstorganisation und Determination (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 1)*, Berlin: Duncker&Humblot, 1990, S. 83-98,
- JAN FREUND, Information, Long-Range Correlations and Extended Memory of Symbol Sequences, in: K. KORNWACHS, K. JACOBY (Eds.), *Information. New Questions to a Multidisciplinary Concept*, Berlin: Akademie-Verlag, 1996
- PETER GRASSBERGER, Estimation of Information Content of Symbol Sequences and Efficient Codes, *IEEE Trans. Inf. Theory* **35** (1989) 669;
- HERMANN HAKEN, MARIA HAKEN-KRELL, *Entstehung biologischer Information und Ordnung*, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1989;
- HERMANN HAKEN, Die Selbstorganisation der Information in biologischen Systemen aus der Sicht der Synergetik, in: BERND-OLAF KÜPPERS (Hrsg.): *Ordnung aus dem Chaos. Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution des Lebens*, München: Piper, 1987, S. 127-156
- HERMANN HAKEN, *Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions in Physics, Chemistry and Biology*, Berlin: Springer, 2. Aufl. 1978
- DIRK HELBING, PETER MOLNAR, FRANK SCHWEITZER, Computer Simulation of Pedestrian Dynamics and Trail Formation, in: *Evolution of Natural Structures. Principles, Strategies, and Models in Architecture and Nature (Proc. III. International Symposium of the SFB 230)*, Stuttgart 1994, pp. 229-234,

- DIRK HELBING, MARTIN HILLIGES, PETER MOLNAR, FRANK SCHWEITZER, ARNE WUNDERLIN, Strukturbildung dynamischer Systeme, in: *Die Architektur des Komplexen*, ARCH+ 121 (März 1994), S. 69-75
- WOLFGANG KROHN, GÜNTER KÜPPERS (Hrsg.), *Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*, Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1992
- WOLFGANG KROHN, GÜNTER KÜPPERS, Die natürlichen Ursachen der Zwecke. Kants Ansätze zu einer Theorie der Selbstorganisation, in: WOLFGANG KROHN, HANS-JÜRGEN KRUG, GÜNTER KÜPPERS (Hrsg.), *Konzepte von Chaos und Selbstorganisation in der Geschichte der Wissenschaften (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 3)*, Berlin: Duncker&Humblot, 1992, S. 31-50
- CHRISTOPHER G. LANGTON (Ed.): *Artificial Life III., Proc. Workshop on Artificial Life, June 1992, Santa Fe, NM, Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity, Proc. Vol. XVII*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1994
- W. LI: On the Relationship Between Complexity and Entropy for Markov Chains and Regular Languages, *Complex Systems* 5 (1991) 399
- PATTY MAES (Ed.): *Designing Autonomous Agents. Theory and Practice From Biology to Engineering and Back*, Cambridge, MA: MIT Press, 1992
- J.-A. MEYER, S.W. WILSON (Eds.): *From Animals to Animats, Proc. 1st Intern. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*, Cambridge, MA: MIT Press, 1991,
- GREGOIRE NICOLIS, ILYA PRIGOGINE, *Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaft*, München: Piper, 1987, darin: Abschnitt 2.7. "Bifurkation und Symmetriebrechung", S. 108-112
- RAINER PASLACK, *Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines Wissenschaftsparadigmas*, Reihe: *Wissenschaftstheorie, Wissenschaft und Philosophie*, Bd. 32, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden 1999
- RAINER PASLACK UND PETER KNOST, *Zur Geschichte der Selbstorganisationsforschung: ideengeschichtliche Einführung und Bibliographie (1940-1990)*, Kleine, Bielefeld, 1990
- G. ROTH, *Kognition - Die Entstehung von Bedeutung im Gehirn*, in: WOLFGANG KROHN, GÜNTER KÜPPERS (Hrsg.): *Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*, Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1992
- FRANK SCHWEITZER, *Strukturelle, funktionale und pragmatische Information - zur Kontextabhängigkeit und Evolution der Information*, in: N. FENZL, W. HOFKIRCHNER, G.

- STOCKINGER (Hrsg.), *Information und Selbstorganisation. Annäherung an eine vereinheitlichte Theorie der Information*, Studien-Verlag, Innsbruck–Wien 1998, S. 341-364
- FRANK SCHWEITZER, KEN LAO, FERREYDOON FAMILY, Active Random Walker Simulate Trunk Trail Formation by Ants, *BioSystems* **41** (1997) 153-166
- FRANK SCHWEITZER, LUTZ SCHIMANSKY-GEIER, Clustering of active walkers in a two-component reaction-diffusion system, *Physica A* **206** (1994) 359-379
- FRANK SCHWEITZER, LUTZ SCHIMANSKY-GEIER, Clustering of Active Walkers: Phase Transitions from Local Interactions, in: M. MILLONAS (Ed.), *Fluctuations and Order: The New Synthesis*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1996, pp. 293-305
- M. STADLER, P. KRUSE, Zur Emergenz psychischer Qualitäten, in: W. KROHN, G. KÜPPERS (Hrsg.): *Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*, Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1992
- TOM STONIER, *Information und die innere Struktur des Universums*, Berlin: Springer, 1991).
- CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, Quantentheorie elementarer Objekte, *Nova Acta Leopoldina*, N.F. Nummer 230, Band 49, S. 15
- CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, *Die Einheit der Natur*, München: dtv, 1974
- CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER, *Aufbau der Physik*, München: dtv, 3. Aufl. 1994
- E.V. WEIZSÄCKER, Erstmaligkeit und Bestätigung als Komponenten der pragmatischen Information, in: (ders.) (Hrsg.): *Offene Systeme*, Bd. I, Stuttgart 1974
- E. UND C. V. WEIZSÄCKER: Wiederaufnahme der begrifflichen Frage: Was ist Information, *Nova Acta Leopoldina*, N.F. Nummer 206, Band 37 (1972) 535-555
- M.W. WOLKENSTEIN, *Entropie und Information*, Thun: Deutsch, 1990