

# Strukturelle, funktionale und pragmatische Information

## Zur Kontextabhängigkeit und Evolution der Information

Frank Schweitzer

1. *Potentielle Information*
2. *Strukturelle Information*
3. *Pragmatische Information*
4. *Funktionale Information*
5. *Selbstorganisation und Generierung von Information in einem Modell künstlicher Agenten*
6. *Zusammenfassende Diskussion*

Die Zahl der Auffassungen zum Informationsbegriff scheint mit der Zeit eher zu- als abzunehmen. Von den sich dabei abzeichnenden Standpunkten sollen zumindest zwei hier erwähnt werden.

Da sind zunächst die Versuche, Information ontologisch zu interpretieren und ihr damit einen von aller Wahrnehmung unabhängigen Status zuzubilligen. So schreibt beispielsweise Stonier: „Information existiert. Um zu existieren, muß sie nicht wahrgenommen und nicht verstanden werden. ... Sie braucht keine Bedeutung, um zu existieren. Sie existiert einfach.“ (Stonier 1991: 14) In gleicher Weise äußert sich C. F. v. Weizsäcker: „Masse ist Information. Energie ist Information.“ (Weizsäcker, C. F. 1974: 361). Diese Auffassungen finden ihre Widerspiegelung in einer Physik der Informationsprozesse, die sich vornehmlich mit den rein formalen, syntaktischen Aspekten der Informationskodierung befaßt und damit beispielsweise in der Lage ist, noch aus scheinbar chaotischen Daten strukturelle Gesetzmäßigkeiten, Information, herauszuprojizieren.

Ein zweiter Standpunkt besteht darin, Information von einer algorithmischen Seite her zu verstehen, also unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung, wie es vornehmlich in der Informatik geschieht. Nach P. Schefe ist der zentrale Begriff der Informatik nicht die Information, sondern der Algorithmus (vgl. Schefe et. al. 1993).

Beiden Sichtweisen ist gemeinsam, daß sie Information stets schon als *gegeben* annehmen und die Frage nach der Entstehung von Information zugunsten einer pragmatischen Analyse von Information zurückstellen. Gerade dieses Problem wird aber von eminenter Bedeutung für ein Verständnis der Evolution (vgl. Küppers 1986)<sup>1</sup>. Haken (1988), Ebeling und Feistel (1994: 218) halten aus diesem Grund die Aufklärung der Beziehung zwischen Selbstorganisation

<sup>1</sup> Vgl. auch Haken (in Küppers 1987: 127ff) und Haken/Haken-Krell (1989).

und Information für eine der Hauptfragen einer Synergetik der Evolution.

Von einem evolutionären Standpunkt aus besteht ein enger Zusammenhang zwischen Information und Nutzen: Nur die Information, die auch Verwendung findet, ist letztlich wirksame Information, und die Genese der Information ist zwangsläufig mit ihrem Verstehen verknüpft. Diese Einsicht findet in dem Begriff der pragmatischen Information Berücksichtigung, den C. F. v. Weizsäcker (1974: 351f.) mit den zwei Thesen umschreibt:

1. Information ist nur, was verstanden wird.
2. Information ist nur, was Information erzeugt.<sup>2</sup>

Wie aber verhalten sich die oben genannten syntaktischen und algorithmischen Aspekte des Informationsbegriffs zur pragmatischen Information? Und wie ist die rekursive Erzeugung von pragmatischer Information im einzelnen zu verstehen?

Diesen Fragen soll in dem vorliegenden Aufsatz nachgegangen werden. Dazu werden verschiedene Informationsbegriffe diskutiert:

- Zunächst wird der Begriff der *potentiellen Information* kritisiert, der an den Entropiebegriff geknüpft ist.
- Um sowohl den syntaktischen als auch den semantischen Aspekt von Information zu berücksichtigen, wird im Aufsatz eine Unterscheidung von *struktureller* und *funktionaler Information* vorgeschlagen.
- *Pragmatische Information* entsteht durch das Zusammenwirken von struktureller und funktionaler Information – sie ist keine Invariante der Entwicklung, sondern muß ständig neu generiert werden.

Die Wirkungsweise von struktureller, funktionaler und pragmatischer Information wird im zweiten Teil des Aufsatzes an einem Modell von künstlichen Agenten exemplarisch vorgeführt. Dabei kann mit Hilfe von Computersimulationen gezeigt werden, daß die Rückwirkung der vorhandenen Information auf die Erzeugung neuer Information Analogien zur Herausbildung eines kollektiven Gedächtnisses aufweist. Die Emergenz dieses kollektiven Gedächtnisses auf der Ebene der Information geht einher mit einem Strukturierungsprozeß auf der Ebene der Agenten, so daß Selbstorganisation und Entstehung von Information hier eng miteinander verknüpft sind. Diese Einsicht kann zu einem erweiterten Verständnis der *aktiven Rolle von Information* führen.

## 1. Potentielle Information

Die Evolution ist im Sinne der Physik (vgl. Ebeling/Feistel 1992) zunächst einmal ein Prozeß, der an die Existenz eines Zeitpfeils geknüpft ist – einer Unterscheidung von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Dieser Zeitpfeil ist in der Physik, entsprechend dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, definiert

<sup>2</sup> Vgl. dazu neuerdings auch: Chaos und Kosmos. Prinzipien der Evolution. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994.

durch die Zunahme einer physikalischen Größe – der Entropie.

Die Evolution führt zu bestimmten Systemzuständen, die hier als Makrozustände bezeichnet werden, wobei die Frage auftritt, wodurch diese Makrozustände auf der tieferliegenden, mikroskopischen, Ebene konstituiert werden. Von den verschiedenen Konzepten innerhalb der Theorie der Selbstorganisation<sup>3</sup> werden Erklärungsmöglichkeiten angeboten, um den Übergang von der mikroskopischen zur makroskopischen Ebene und die Emergenz qualitativ neuer Eigenschaften zu verstehen. Dies wird unter dem Gesichtspunkt der Information in späteren Abschnitten weiter ausgeführt werden, an dieser Stelle soll zunächst der Zeitpfeil und der damit verbundene Entropiezuwachs diskutiert werden.

Folgt man der statistischen Interpretation der Entropie durch Boltzmann und Planck, dann entspricht die Entropie der Zahl der möglichen Mikrozustände, die zu einem gegebenen Makrozustand gehören. Die Entropie wächst im Verlaufe der Evolution, weil die Zahl der möglichen Mikrozustände wächst – eine Tatsache, die oftmals als Zunahme der Unordnung bezeichnet wird.

Auf der anderen Seite existiert in der Interpretation von Shannon und Weaver (1963) aber auch ein Zusammenhang zwischen Entropie und Information (vgl. Wolkenstein 1990). Entropie kann verstanden werden als ein Maß für die Information, die benötigt wird, um den Mikrozustand eines gegebenen Makrozustandes aufzuklären (Ebeling/Feistel 1994: 193). Mit anderen Worten: Entropie ist ein Maß für die Zahl der Fragen, die gestellt werden müssen, um den Mikrozustand eines gegebenen Makrozustandes 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 beantwortet werden können. C. F. v. Weizsäcker (1974: Abschnitt II.5), beispielsweise, hat eine Theorie vorgeschlagen, die einen solchen Entscheidungsbaum auf sogenannten Ur-Alternativen aufbaut. Ein Ur (Uralternative, Zustandsvektor  $U_r$ ) 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.“ (Weizsäcker,

<sup>3</sup> Der Begriff „Selbstorganisationstheorie“ wird in diesem Aufsatz verwendet, um die verschiedenen Konzepte, wie Synergetik (Haken), dissipative Strukturbildung (Prigogine und Nicolis), Autopoiese-Theorie (Maturana und Varela) – um nur drei Zweige zu nennen – unter einem Namen zusammenzufassen. Damit sollen keinesfalls die zwischen diesen Konzepten bestehenden Unterschiede vernachlässigt werden. Aufgrund des unterschiedlichen Begriffsapparates und der teilweise inkompatibilität sind wir zur Zeit noch weit davon entfernt, von einem *einheitlichen* Selbstorganisations-Paradigma sprechen zu können. Vielmehr sind die verschiedenen Zweige innerhalb der Selbstorganisationstheorie erst dabei, gemeinsam zu einer Wissenschaft vom Komplexen zusammenzuwachsen.

C. F. 1974: 269).

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. Auf der makroskopischen Ebene erscheint diese fortlaufende Entscheidung von Ur-Alternativen als eine unumkehrbare Entwicklung, also als ein Zeitfehl.

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 unterschiedener einfacher Alternativen, die durch das Eintreten des Ereignisses unterschieden werden“ (Weizsäcker, C. F. 1974: 347). 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“ (Weizsäcker, C. F. 1974: 361f). Ein Nukleon zum Beispiel würde aus  $10^{40}$  Uren bestehen – und das Universum zum jetzigen Zeitpunkt aus etwa  $10^{120}$  Uren (Weizsäcker, C. F. 1974: 272). Diese Zahl charakterisiert die maximale Information, die zum gegebenen Zeitpunkt innerhalb des Universums überhaupt existieren kann, als Bits, als Zahl von unterscheidbaren Ur-Alternativen.

Durch die Existenz des Zeitpfeils wird diese Zahl im Verlaufe der Evolution allerdings unaufhörlich zunehmen: „Postulat der Expansion: In zweiter Näherung läßt sich das Universum beschreiben als aus letzten Objekten bestehend, deren Anzahl mit der Zeit zunimmt. Diese Formulierung ... drückt die offene Zukunft aus“ (Weizsäcker, C. F. 1974: 273).

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.“ (Weizsäcker, C. F. 1994: 167) und „Evolution als Wachstum potentieller Information“ (Weizsäcker, C. F. 1994: 174). T. Stonier dagegen gebraucht, wie auch weiter unten noch ausgeführt wird, den Begriff „potentielle Information“ in eindeutigen Bezug auf die mechanische, „potentielle“ Energie (Stonier 1991: 62).

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

Die Diskrepanz zwischen faktischer und potentieller Information resultiert

aus der Verknüpfung des Informationsgehaltes mit dem Entropiebegriff. Diese Beziehung ist in der Tat problematisch (vgl. Wicken 1987: 176ff), weil es nicht die geordneten Zustände sind, die einen hohen Informationsgehalt aufweisen, sondern die zufälligen, ungeordneten Zustände mit entsprechend maximaler Entropie. Schrödinger (1951) hat aus diesem Grunde den Begriff „Negentropie“ (negative Entropie) als Ordnungsmaß eingeführt, und Brillouin (1956), später auch Beer (1972) und neuerdings Stonier (1991) haben die Negentropie als das eigentliche Informationsmaß angesehen.

Aus dieser Diskussion lassen sich zwei Forderungen an den Informationsbegriff ableiten:

(1) Information soll in *positiver* Weise mit der Generierung von Ordnungszuständen verknüpft werden,

(2) Information soll die faktische Information darstellen und nicht als ein Maß für faktische *Unbestimmtheit* interpretiert werden.

Um diese beiden Forderungen zu erfüllen, ist es allerdings mit einer einfachen Umkehrung des Vorzeichens der Entropie nicht getan. Vielmehr bedarf es einer differenzierteren Diskussion des Informationsbegriffs. Um diesem Ziel näherzukommen, soll zunächst eine Unterscheidung von *struktureller* und *funktionaler* Information vorgenommen werden.

## 2. Strukturelle Information

Als *strukturelle* Information 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. Die strukturelle Information erfährt also den Informationsgehalt, wie er auf materieller Grundlage codiert ist, sie repräsentiert die *strukturelle Determiniertheit* eines Zustandes.

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: „Der Ausdruck 'potentielle Energie' bezeichnet in Wahrheit zwei Klassen von Informationen: die strukturellen und die kinetischen. Wenn die Reorganisation des Universums [nach Zuführung von Arbeit – Anmerkung F. S.] in einer 'stabilen' Gleichgewichtssituation endet ..., so ist die Energie des Arbeitsprozesses in *strukturelle* Information umgewandelt worden. Wenn die Reorganisation dagegen einen 'instabilen' Zustand herstellt, der sich ganz und gar nicht im Gleichgewicht befindet, so haben wir es mit *kinetischer* Information zu tun“ (Stonier 1991: 69).

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.

Das in diesem Aufsatz zugrundegelegte Verständnis von „struktureller Infor-

mation“ steht vielmehr in enger Beziehung zu dem Begriff „gebundene Information“, den Ebeling und Feistel (1994: 219ff) verwenden. Den Autoren zufolge wäre die Entropie ein quantitatives Maß, um die gebundene Information eines Zustandes zumindest näherungsweise anzugeben, wobei die Informationsentropie, die aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ordnungsparameter resultiert, zwar nur einen Bruchteil der gesamten statistischen Entropie darstellt, aber für die Strukturbildung entscheidend ist.

Strukturelle Information kann, wie weiter unten noch ausgeführt wird, durch Symbole repräsentiert werden. Eine Möglichkeit, strukturelle Information abzubilden, sind Strings oder symbolische Sequenzen, also Strukturen der folgenden Art:  $S_0 S_1 S_2 \dots S_n S_{n+1} \dots$

Allgemein läßt sich zeigen, daß dynamische Vorgänge mit Hilfe von Symbolischen Dynamiken auf Sequenzen abgebildet werden können (vgl. Bai-Jin 1989), 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 angefahren 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.

Dies bedeutet, daß die „Herkunft“ der Strings ganz verschieden sein kann – 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.

Das 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.

Die (verallgemeinerten) „Buchstaben“  $s_i$  können auch aufgefaßt werden als lokale Information, die an der Stelle  $i$  des Strings vorhanden ist, während im Unterschied dazu die strukturelle Information des gesamten Strings als globale Information bezeichnet werden soll. Wenn wir annehmen, daß wir die Nachbarchaftsbeziehungen zwischen den lokalen Informationen  $\dots s_{i-1} s_i s_{i+1} \dots$  kennen, etwa durch eine Rekursionsbeschreibung, in der sich  $s_{i+1}$  aus  $s_i$  ergibt, dann stellt sich die Frage, ob damit bei Kenntnis eines  $s_n$  die Information der Sequenz vollständig gegeben ist. Mit anderen Worten: Kann die globale Information auf Beziehungen zwischen lokalen Informationen reduziert werden, oder nicht?

Daß diese Frage nicht allgemein mit Ja beantwortet werden kann, wird durch

zahlreiche Beispiele für deterministisches Chaos belegt.<sup>4</sup> Das heißt, auch wenn die lokale Information  $s_i$  gegeben und die Rekursionsbeziehung zwischen Nachbarn bekannt ist, kann daraus nicht von vornherein die globale Information geschlußfolgert werden, da die Vorhersagbarkeit des gesamten Strings eingeschränkt ist. Die globale oder makroskopische Ebene verkörpert also eine Information, die sich nicht auf die lokale Information der mikroskopischen Ebene reduzieren läßt. Dieses Phänomen wird als Emergenz bezeichnet – die, scheinbar sprunghafte, Ausbildung von qualitativ neuen Eigenschaften, durch die verschiedene hierarchische Ebenen aufgebaut werden können. Es existiert also durchaus eine „Informationslücke“ zwischen der Ebene der lokalen Information, die an die elementare Struktur gebunden ist, und der Ebene der globalen Information, die dem Gesamtsystem zukommt.

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.

Die informationstheoretischen Methoden, mit denen die Informationsoptionierung in Sequenzen untersucht werden kann, gehen über die einfache Berechnung der Shannonschen Informationsentropie weit hinaus (vgl. Grassberger 1989: 669)<sup>5</sup> und analysieren auch die Korrelationen innerhalb der Sequenz (die wechselseitigen Beziehungen zwischen Zeichen an verschiedenen Stellen des Strings). Dabei zeigt sich (Ebeling/Nicolis 1991: 191)<sup>6</sup>, daß die Korrelationen in natürlichen informationstragenden Sequenzen jeweils nach ähnlichen Gesetzen abklingen – daß also unter diesem Blickwinkel eine Art struktureller „Verwandtschaft“ zwischen literarischen Texten und der DNA existiert.

Natürliche Sequenzen sind gerade so aufgebaut, daß sie weder vollkommen chaotisch, noch vollkommen periodisch sind. Ist die Anordnung der Buchstaben in einem String völlig ungeordnet, also chaotisch, dann wird der Neuigkeitswert eines jeden Buchstabs maximal, aber die Wahrscheinlichkeit, aus der Kenntnis der bisherigen Abfolge einen Buchstaben innerhalb der Sequenz richtig vorherzusagen, wird minimal. Im anderen Grenzfall, einer völlig periodischen Anordnung der Buchstaben, geht die Wahrscheinlichkeit, einen Buchstaben richtig vorherzusagen, mit der Zeit gegen ein Maximum, das heißt, die Information periodischer Sequenzen wird mit der Zeit redundant. Natürliche Sequenzen aber liegen in der Abfolge ihrer „Buchstaben“ auf der Grenze zwischen

<sup>4</sup> Man denke zum Beispiel an die logistische Abbildung aus der Mathematik:  $x_{n+1} = r x_n / (1 - x_n)$  mit  $0 < r < 4$  und  $0 < x_0 < 1$ . Bei den gegebenen Anfangsbedingungen bleiben alle Werte für  $x_n$  auf das Intervall (0, 1) beschränkt. Die Folge divergiert nicht, weist aber trotzdem ein chaotisches Verhalten auf.

<sup>5</sup> Vgl. auch Li (1991) und Atmanspacher/Scheingraber (1991).

<sup>6</sup> Vgl. auch Ebeling/Pöschel (1994: 241).

Ordnung und Chaos, oder – mit anderen Worten – zwischen Redundanz und Neuigkeit.

### 3. 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 (vgl. Carnap/Bar-Hillel 1952).<sup>7</sup> 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. Weizsäckers, Objekte in entscheidbare Uralternativen zu zerlegen.

Eine andere Möglichkeit, die Bedeutung von Information zu berücksichtigen, bildet das Konzept der „pragmatischen Information“ (Weizsäcker, C. F. 1972: 535ff)<sup>8</sup>, 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 Shannon'sche Informationsentropie gerade dann maximal, wenn die Erstmaligkeit 100 Prozent beträgt, während sie im anderen Grenzfall minimal wird.

Bereits E. und C. F. v. Weizsäcker (1972) haben 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 Neuheitswert haben, der andererseits aber auf der Grundlage der bereits vorhandenen Information auch verstanden werden kann.

Die informationstheoretischen Erkenntnisse über den Aufbau der strukturellen Information in natürlichen Sequenzen liefern einen erweiterten Blick auf den pragmatischen Informationsbegriff. Natürliche Sequenzen sind bereits *strukturell* so aufgebaut, daß sie der Anforderung an eine möglichst große pragmatische Information entsprechen, und es wäre daher überdenkenswert, die Analyse der strukturellen Information zur quantitativen Messung der pragmatischen Information heranzuziehen.

Natürliche Sequenzen sind weder chaotisch (Erstmaligkeit 100 Prozent, Be-

<sup>7</sup> Vgl. auch Bar-Hillel (1964: 221ff).

<sup>8</sup> Vgl. auch Weizsäcker, E. (1974: 82ff) sowie Weizsäcker, C. F. (1994: 200ff).

stätigung 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 grobe 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.

### 4. Funktionale 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 (Haken 1989).<sup>9</sup> In den Kognitionswissenschaften wird neuerdings die These diskutiert, die Entstehung von Bedeutung durch einen Selbstorganisationsprozeß zu erklären und damit den bereits erwähnten Konzept der „semantischen Information“ einen neuen, anti-reduktionistischen Inhalt zu geben (Roth in Krohn/Küppers 1992).<sup>10</sup> 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 voraussetzt, durch die die Information 1. Art verstanden werden kann. So C. F. v. Weizsäcker mit seiner These: „Information ist nur, was verstanden wird“ (Weizsäcker, C. F. 1974: 351) – ohne daß hier die Frage nach dem Ursprung der Information 2. Art beantwortet wird.

Diese Information 2. Art wird im folgenden als *funktionale* Information be-

<sup>9</sup> Vgl. auch Haken (in Küppers 1987: 127ff).

<sup>10</sup> Vgl. auch Stadler/Kruse (in Krohn/Küppers 1992).

zeichnet. 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 kontextabhängig – sie existiert nur im Hinblick auf einen Rezipienten, der bei der „Deutung“ der strukturellen Information immer auf die mit der funktionalen Information gegebenen Referenzzustände zurückgreifen muß.

Unter Benutzung der Terminologie, die sich im Anschluß an die Autopoiesetheorie 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.

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“ (Weizsäcker, C. F. 1974: 51). 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.

R. Feistel (in Niedersachsen/Pohlmann 1990: 83ff)<sup>11</sup> 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.<sup>12</sup> 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.

<sup>11</sup> Vgl. auch Ebeling/Feistel (1994: 55ff).

<sup>12</sup> Zu den vielfältigen Belegen für diesen Prozeß siehe Feistel (in Niedersachsen/Pohlmann 1990: 83ff) sowie Ebeling/Feistel (1994: 55ff).

## 5. Selbstorganisation und Generierung von Information in einem Modell künstlicher Agenten

Die Frage, inwieweit Information auf strukturelle bzw. syntaktische Aspekte reduziert werden kann, wurde in den vorhergehenden Kapiteln bereits zugunsten einer komplementären Beschreibung von struktureller und funktionaler Information beantwortet. Die Wirkungsweise dieses Verhältnisses soll nun an einem Beispiel demonstriert werden, das einen Selbstorganisationsprozeß auf der Grundlage von Information simuliert.

### 5.1. Generierung und Akkumulation von Information

Wir betrachten im folgenden ein einfaches, an der Physik orientiertes Modell (Schweitzer/Schimansky-Geier 1994: 359ff): 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 (vgl. Meyer/Wilson 1991)<sup>13</sup>. 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) (vgl. Maes 1992). 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 verblässen 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 Information kann also lokal akkumuliert werden. Außerdem kann die Information sich eigen-

ständig 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

<sup>13</sup> Vgl. auch Langton (1994).

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. 5.1.1). Die Bilder 5.1.1 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.

In Abb. 5.1.1 a sehen wir, daß von den Agenten zunächst lokal Information in Form von Markierungen aufgebaut wird. Dabei läuft ein Selbstverstärkungsprozess ab (Abb. 5.1.1 b, c), denn dort, wo der Agent eine Markierung findet, setzt er mit einer größeren Wahrscheinlichkeit wieder eine – aber wenn dies nicht fortlaufend geschieht, verblässen 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. 5.1.1 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 werden den 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 (vgl. Schweitzer/Schmamsky-Geier 1994: 359ff).

Die nichtlineare Rückkopplung der Informationsdichte  $b(r,t)$  auf die Bewegung der Agenten wird durch das Hakensche *Verstärkungsprinzip* (Haken 1978) adäquat beschrieben: Die Agenten schaffen durch die Produktion von Markierungen gemeinsam eine Informationsebene, über die sie miteinander ko-

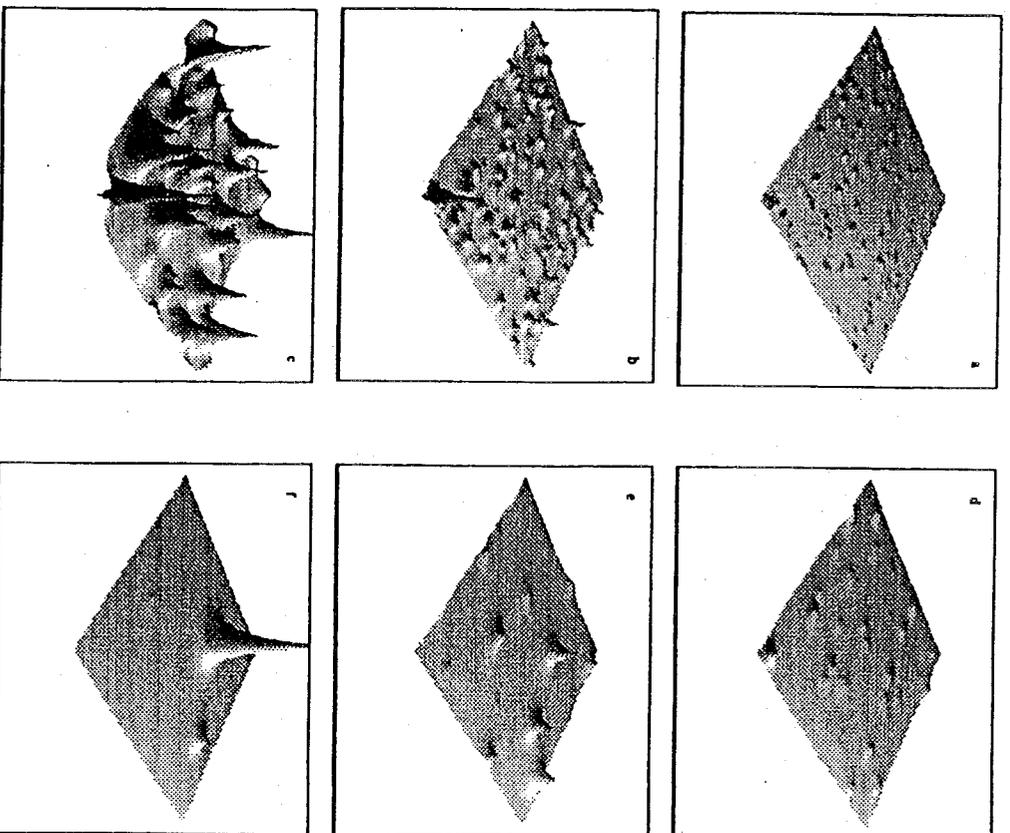


Abb. 5.1.1.: Entwicklung der Informationsdichte  $b(r,t)$  nach (a) 10, (b) 100, (c) und (d) 1000, (e) 5000, und (f) 50000 Simulationsschritten. (Anzahl der Agenten: 100, trapezoidales Gitter der Größe  $100 \times 100$ .) Bei den Abb. d-f wurde der Maßstab gegenüber Abb. a-c um das 10-fache vergrößert, um die weitere Entwicklung der Informationsdichte zu erfassen. Die Dichte von Abb. d entspricht damit derjenigen von Abb. c bei einem 10-fach vergrößerten Maßstab (Schweitzer/Schmamsky-Geier 1994: 359ff).

munizieren. 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.

## 5.2. Erzeugung eines kollektiven Gedächtnisses

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

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 Informationsspitzen mehr, sondern die Markierungen bilden Spuren, die die Wege kennzeichnen, die die Agenten beschritten haben (Abb. 5.2.1). 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 die 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,

langst verbläbt – 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 Unterscheidung zwischen markierten und nicht markierten Plätzen. Mit dem Setzen von Markierungen aber wird diese Unterscheidung existent und die Symmetrie des Systems ist gebrochen. Symmetriebrecher sind ein charakteristisches Merkmal von Evolutionsprozessen, vergleichbar der Entscheidung von Alternativen bzw. der Bifurkation des Systemverhaltens an kritischen Punkten (vgl. Nicolis/Prigogine 1987: 108ff).

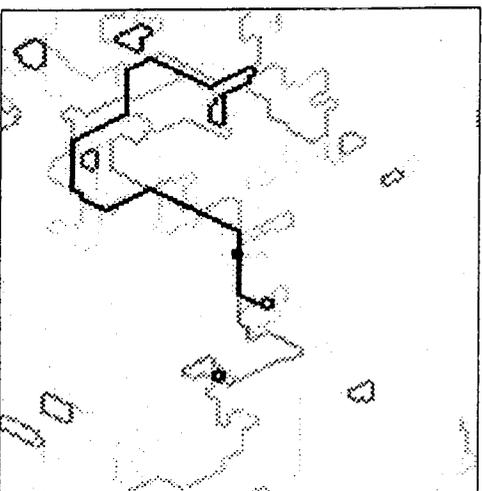


Abb. 5.2.1.: Informationsdichte  $b(r,t)$  nach 10000 Simulationsschritten (Anzahl der Agenten: 100, trianguläres Gitter der Größe  $100 \times 100$ ). Anhand der Stärke der Markierungen ist deutlich die Herausbildung von Haupt- und Nebenwegen zu erkennen (Helbing et al. 1994: 229ff).<sup>14</sup>

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 verbläbt sie mit der Zeit und hat auf die spätere Entwicklung des Systems keinen entscheidenden Einfluß mehr. In diesem Zusammenhang sei noch einmal auf die in der Einleitung erwähnte 2. These C. F. v. Weizsäckers verwiesen, die wie folgt kommentiert wird: „Information existiert nur,

<sup>14</sup> Vgl. auch Helbing et al. (1994: 69ff).

wenn und insofern Information erzeugt wird" (Weizsäcker, C. F. 1974: 352).

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 verblüht und vergessen wird. Hier wird der Versklavungseffekt durch die einmal hervorgerufenen 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 beschränkt – da aber andererseits dieses kollektive Gedächtnis erst durch die Agenten hervorgerufen wurde, werden die Agenten letztlich von ihrer eigenen Geschichte versklavt, die ihre Gegenwart mitbestimmt.

### 5.3. 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.<sup>15</sup> 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 entdecken, von den nicht erfolgreichen Agenten dadurch unterschieden werden, daß sie für die weitere Markierung eine andere Farbe verwenden (zum Beispiel rot statt blau). Es ändert sich wohlgemerkt nicht der Algorithmus, sondern

<sup>15</sup> Zur biologischen Relevanz dieses Modells vgl. Schweitzer et al. (1994).

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 zurückkehrt, 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.

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 eindrucklich sichtbar in der Entstehung eines Weges zwischen dem Zentrum und dem Futterplatz (Abb. 5.3.1 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.

Im hier diskutierten Modell bricht die Struktur schlagartig durch und nicht etwa allmählich: Sobald die Erfolgsinformation einen kritischen Wert übersteigt, entsteht der Weg innerhalb sehr kurzer Zeit. Das heißt, die Existenz des Weges ist an die Existenz der einer überkritischen Erfolgsinformation geknüpft – nur die Erfolgsinformation 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 Erfolgsinformation mehr produziert und der Weg, der praktisch nutzlos geworden ist, beginnt wieder zu verblässen – das heißt, die gespeicherte Information wird nach und nach vergessen. Statt dessen entdecken die nun freien Agenten neue Futterquellen, zu denen neue Wege ausgebaut werden (Abb. 5.3.1 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.

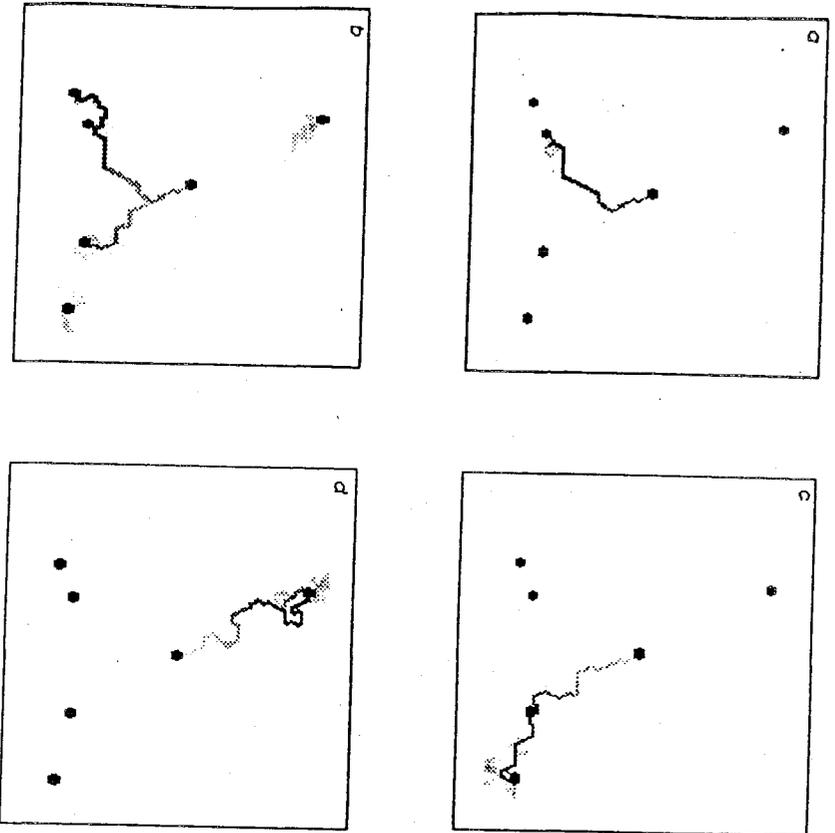


Abb. 5.3.1.: Herausbildung von Verbindungen zwischen einem Zentrum und fünf umliegenden Plätzen durch lokale Interaktion von künstlichen Agenten unter Verwendung von zwei verschiedenen Markierungen. Die Abb. zeigen die Gesamtdichte der Information nach (a) 2000, (b) 4000, (c) 8500 und (d) 15000 Simulationsschritten (vgl. Schweitzer et al. 1994).

## 6. Zusammenfassende Diskussion

Die vorhergehenden Abschnitte haben anhand eines einfachen Modells gezeigt, wie sich eine Anzahl künstlicher Agenten über die Erzeugung und Bewertung von Information selbst organisiert und dabei gemeinschaftlich Struktur-

ren 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.<sup>16</sup>

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 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 verknüpft sind. Dies weist auf die *aktiven Rolle*

<sup>16</sup> K. Fuchs-Kittowski, private Mitteilung (siehe auch Beitrag im vorliegenden Band).

von *Information* im Strukturbildungsprozess hin.

Der Vorteil des hier diskutierten Modells liegt unter anderem darin, daß auf eine sehr einseitige 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:

- Ahnsapacher, H./Scheingraber, H. (Hg.): *Information Dynamics*, Plenum Press, New York 1991.
- Baillin, H.: *Elementary Symbolic Dynamics*, World Scientific, Singapore 1989.
- Bar-Hillel, Y.: *Semantic Information and its Measures*, in: Bar-Hillel, Y.: *Language and Information*, Reading, Mass. 1964.
- Beer, S.: *Brain of the Firm*, Penguin Press, London 1972.
- Brillouin, L.: *Science and Information Theory*, Academic Press, New York 1956.
- Camap, R./Bar-Hillel, Y.: *On the Outline of a Theory of Semantic Information*, in: Bar-Hillel, Y.: *Language and Information*, Reading, Mass. 1964.
- Ebeling, W./Feistel, R.: *Physik der Selbstorganisation und Evolution*, Akademie-Verlag, Berlin 1982.
- Ebeling, W./Feistel, R.: *Chaos und Kosmos – Prinzipien der Evolution*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994.
- Ebeling, W./Pöschel, T.: *Long range correlations in literary English*, in: *Europhys. Lett.* 26, 1994.
- Ebeling, W./Nicolis, G.: *Entropy of Symbolic Sequences – the Role of Correlations*, in: *Europhys. Lett.* 14, 1994.
- Frank, Schweitzer: *Strukturelle, funktionale und pragmatische Information* 363
- Feistel, R.: *Ritualisation und die Selbstorganisation der Information*, in: Niedersen, U./Pohlmann, L. (Hg.): *Selbstorganisation und Determination (Selbstorganisation – Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 1)*, Duncker & Humblot, Berlin 1990.
- Grassberger, P.: *Estimation of Information Content of Symbol Sequences and Efficient Codes*, in: *IEEE Trans. Inf. Theory* 35, 1989.
- Haken, H.: *Synergetics – An Introduction – Nonequilibrium Phase Transitions in Physics*, Chemistry and Biology, 2. Auflage, Springer, Berlin 1978.
- Haken, H.: *Die Selbstorganisation der Information in biologischen Systemen aus der Sicht der Synergetik*, in: Küppers, B. O. (Hg.): *Ordnung aus dem Chaos – Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution des Lebens*, Piper, München 1987.
- Haken, H.: *Information and Self-Organization – A Macroscopic Approach to Complex Systems*, Springer, Berlin 1988.
- Haken, H./Haken-Krell, M.: *Entstehung biologischer Information und Ordnung – Dimensionen der modernen Biologie*, Bd. 3, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1986.
- Küppers, B. O.: *Der Ursprung biologischer Information*, Piper, München 1986.
- Langton, C. G. (Hg.): *Artificial Life III*, in: *Proceedings Workshop in Artificial Life*, June 1992, Santa Fe, NM, Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity, Proc. Vol. XVII, Reading, Addison-Wesley, 1994.
- Li, W.: *On the Relationship Between Complexity and Entropy for Markov Chains and Regular Languages*, in: *Complex Systems* 5, 1991.
- Maes, P. (Hg.): *Designing Autonomous Agents – Theory and Practice From Biology to Engineering and Back*, MIT Press, Cambridge 1992.
- Meyer, J. A./Wilson, S. W. (Hg.): *From Animals to Animals*, in: *Proceedings 1st International Conference of Adaptive Behavior*, MIT Press, Cambridge 1991.
- Roth, G.: *Kognition – Die Entstehung von Bedeutung im Gehirn*, in: Krohn, W./Küppers, G. (Hg.): *Emergenz – Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*, Suhrkamp, Frankfurt/M. 1992.
- Schefe, P./Hastedt, H./Dittrich, Y./Keil, G. (Hg.): *Informantik und Philosophie*, BI Wissenschaftsverlag, Mannheim 1993.
- Schrodinger, E.: *Was ist Leben? Lehnen*, München 1951.
- Schweitzer, F./Lao, K./Family, F.: *Active Random Walker Simulate Trunk Trail Formation by Ants, submitted to Adaptive Behavior*, 1994.
- Schwitzer, F./Schmanksy-Geier, L.: *Clustering of active walkers in a two-component reaction-diffusion system*, in: *Physica A* 206, 1994.
- Shannon, C. E./Weaver, W.: *The mathematical theory of communication*, University Press, Illinois 1963.
- Stadler, M./Krusse, P.: *Zur Emergenz psychischer Qualitäten*, in: Krohn, W./Küppers, G. (Hg.): *Emergenz – Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*, Suhrkamp, Frankfurt/M. 1992.
- Stoner, T.: *Information und die innere Struktur des Universums*, Springer, Berlin 1991.
- Weizsäcker, C. F. von: *Die Einheit der Natur*, dtv, München 1974.
- Weizsäcker, C. F. von: *Quantentheorie elementarer Objekte*, in: *Nova Acta Leopoldina*, N. F., Nummer 230, Band 49.

- Weizsäcker, C. F. von: *Aufbau der Physik*, 3. Auflage, dtv, München 1994.
- Weizsäcker, C. F. von/Weizsäcker, E. von: *Wiederaufnahme der begrifflichen Frage: Was ist Information?*, in: *Nova Acta Leopoldina*, N. F., Nummer 206, Band 37, 535-555, 1972.
- Weizsäcker, E. von: *Erstmaligkeit und Bestätigung als Komponenten der pragmatischen Information*, in: ders. (Hg.): *Offene Systeme*, Bd. 1, Stuttgart 1974.
- Wicken, J.: *Entropy and Information – Suggestions for a Common Language*, in: *Philos. Science* 54, 176-193, 1987.
- Wolkenstein, M. W.: *Entropie und Information*, Deusch, Thun 1990.