

# Physik

Frank Schweitzer

*GMD - Institut für Autonome Intelligente Systeme*  
*Schloß Birlinghoven, 53754 Sankt Augustin*

e-mail: schweitzer@gmd.de

Die Beziehungen zwischen Physik und evolutorischer Ökonomik entfalten sich auf zwei verschiedenen Ebenen. Zum einen formuliert die Physik als grundlegende Naturwissenschaft Gesetze und Bedingungen, denen auch die Ökonomie Rechnung tragen muß. Zum anderen liefert gerade die moderne Entwicklung innerhalb der Physik paradigmatische Einsichten in die Dynamik komplexer Prozesse, die in analoger Weise oftmals auch auf ökonomische Prozesse anwendbar sind, wenngleich man sich hier vor einer zu kurz gedachten Übertragung hüten muß. Beide Punkte sollen im folgenden diskutiert werden, wobei der Schwerpunkt auf den physikalischen Aspekten des gegenwärtigen Evolutionsverständnisses liegt.

## 1 Energetische Bedingungen

Fundamentale Naturgesetze zeichnen sich dadurch aus, daß sie für alle Bereiche, im räumlichen wie im zeitlichen Sinne, gelten. Dies bedeutet *nicht*, daß derartige Naturgesetze bereits die gesamte Entwicklung, etwa in ökonomischen Systemen, determinieren. Aber durch ihre Existenz werden Bedingungen festgesetzt, die von der Ökonomie nicht außer Kraft gesetzt werden können. Auch chemische, biologische, geologische Prozesse können nur innerhalb der Grenzen ablaufen, die durch die physikalisch erlaubten Prozesse bestimmt werden. Allerdings sind sie nicht aus physikalischen Gesetzen deduzierbar, sondern haben ihre eigene → **Komplexität**, die aus der Entstehung von neuen Systemeigenschaften resultiert (*Emergenzproblem*). Insofern wäre ein Reduktionismus, der alles auf physikalische Prinzipien zurückführen wollte, nicht haltbar.

Zu den fundamentalen Einsichten der Physik zählen die Hauptsätze der → **Thermodynamik**. Der erste Hauptsatz besagt, daß die Summe aller Energien in einem isolierten System konstant ist. In einem solchen System kann Energie also weder erschaffen noch vernichtet, sondern nur *umgewandelt* werden. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik bestimmt die Richtung einer solchen

Energieumwandlung: Spontan ablaufende Prozesse verlaufen nur in *einer* Richtung, bei der höherwertige Energie in niederwertige Energie umgewandelt wird. Das physikalische Maß für den "Wert" der Energie ist die *Entropie* ( $\rightarrow$  **Entropie und Energie**). Sie ist um so *geringer*, je höherwertiger die Energie ist. Diejenige Energie, die noch für Umwandlungsprozesse zur Verfügung steht, wird auch als *freie Energie* bezeichnet. Der Begriff "Energieverbrauch" bezieht sich im physikalischen Sinne auf den Verbrauch *freier* Energie. Begriffe wie "Energieproduktion" oder "Energieerzeugung" beschreiben auch nur einen speziellen Umwandlungsprozeß, zumeist den von anderen Energieformen in elektrische Energie.

Die ausgezeichnete Richtung dieser Umwandlungsprozesse, die auf ihrer *Irreversibilität* beruht, erlaubt die Einführung eines Zeitpfeils ( $\rightarrow$  **Zeit**), durch den die zeitliche Symmetrie dynamischer Prozesse, wie sie beispielsweise für die klassische Mechanik charakteristisch ist, gebrochen wird. Damit wird ein Aspekt der *Historizität* in die physikalische Beschreibung eingeführt. Zugleich wird auch ein definitives Ende für gerichtete Prozesse postuliert (*Wärmetod*). Dieses ist bei maximaler Entropie des Systems erreicht, das heißt, die im System vorhandene Energie kann nicht weiter "entwertet" werden (*thermodynamischer Gleichgewichtszustand*).

Die obige Beschreibung gilt zunächst für isolierte Systeme, die keinen Austausch von Materie und Energie mit ihrer Umgebung haben. Da das Universum als Ganzes als ein solches isoliertes System angesehen werden kann, wurden aus der Existenz des zweiten Hauptsatzes schon früh Schlußfolgerungen für die kosmologische Entwicklung gezogen. Im lebensweltlichen Bereich sind Systeme zumeist jedoch nicht isoliert, sondern stehen über Austauschprozesse in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung, die wiederum Teil eines größeren Systems ist.

Ein solches eingebettetes *offenes* System kann in der Lage sein, durch den Austausch von Materie und Energie die Entropie, die bei energetischen Umwandlungsprozessen im Innern zwangsläufig produziert wird, nach außen zu transportieren und Energie mit niedriger Entropie aus der Umgebung aufzunehmen. Auf diese Weise hält es seine innere Entropie gering und entgeht damit dem thermodynamischen Gleichgewicht. Es befindet sich in einem permanenten Nichtgleichgewichtszustand ( $\rightarrow$  **Gleichgewicht/Ungleichgewicht**), der unter bestimmten Voraussetzungen auch stabil sein kann. Dies ist keineswegs im Widerspruch zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik, denn der Übergang in einen solchen Zustand wird erzwungen durch das Hineinpumpen hochwertiger Energie.

Der zwangsläufig auftretende Verbrauch der freien Energie und die damit verbundene Entropieproduktion wird auch als *Dissipation* (wörtlich etwa "Verschwendung") bezeichnet. Damit stellt sich bereits aus physikalischer Sicht für offene Systeme das Problem, wie dieser Verbrauch auszugleichen ist. Der *Import* von hochwertiger Energie mit geringer Entropie und der *Export* von niederwertiger Energie mit hoher Entropie ist eine *condition sine qua non* für den Fortbestand und die Weiterentwicklung von offenen Systemen.

Natürlich stellt sich die Frage, ob die Dissipation, d.h. die Entropieproduktion, sich nicht minimieren ließe. Einem Theorem von Prigogine (1947) zufolge ist eine solche Minimierung der Entropiepro-

duktion gerade das Charakteristikum *stationärer* Nichtgleichgewichtsprozesse. Diese Aussage gilt aber strenggenommen nur für *lineare* irreversible Prozesse und läßt sich nicht ohne weiteres verallgemeinern. Es ist bekannt, daß auch komplexe Ökosysteme ihre Entropieproduktion verringern können, indem sie die Energieströme innerhalb des Systems sehr effizient ausnutzen.

## 2 Wechselwirkungen

Neben den energetischen Bedingungen für die Dynamik isolierter und offener Systeme werden im Rahmen physikalischer Konzepte auch die Voraussetzungen komplexer Entwicklung untersucht. Dabei wird eine hierarchische Unterscheidung von "höheren" (System)-Ebenen und "niederen" (Untersystem)-Ebenen impliziert. Für die Herausbildung neuer Eigenschaften auf der Ebene des Gesamtsystems (*Emergenz*) spielen *nichtlineare Wechselwirkungen* zwischen den Untersystemen sowie der Einfluß von *Fluktuationen* (zufälligen Schwankungen) eine besondere Rolle. Bereits in der klassischen statistischen Physik wurden große Systeme behandelt, die aus einer Vielzahl (identischer) Untersysteme (Teilchen) zusammengesetzt sind. Es konnte mathematisch gezeigt werden, daß derartige Systeme qualitativ neue Eigenschaften, wie Härte, Leitfähigkeit, aufweisen können, die für die Konstituenten gar nicht definiert sind.

Zu den emergenten Eigenschaften zählt auch die Herausbildung von makroskopischen Ordnungszuständen ( $\rightarrow$  **Ordnung**). Während bestimmte geordnete Strukturen, etwa beim Kristall, durch die Relaxation des Systems in einen Gleichgewichtszustand entstehen, ist die Herausbildung von *dissipativen Strukturen*, wie den raum-zeitlichen Mustern in physico-chemischen Systemen, an die Zufuhr freier Energie, zum Beispiel in Form von Ausgangsstoffen, gebunden. Für die Beschreibung kooperativer Nichtgleichgewichtsphänomene wird im Rahmen der  $\rightarrow$  **Synergetik** ein allgemeiner Formalismus entwickelt, der es gestattet, die Dynamik derartiger Selbstorganisationsprozesse zu quantifizieren (siehe auch  $\rightarrow$  **Soziodynamik**). Dabei wird gezeigt, daß der Übergang von einem instabil gewordenen Systemzustand in einen neuen stabilen Zustand nicht durch die Gesamtheit aller Variablen der Untersysteme bestimmt wird, sondern nur durch einige wenige Größen, die als *Ordnner* bezeichnet werden.

Diese Ordner existieren nicht von vornherein oder sind von außen vorgegeben, sondern werden vom System selbst generiert: Die Untersysteme erzeugen durch ihre Eigendynamik gemeinschaftlich einen (oder mehrere) Ordnungsparameter, der seinerseits auf diese Untersysteme zurückwirkt und rückgekoppelt die weitere Entwicklung des Systems "versklavt", indem er die "Freiheit" der Untersysteme koordiniert. Ein solcher Rückkopplungsmechanismus kann auch als *zirkuläre Kausalität* beschreiben werden.

Ob das System global stabil oder instabil ist, hängt von den *Kontrollparametern* ab, die die globalen Randbedingungen des Systems repräsentieren. Erst die Instabilität ermöglicht die Entstehung von neuen Systemzuständen. Im *Bifurkationspunkt*, beim Übergang in den neuen stabilen Zustand,

ist das System besonders anfällig für kleinste Störungen; insofern haben Fluktuationen gerade bei multistabilen Systemen einen wesentlichen Anteil daran, welche der möglichen Strukturen letztlich realisiert wird. Betrachtet man die Evolution als eine Folge von Selbstorganisationsprozessen, die durch Zyklen von Stabilität und Instabilität bestimmt sind, dann bedingt der Einfluß von Fluktuationen eine Pfadabhängigkeit der Entwicklung.

Besonders vielfältige Möglichkeiten für die Evolution von Systemen entstehen, wenn die Wechselwirkungen der Untersysteme dergestalt sind, daß daraus teilweise unvereinbare Anforderungen an die Untersysteme resultieren. In diesem Fall wird es keinen "perfekten" Gleichgewichtszustand für das Gesamtsystem geben (der etwa dem globalen Minimum einer Potentialfunktion oder dem globalen Maximum einer Nutzensfunktion entspräche). Statt dessen existiert eine Vielzahl von vergleichbaren Systemzuständen, die jeweils unterschiedliche *Kompromißlösungen* darstellen. Da sich prinzipiell nicht alle Anforderungen gleichzeitig erfüllen lassen, spricht man hier, einem Vorschlag von P.W. Anderson folgend, von *frustrierten Systemen*.

Ein physikalisches Modell solcher Systeme sind die *Spingläser*, die durch langreichweitige, miteinander konkurrierende Wechselwirkungen zwischen den Spins charakterisiert sind. Unterhalb einer kritischen Temperatur, die den Phasenübergang markiert, findet man die Herausbildung einer sehr großen Zahl von Phasen, die jeweils einen möglichen Kompromiß, d.h. ein *lokales* Minimum der Energie repräsentieren. Jede Kompromißlösung entspricht dabei einer unterschiedlichen mikroskopischen Konfiguration der Spins, so daß die Frage auftritt, inwieweit diese Kompromisse einander ähnlich oder voneinander verschieden sind. Dabei zeigt sich, daß Frustration und Herausbildung einer *hierarchischen Ordnung* eng miteinander verbunden sind. Denkt man sich die Kompromißlösung als Ergebnis einer Hierarchie von Entscheidungen, so wird wie bei einem Verzweigungsbaum die Ähnlichkeit zweier Lösungen davon bestimmt, auf welcher Hierarchieebene erstmals für beide eine unterschiedliche Entscheidung getroffen wurde. Damit könnten die möglichen Kompromißlösungen im Prinzip übersichtlich nach Entscheidungshierarchien geordnet werden.

Aufgrund der Lösungsvielfalt bedient man sich in der Praxis bei der Suche nach möglichst guten Realisierungen allerdings der Computersimulation, wobei sogenannte *evolutionäre Suchstrategien* sich als besonders erfolgreich erwiesen haben. Hier werden bestimmte Elemente der kosmischen und der biologischen Evolution ausgenutzt, um den Erfolg der "Sucher" im hochkomplexen Zustandsraum zu verbessern. Dazu zählt das "simulated annealing", eine thermodynamische Strategie, bei der die Sucher auch kurzfristige Verschlechterungen ihres Ergebnisses akzeptieren, um langfristig bessere Lösungen zu finden. Ein bestimmtes zeitliches Temperaturregime gibt den Suchern ferner eine unterschiedliche Mobilität und ermöglicht damit ein mehr oder weniger gründliches Absuchen des Zustandsraumes nach optimalen Lösungen. Andere Strategien verwenden auch biologische Elemente, wie die Mutation und Rekombination von Suchern (→ **Evolutionäre Algorithmen**), wodurch der Anteil erfolgreicher Sucher sich im Verlauf des Optimierungsprozesses erhöht. Was "erfolgreich" bedeutet, hängt hier natürlich von der jeweiligen Potential- oder Nutzensfunktion ab, die problemspezifisch ist und nicht innerhalb der Physik definiert werden kann. Dagegen kann die Dynamik des

Optimierungsprozesses durchaus mit allgemeinen Formalismen beschrieben werden.

### 3 Komplexe Strukturen

Die obigen Beispiele illustrieren, daß im Rahmen der Physik sowohl Problemstellungen behandelt als auch Lösungsmethoden bereitgestellt werden, die auch für die evolutorische Ökonomik von Interesse sein können. Dabei geht es freilich weniger um die Anwendbarkeit auf *konkrete* ökonomische Probleme, als vielmehr um generelle Einsichten bei der Behandlung komplexer Systeme.

Wesentlich für die  $\rightarrow$  **Komplexität** eines Systems ist die Anzahl der gleichen bzw. verschiedenen Elemente (Untersysteme) und die Anzahl der gleichen bzw. verschiedenen, hierarchisch geordneten Relationen und Operationen, durch die diese Untersysteme verknüpft sind. Die Herausbildung hierarchischer Strukturen ist eng mit der Emergenz von neuen Systemeigenschaften verknüpft, die sich nicht in einfacher Weise auf die Wechselwirkung von Untersystemen reduzieren lassen. Im Rahmen der physikalischen Selbstorganisationstheorie wird gezeigt, daß Emergenz und Entstehung von Komplexität nicht zwangsläufig auf möglichst komplexen Interaktionen von Untersystemen beruhen muß. Auch "einfache" Wechselwirkungen, die hinreichend miteinander verkoppelt sind, können zu komplexen Systemzuständen führen.

Innerhalb der Physik werden verschiedene Maße bereitgestellt, um die Komplexität von Systemen zu quantifizieren. Dabei hat sich der klassische Entropie-Begriff nur bedingt als Komplexitätsmaß behaupten können. Die thermodynamische Entropie gilt zwar als Ordnungsmaß (je niedriger die Entropie, desto größer die Ordnung innerhalb des Systems); allerdings darf sich ein solcher Vergleich nur auf Zustände gleicher Energie beziehen, was in der Praxis häufig übersehen wird. Darüber hinaus ist ein System maximaler Entropie (geringer Ordnung) nicht notwendig ein komplexes System, ebensowenig wie ein System hoher Ordnung. In beiden Grenzfällen sind die Beziehungen innerhalb des Systems entweder zu ungeordnet oder zu regulär, um der obigen Begriffsbestimmung von Komplexität zu genügen. Geeignete Komplexitätsmaße sollten deshalb ihr Maximum zwischen diesen beiden Extremen haben.

Eine Möglichkeit zur Charakterisierung komplexer Strukturen ist die *bedingte Entropie*. Sie nimmt ihren Ausgangspunkt bei der Shannonschen Informationsentropie  $H$ , die eng mit der thermodynamischen Entropie verknüpft ist. Nimmt man eine Sequenz (eine Folge von Buchstaben aus einem bekannten Alphabet), von der  $n$  Buchstaben bekannt sind, dann gibt die Shannon-Entropie ein Maß für die mittlere Unsicherheit der Vorhersage für den  $n + 1$ . Buchstaben. Dies kann man sich auch für die Vorhersage *dynamischer Prozesse* zunutze machen, indem man diese mit Hilfe einer *symbolischen Dynamik* auf eine Sequenz abbildet. Dazu wird der Zustandsraum, der alle möglichen Werte des Prozesses enthält, entsprechend der Größe des Alphabetes in Zellen aufgeteilt, die jeweils mit einem "Buchstaben" des Alphabets benannt werden. Die (zeitliche) Reihenfolge, in der der dy-

namische Prozeß die einzelnen Zellen des Zustandsraumes anläuft, wird damit in eine Abfolge von Buchstaben abgebildet.

Eine derartige symbolische Sequenz kann nun in einer statistischen Analyse weiter ausgewertet werden. Unter anderem kann man die Häufigkeit bestimmen, mit der bestimmte Blöcke (Subsequenzen) der Länge  $n < k$  innerhalb der Sequenz der Länge  $k$  vorkommen und daraus analog zur Shannon-Entropie die Blockentropien  $H_n$  berechnen. Die bedingten Entropien ergeben sich dann aus der Differenz der Blockentropien:  $h_n = H_{n-1} - H_n$ . Der Verlauf von  $h_n$  über der Blocklänge  $n$  kann als anschauliches Charakteristikum für die Komplexität des dynamischen Prozesses verwendet werden.

Für periodische Sequenzen wird  $h_n$ , also die Unsicherheit der Vorhersage des nächsten Schrittes, nach Ablauf einer Periode gegen Null gehen, während sie für chaotische Sequenzen stets einen konstanten hohen Wert hat. Komplexe Sequenzen befinden sich dagegen auf der Grenze zwischen "Chaos" und "Ordnung". Sie zeichnen sich durch einen potenzgesetzartigen Abfall von  $h_n$  aus; ein Indiz für die Existenz *langreichweitiger Korrelationen* innerhalb der symbolischen Sequenz. Das heißt, zwischen den Buchstaben "komplexer" Sequenzen existieren Beziehungen auf *allen* Skalen. Übertragen auf einen zugrundeliegenden dynamischen Prozeß bedeutet dies, daß die entsprechenden Ereignisse in unterschiedlicher Weise auch von der Vergangenheit des Prozesses bestimmt werden, daß das dynamische System also ein *Gedächtnis* aufweist.

Die Berechnung von bedingten Entropien läßt sich auf eine Vielzahl komplexer Strukturen anwenden, da über das Prinzip der symbolischen Dynamik räumliche, zeitliche und raum-zeitliche Prozesse in ähnlicher Weise behandelt werden können. Entsprechend wurden Biosequenzen, wie die DNA, auf diese Weise ebenso untersucht wie Klima- oder Börsendaten oder literarische Texte. Führt man die Funktion  $g_n = h_n - h$  als *Komplexitätsmaß* ein, wobei  $h$  der Grenzwert der Blockentropie  $h_n$  für  $n \rightarrow \infty$  ist, dann zeichnen sich komplexe Sequenzen dadurch aus, daß  $g_n$  schwächer als exponentiell gegen den Grenzwert Null konvergiert. In ähnlicher Weise hat bereits Grassberger (1986) vorgeschlagen, die *Summe* über alle  $g_n$  (also die *Fläche*, die sich bei der Darstellung von  $g_n$  über der Blocklänge  $n$  ergibt) als Komplexitätsmaß zu verwenden (*EMC* - effektive Maßkomplexität). Es soll aber abschließend betont werden, daß auch diese Quantifizierung nur bestimmte Seiten der  $\rightarrow$  **Komplexität** erfaßt, insbesondere den Aspekt der Hierarchie und der rangreichweitigen (zeitlichen/räumlichen) Ordnung.

Anderson, P. W. (1972): More is different - Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. *Science* **177**, 393.

Beckermann, A.; Flohr, H.; Kim, J. (eds.) (1992): *Emergence or Reduction? Essays on the Prospects of Nonreductive Physicalism*, Berlin: Springer.

Binder, K.; Young, A. P. (1986): Spin glasses. Experimental facts, theoretical concepts and open problems; *Review of modern Physics* **58**, 801.

- Ebeling, W.; Feistel, R. (1986): *Physik der Selbstorganisation und Evolution*, 2. Auflage, Berlin: Akademie-Verlag.
- Ebeling, W.; Freund, J.; Schweitzer, F. (1997): *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*, Stuttgart: Teubner.
- Grassberger, P. (1986): Toward a quantitative theory of self-generated complexity. *International Journal of Theoretical Physics* **25**, 907.
- Haken, H. (1983): *Advanced Synergetics – Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*; Berlin: Springer.
- Nicolis, G.; Prigogine, I. (1977): *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*, New York: Wiley.
- Schweitzer, F. (ed.) (1997): *Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*, part 1: Evolution of Complexity and Evolutionary Optimization, part 2: Biological and Ecological Dynamics, Socio-Economic Processes, Urban Structure Formation and Traffic Dynamics, London: Gordon and Breach.
- Schweitzer, F.; Silverberg, G. (Hrsg.) (1998): *Evolution und Selbstorganisation in der Ökonomie / Evolution and Self-Organization in Economics*, Berlin: Duncker & Humblot.