

Werner Ebeling

Selbstorganisation – Entwicklung des Konzeptes und neue Anwendungen
Festvortrag auf dem Leibniztag 2003

Das Werden ist das Verschwinden von
Sein in Nichts und von Nichts in Sein
Georg W.F. Hegel

1. Was verstehen wir unter Selbstorganisation?

Der Begriff Selbstorganisation ist im letzten Vierteljahrhundert „in Mode“ gekommen, er wird jedoch bereits Anfang des 19. Jahrhunderts bewusst verwendet. Der Berliner Philosoph Schelling formuliert in seiner Philosophie der Natur: „Die Organisation aber produziert sich selbst, entspringt aus sich selbst, ...“. Schelling verwendet in diesem Zusammenhang das Wort Selbstorganisation. Hegel, ebenfalls an der Berliner Universität tätig, gebraucht diesen Terminus nicht, aber er entwickelt in seiner Dialektik verwandte Ideen, wie auch das obige Zitat zeigt.

Die moderne naturwissenschaftliche Begriffsbildung geht auf unser auswärtiges Mitglied Prigogine zurück, der Hegels Idee unter anderem in seinem Buch „Vom Sein zum Werden“ weiterentwickelt und auf festen naturwissenschaftlichen Boden stellt. Prigogine folgend ist das thermodynamische Nichtgleichgewicht die wichtigste Quelle von Ordnungsbildung in der Natur. Unser Mitglied Fuchs-Kittowski hat die Begriffe Strukturbildung und Selbstorganisation einander entgegengestellt. Sein Vorschlag läuft darauf hinaus, im Bereich der Natur von „Strukturbildung“ und nur in komplexen Systemen des gesellschaftlichen Bereiches von „Selbstorganisation“ zu reden. Leider hat sich dieser durchaus sinnvolle Vorschlag nicht durchgesetzt. Unser Mitglied Haken hat den Begriff „Synergetik“ als neues Wissenschaftsgebiet eingeführt, das in umfassender Weise die Prozesse der Selbstorganisation behandelt. In

eigenen Arbeiten (Ebeling, 1976) haben wir folgende Definition von Selbstorganisation entwickelt:

„Der Begriff Selbstorganisation bezeichnet Prozesse, die weitab vom Gleichgewicht ablaufend, durch systemimmanente Triebkräfte zu komplexeren Strukturen führen“.

2. Die Entwicklung der naturwissenschaftlichen Forschung zur Selbstorganisation – der Beitrag von Prigogine

Als Pionier der naturwissenschaftlichen Untersuchungen zur Selbstorganisation kann man Helmholtz (Ordentliches Mitglied 1870) bezeichnen, der in seiner „Lehre von den Tonempfindungen“ wesentliche Grundlagen gelegt hat, die Rayleigh in seinem Werk „Theory of Sound“ weiterführte und ausbaute. Es verwundert heute, dass die Ursprünge der Idee so eng mit der Theorie der Tonbildung und damit den physikalischen Grundlagen der Musik verbunden waren. Der dritte bedeutende Forscher des 19. Jahrhunderts war der bedeutende französische Mathematiker Poincaré, ihm verdanken wir die mathematische Grundlegung der Theorie. Es bleibt der Hinweis, dass auch der große Boltzmann (OM 1888) ein lebhaftes Interesse für Selbstorganisation und Evolution gezeigt hat und bereits wesentliche qualitative Schlüsse ableitete. Die Entwicklung im 20. Jahrhundert können wir hier nur durch eine Liste großer Namen und stichwortartige Kommentierung der Leistungen repräsentieren:

Barkhausen entwickelte Anfang des 20. Jahrhunderts die Physik der selbsterregten Schwingungen (Barkhausen, 1907), die von Van der Pol ausgebaut wurde. Andronov begründete in den zwanziger und dreißiger Jahren eine bedeutende russische Schule der Theorie nichtlinearer Schwingungen. Hopf entwickelte in Leipzig die mathematische Theorie dazu, besonders in bezug auf Bifurkationen höherdimensionaler Systeme. Schrödinger (OM 1929) hat in seinem berühmten Buch „What is life“ die physikalischen Grundlagen für Prozesse der Ordnungsbildung in großer Klarheit herausgearbeitet. Seine qualitativen Ansätze werden kurze Zeit später von Prigogine (Auswärtiges Mitglied 1980) in eine quantitative Theorie umgesetzt (Prigogine, 1946). Mehr qualitativ sind wieder die Ansätze des österreichischen Biologen Bertalanffy, der Selbstorganisation der lebenden Materie beschreibt. Den bedeutenden russischen Forschern Kolmogorov (AM) und Bogoljubov (AM) verdanken wir wichtige Beiträge zu den mathematischen Grundlagen der Theorie. Lorenz studierte Anfang der 60er Jahre Selbstorganisation bei mete-

orologischen Prozessen und entwickelte grundlegende Ideen zum Begriff des Chaos. Ende der 60er greift Prigogine mit Glansdorff und Nicolis erneut das Problem der Prozesse weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht auf und analysiert die vorliegenden Experimente, wie die Belousov-Zabotinsky-Reaktion. Im Resultat entstehen die Grundlagen der modernen Theorie der Selbstorganisation (Glansdorff & Prigogine, 1971; Nicolis & Prigogine, 1977). Auch die mathematische Analyse wird weiter verfolgt, wobei besonders die Leistungen von Shilnikov, Smale, Arnold, Moser, Sinai, Ruelle und Takens hervorzuheben sind. Klimontovich in Moskau formuliert die statistische Physik der offenen Systeme (Klimontovich, 1995) und unser Mitglied Haken entwickelt einen alternativen Zugang, der als neues Wissenschaftsgebiet „Synergetik“ große Beachtung findet (Haken, 1985).



Abb. 1:
Ilya Prigogine (1917–2003) bei einem Vortrag 1995.

Leben und Werk von Ilya Prigogine, unserem am 28.05.2003 in Brüssel verstorbenen auswärtigen Mitglied, wurde bereits in der am Leibniztag verlesenen Laudatio gewürdigt. Wir wollen daher hier auf die wichtigsten Daten und Leistungen dieses bedeutenden Forschers und Begründers der modernen Theorie der Selbstorganisation nur noch kurz näher eingehen. Der am 25.01.1917 in Moskau geborene Forscher, emigrierte mit seinen Eltern erst nach Berlin und dann nach Brüssel. Er besuchte die Schule in Berlin und studierte Physik und Chemie an der Universität Brüssel, wo er 1939 diplomierte und 1941 promovierte. Er erhielt seine Ausbildung im Geiste der berühmten belgischen Thermodynamik-Schule von DeDonder. Sein erstes, gemeinsam mit Defay verfasstes Buch (1944) ist den Grundlagen der Thermodynamik nach Gibbs und DeDonder gewidmet, Generationen von Studenten der Physik und Chemie haben danach gelernt. Mit seinem zweiten Werk (1947) schlägt er schon einen ganz originellen neuen Weg ein und wird so zu einem

Begründer der Thermodynamik irreversibler Prozesse und der Theorie der Selbstorganisation, der er sich besonders in den 60er und 70er Jahren gemeinsam mit Glansdorff und Nicolis widmet. Seit 1951 war Prigogine als Professor für Physikalische Chemie an der Universität Brüssel tätig und seit 1977 auch als Leiter des „Center of Statistical Physics“ in Austin (Texas). Im Jahre 1977 wurde ihm der Nobelpreis für Chemie verliehen. Ilya Prigogine war nicht nur ein bedeutender Forscher sondern auch ein ausgezeichnete Lehrer und Vortragender. Dazu kommt, dass er eine hochgebildete Persönlichkeit und ein guter Freund war. Ilya Prigogine verstarb am 28.5.03 in Brüssel.

Die Akademie hat das Problem der Selbstorganisation relativ früh als wichtig erkannt und in den Klassen und im Plenum behandelt. Als Beleg dafür sollen einige relevante wissenschaftliche Sitzungen erwähnt werden:

- Klasse Physik 04/77: Zur Theorie dissipativer Strukturen (W. Ebeling)
- Klasse Physik 05/77: Aktuelle Probleme der Statistischen Physik (OM G. Vojta)
- Klasse Physik 09/77: Stochastische Prozesse in dynamischen Systemen (AM N. N. Bogoljubow)
- PLENUM 01/81: Physikalische Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution (KM W. Ebeling) .

Es bleibt zu erwähnen, dass die Akademie in den 80er Jahren H. Barkhausen, einen der Begründer der nichtlinearen Schwingungstheorie (Barkhausen, 1907) mit einem festlichen Kolloquium geehrt hat. Ilya Prigogine wurde 1980 als auswärtiges Mitglied zugewählt. Er hat in den 80er Jahren Berlin mehrfach besucht. In den Jahren 1982 und 1986 hielt er viel beachtete Vorträge auf Konferenzen der Humboldt-Universität und 1989 im Laue-Kolloquium der Akademie und der Physikalischen Gesellschaft der DDR. Bei der Gelegenheit wurden auch verschiedene Gespräche mit leitenden Mitgliedern der Akademie geführt; im Plenum und in den Klassen ist er leider nicht persönlich aufgetreten. Als ihm 1990 der damalige Berliner Wissenschaftssenator brieflich die Entlassung aus der Akademie mitteilte, äußerte er Befremden und Unverständnis. Sein letzter Besuch in Berlin fand 1990 statt. Als die Sektion Physik der Humboldt-Universität in ein Institut für Physik umgewandelt wurde, übernahm er den Festvortrag. Er äußerte die Sorge, dass bei den großen Transformationsprozessen in Osteuropa, die er grundsätzlich begrüßte, die Wissenschaft unter die Räder kommen könnte, eine Sorge, die sich dann als durchaus begründet erwies.

Wir ehren in Ilya Prigogine einen der ganz großen Vertreter der Naturwissenschaften des 20. Jahrhunderts. Er hat mit seinem Werk wesentlich zum

modernen Weltbild beigetragen. Die Akademiemitglieder werden sein Andenken in Ehren halten.

3. Beispiele von Selbstorganisation aus den Naturwissenschaften

Die ersten Beobachtungen von Prozessen der Selbstorganisation wurden in Strömungen von Gasen und Flüssigkeiten gemacht. Um die Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert beobachtete Benárd, dass sich in einer Flüssigkeitsschicht, die von unten erhitzt wird, schöne hexagonale Strömungszellen ausbilden. Diese Strömungszellen werden generiert durch vertikale Temperaturgradienten, die einen kritischen Wert überschreiten müssen. Bei sehr großen Werten der Temperaturdifferenz zwischen unten und oben gehen die schönen regulären Zellen (Benárd-Effekt) bei einem kritischen Wert des Gradienten in Turbulenz über. Es erhob sich die Frage, ob die selbstorganisierten regulären Strömungen hier durch ungeordnete (turbulente) Strömungen abgelöst werden. Das entsprach lange Zeit der traditionellen Auffassung. Der russische Forscher Klimontovich, einer der Begründer der statistischen Theorie der Selbstorganisation entwickelte, unterstützt durch Prigogine, eine gegenteilige Auffassung: Turbulente Strömungen sind eine besonders hochentwickelte komplexe Form der Strukturbildung; in einer turbulenten Strömung bewegen sich Milliarden von Molekülen in kohärenter Weise, die Molekülbewegungen sind hoch korreliert (Klimontovich, 1995).

Beispiele für Selbstorganisation bei chemischen Prozessen sind die bei der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion auftretenden Muster und Wellen. Ein älteres Beispiel sind die bekannten schönen Liesegangringe, die beobachtet werden, wenn bestimmte chemische Substanzen auf Filterpapier getropft werden. Ein Beispiel für eine physikalisch-chemisch und technisch relevante Selbstorganisation sind die elektrochemisch induzierten hydro-dynamischen Muster auf Elektroden, die unser neues Mitglied Peter Plath (Universität Bremen) kürzlich in einer Fachzeitschrift präsentierte.

4. Selbstorganisation, Chaos und II. Hauptsatz

Die oben dargestellten Beobachtungen verallgemeinernd kann man feststellen:

- Selbstorganisation ist das Gegenstück zu der in der Natur vorherrschenden Tendenz, die von molekularer Ordnung zur Unordnung führt.
- Chaotische molekulare Dynamik, die normalerweise zum Ausgleich führt, kann unter speziellen Bedingungen durch Selbstorganisation geord-

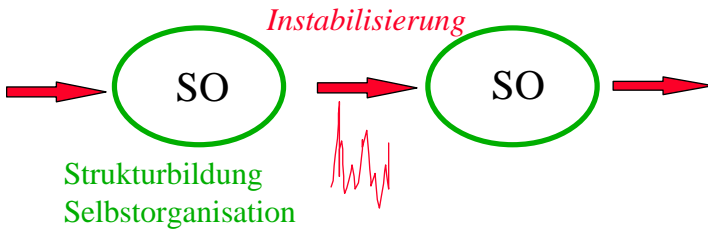
nete kohärente Strukturen generieren.

- Der II. Hauptsatz wird dabei nur scheinbar verletzt. Die entscheidende Idee von Prigogine ist, dass man den Austausch mit der Umgebung einbeziehen muss.
- In offenen Systemen erlaubt der 2. HS Strukturbildung, wenn wertvolle Energie importiert und Entropie exportiert wird. Das ist eine „conditio sine qua non“ für Prozesse der Selbstorganisation.

Die Bedeutung des Entropieexportes besteht darin, dass die unvermeidliche Entropie-Produktion aufgrund irreversibler Prozesse im Inneren des Systems kompensiert werden muss. Der notwendige Entropie-Export kann durch verschiedene Mechanismen realisiert werden. Unser Planet Erde realisiert den Entropie-Export über die sogenannte Photonenmühle Sonne-Erde. Weiterhin kann man folgende allgemeine Feststellungen treffen:

- Eine zentrale Bedeutung für Prozesse der Selbstorganisation spielt der Begriff des dynamischen CHAOS.
- Nach Poincare, Lorenz, Shilnikov und anderen kann nichtlineare Dynamik sehr komplizierte Trajektorien generieren.
- Die Bedingung für die Existenz von Chaos und komplexen Strukturen sind dynamische Instabilitäten.

Das Spektrum der selbstorganisierten Strukturen reicht von einfacher Ordnung bis zur Komplexität hoch-organisierter Systeme. Auch Evolutionsprozesse, die ja über den Rahmen der Physik hinausgehen, lassen sich in das Konzept der Selbstorganisation einbetten (Ebeling & Feistel, 1982, 1986; Dosi et al., 1988; Bruckner et al., 1989, 1990, 1996). Wir verstehen Evolutionsprozesse als praktisch unbegrenzte Folgen von Schritten der Selbstorganisation (Ebeling, Engel & Feistel, 1990). Dieses Schema wurde in Abb. 2 graphisch dargestellt. Das Auftreten von Innovationen auf der Ebene des Gesamtsystems ist immer mit der Destabilisierung eines bestehenden und Restabilisierung eines neuen Zustandes in einem weiteren Selbstorganisations-schritt verbunden (Abb. 2).



Evolution als Folge von Selbstorganisationsschritten

Abb. 2:
Schema von Evolutionsprozessen

Dieses Schema lässt sich nicht nur auf den Bereich der biologischen Evolution anwenden, sondern hat sich auch in anderen Bereichen, wie in der Theorie der Wissenschafts- und Technologie-Entwicklung bewährt (Bruckner, Ebeling & Scharnhorst, 1996; Ebeling, Karmeshu & Scharnhorst, 2001; Ebeling & Scharnhorst, 2003).

Es bleibt zu erwähnen dass das Konzept der Selbstorganisation inzwischen auch viele fruchtbare Anwendungen in der Technik, Ökonomie und in verschiedenen Gesellschaftswissenschaften gefunden hat (Dosi et al., 1988; Bruckner et al., 1989; 1992, 1996; Erpenbeck, 1993; Mainzer, 1997; Schweitzer, 1997; Helbing, 1997; Scharnhorst et al., 2000; Schweitzer, 2003). Eines der Hauptprobleme ist dabei die Beschreibung der Komplexität solcher Systeme.

5. Neue Forschungsrichtungen: Komplexe Systeme

Wenn man den Bereich der Physik und Chemie verlässt, und sich den Bio- und Gesellschaftswissenschaften zuwendet, trifft man häufig auf außerordentlich komplexe Strukturen. Für den Begriff „Komplexität“ gibt es sehr viele Definitionsansätze (Mainzer, 1997, 1999). Wir haben aus der Sicht der Selbstorganisationstheorie die folgende Definition gewählt (Ebeling, Freund & Schweitzer, 1998): „Als komplex bezeichnen wir (aus vielen Teilen zusammengesetzte) ganzheitliche Strukturen, die durch viele (hierarchisch geordnete) Relationen bzw. Operationen verknüpft sind.“ Ein Beispiel dafür sind ökologische Netzwerke (Abb. 3).

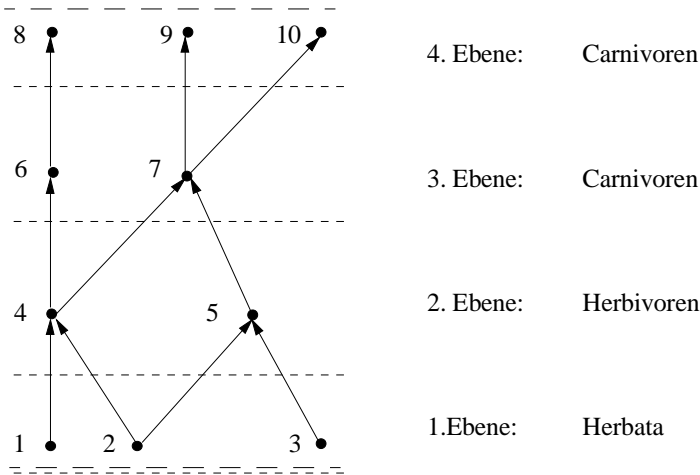


Abb. 3:
Komplexe hierarchische Struktur von Ökosystemen.

Ein sehr modernes Forschungsgebiet sind die sogenannten skalenfreien Netze (Katz, 1999; Jeong et al., 2000; Huberman, 2001; Bornholdt, 2002). Ein Netzwerk besteht, formal gesehen, aus Knoten und Verbindungen, auch Kanten genannt (Harary et al., 1965). Um herauszufinden, zu welchem Typ ein Netzwerk gehört, bestimmt man, mit wie vielen anderen Knoten ein Knoten im Durchschnitt verbunden ist. Daraus resultiert ein Verteilungsgesetz $P(k)$, das die relative Häufigkeit angibt, mit der Knoten mit k Kanten auftreten. Im Normalfall fällt die Häufigkeit mit k sehr rasch ab, z.B. einem Exponentialgesetz folgend. Wenn $P(k)$ als Funktion von k einem Potenzgesetz entspricht, d. h. nur sehr langsam mit k abfällt, wird das Netz als skalenfrei bezeichnet. Die auftretenden Exponenten des Abfalls heißen charakteristische Exponenten. Für Telefonnetze ist der Exponent 3, das heißt Knoten mit 2 Verbindungen sind 8 mal seltener als Knoten mit einer Verbindung, Knoten mit 3 Verbindungen sind 27 mal seltener. Für das Internet (gesehen als physikalisches Netz) ist der Exponent 2,5, für WWW-Seiten ergibt sich der Wert 2,3. Der SCI (Science Citation Index) hat den Exponenten 3. Zu den skalenfreien Netzen gehören auch die metabolischen Netze sowie die Protein-Netze in lebenden Zellen.

Unsere eigenen Arbeiten waren in den letzten Jahren auch einem sehr komplexen dynamischen System, den sogenannten aktiven Brownschen Teilchen gewidmet.

In den 20er Jahren des 19. Jahrhunderts wurde von dem Botaniker Brown entdeckt, dass sich Pollen in einer Flüssigkeit stochastisch bewegen. Unter dem Mikroskop sieht man eine erratische Zickzack-Bewegung. Einstein hat 1905 gezeigt, dass diese normalen Brownschen Teilchen ihre stochastische Bewegung nur den Stößen von Seiten des Lösungsmittels verdanken. Die neue Idee besteht nun darin, den Teilchen noch eine Energiequelle und einen Antrieb zu verleihen. Dadurch ergeben sich ganz neue, ziemlich komplexe dynamische Eigenschaften. Zu den Anwendungsfeldern gehören Staubplasma, die heute im Laboratorium (Melzer et al. 2001) und auch in internationalen Raumstationen untersucht werden (Fortov et al., 2002). Andere Anwendungsfelder liegen in der Verkehrsforschung (Helbing, 1997) und in der Biophysik (Ebeling et al. 1999; Erdmann et al., 2000). Viele Beobachtungen der kollektiven Bewegung von Daphnien, Insekten und Herdentieren haben gezeigt, dass es typische Bewegungsformen gibt (Okubo und Levin, 2001). Die Verallgemeinerung vieler Feldbeobachtungen zeigt, dass Schwärme folgende elementare Bewegungsmoden haben:

- Translationsmoden (geradlinige Bewegung)
- Rotationsmoden (Schwarmrotation)
- Amöben-Moden (dynamische Formänderung)

Es konnte gezeigt werden, dass das Modell der aktiven Brownschen Teilchen zur theoretischen Beschreibung solcher Phänomene beitragen kann (Schweitzer, 2003).

6. Zusammenfassung

- Forschungen zur Selbstorganisation, wesentlich gefördert durch unser AM Prigogine, haben unser Weltbild wesentlich erweitert und bereichert.
- Es gibt interessante neue Anwendungen, die von technologischen Problemen über die Informatik und Meteorologie bis zum Studium kohärenter Schwärmdynamik reichen.
- Die Leibniz-Sozietät war und ist mit ihren Mitgliedern aktiv an diesen Forschungen beteiligt.

Literatur

- Barkhausen, H.: Das Problem der Schwingungserzeugung, Hirzel, Leipzig, 1907
Bornholdt, S. (ed.): Networks, VCH Weinheim, 2002
Bruckner, E., Ebeling, W., Scharnhorst, A.: Stochastic dynamics of instabilities in evolutionary systems, Systems Dynamics Reviews 5 (1989) 176

- Bruckner, E., Ebeling, W., Scharnhorst, A.: The application of evolution models in scientometrics, *Scientometrics* 18 (1990) 23–41
- Bruckner, E., Ebeling, W., Scharnhorst, A.: Technological innovations – a self-organizational approach., *J. Evolutionary Economics* 6 (1996) 1
- Bruckner, E., Ebeling, W., Jiménez Montaña, M.A., Scharnhorst, A.: Nonlinear Stochastic Effects of Substitution – an Evolutionary Approach, *J.Evol.Econ.* 6 (1996) 1–30
- Dosi, G., Freeman, Ch., Nelson, R., Silverberg, G., Soete, L. (Eds.): *Technical Change and Economic Theory*, Pinter, London, 1988
- Ebeling, W.: *Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen*, Teubner-Verlag, Leipzig 1976, russ. Übers. Mir, Moskva, 1979
- Ebeling, W., Feistel, R.: *Physik der Selbstorganisation und Evolution*, Akademie-Verlag, Berlin, 1982, 1986
- Ebeling, W., Klimontovich, Y. u. L.: *Selforganization and turbulence in liquids*, Teubner-Verlag, Leipzig, 1984
- Ebeling, W., Engel, H., Herzel, H.: *Selbstorganisation in der Zeit*, Akademie-Verlag, Berlin, 1990
- Ebeling, W., Engel, A., Feistel, R.: *Physik der Evolutionsprozesse*, Akademie-Verlag, Berlin, 1990, russ. Übers. URSS, Moskva, 2001
- Ebeling, W., Feistel, R.: *Chaos und Kosmos, Prinzipien der Evolution*, Spektrum-Verlag, Heidelberg-Berlin-Oxford, 1994
- Ebeling, W., Freund, J. Schweitzer, F.: *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*, Teubner-Verlag, Stuttgart-Leipzig, 1998
- Ebeling, W., Schweitzer, F., Tilch, B.: „Active Brownian motion with energy depots modelling animal mobility”, *BioSystems* 49, 17–29 (1999)
- Erdmann, U., Ebeling, W., Schimansky-Geier, L., Schweitzer, F.: „Brownian particles far from equilibrium“, *Eur. Phys. J.* 15, 105–113 (2000)
- Erpenbeck, J.: *Wollen und Werden*, Universitätsverlag, Konstanz, 1993
- Fortov, V.E., A.N. Nefedov and O.F. Petrov, *Physics – Usphekhi* 40, 1163 (1997)
- Glansdorff, P. and I. Prigogine: *Thermodynamical theory of structure, stability and fluctuations*, 1971
- Haken, H.: *Synergetik, Eine Einführung*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978
- Haken, H.: *Information and Selforganization*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1988
- Harary, F., R.Z.Norman, R.Z., Cartwright, D.: *Structural Models*, New York, London, Sydney, 1965
- Helbing, D.: „Traffic Dynamics: New Physical Modeling Concepts”, Springer-Verlag, Berlin, 1997
- Huberman, B. A.: „The Laws of the Web. Patterns in the Ecology of Information”, The MIT Press, Cambridge, Mass., 2001

- Jeong, H., B.Tombor, R. Albert Z.N.Oltvai and A.-L. Barabasi, *Nature* 407 (London, 2000) 651
- Katz, J. S.: „The self-similar science system”, *Research Policy* 28 (1999) 501–517
- Klimontovich, Yu.L.: „Statistical physics of open systems”, Kluwer, Dordrecht, 1995
- Mainzer, K.: „Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind, and Mankind“, Springer-Verlag, Heidelberg, 1997
- Mainzer, K (Hrsg.): „Komplexe Systeme“, Springer-Verlag, Heidelberg, 1999
- Melzer, A., M. Klindworth und A. Piel, *Physica D* 87 (2001) 115002 .
- Newman, M.E.J.: „Models of the small world. A review”,
<http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0001118> (2000)
- Nicolis, G, Prigogine, I.: „Selforganization in nonequilibrium systems, From dissipative structures to order through fluctuations”, 1977
- Okubo, A., Levin, S.A.: „Diffusion and ecological problems: Modern perspectives“, Springer, Berlin, 2001
- Prigogine, I.: *Étude thermodynamique des phénomènes irréversibles*, Desoer, Liege, 1947
- Prigogine, I., Stengers, I.: „Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten“. Piper-Verlag, Heidelberg-München, 1993
- Scharnhorst, A., Ebeling, W., Karmeshu: „Economic and technological search processes in complex adaptive landscapes”, *Adv. Complex Systems* 4 (2001) 71-88
- Schweitzer, F. (ed.): „Complex Structures by Self-Organization: From Individual to Collective Dynamics“, Gordon and Breach, London, 1997
- Schweitzer, F., Ebeling, W., Tilch, B.: „Complex motion of Brownian particles with energy depots”, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 5044–5048; *Phys. Rev. E* 64 (2001) 02110-1-12
- Schweitzer, F.: „Brownian agents“. Springer, Berlin, 2003