Leibniz Online, Nr. 32 (2018)
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät e. V.
ISSN 1863-3285

Werner Ebeling (MLS)

Entropie, Information und Emergenz

Vortrag auf dem Kolloquium „Emergente Systeme. Information und Gesellschaft“ am 10.12.2015

Veröffentlicht: 16.03.2018

1. Entropie und Emergenz

Entropie ist ein Grundbegriff der Physik, der inzwischen in alle Wissenschaftsgebiete und auch in den allgemeinen Sprachgebrauch Einzug gehalten hat. Im Roman „Krakatit“ von Karel Čapek heißt es:

> *"Das ist nur Entropie sagte er, glaubte damit alles erklärt zu haben, und wiederholte einigemal das seltsame Wort."*

Dieses Zitat schrieb Michael Wolkenstein, einer der Pioniere der Biophysik der Evolution biologischer Information, über das Vorwort seines 1986 zuerst erschienenen ausgezeichneten Buches "Entropie und Information", das inzwischen in mehreren Sprachen erschienen ist (Wolkenstein, 1986, 1990, 2009). Es mag für unsere Runde von Interesse sein, dass Wolkenstein seine Auffassungen zu diesem Thema zuerst 1977 vor dem Plenum unserer Akademie in einem Diskussionsbeitrag am Gendarmenmarkt erläutert hatte. In seinem Buch erklärt Wolkenstein, wie der Begriff *Entropie* in der Theorie der Wärmemaschinen, die auf Sadi Carnots Untersuchungen fußen und mit Robert Clausius und Max Planck ihren genialen Abschluss fanden, entstanden ist und welche weitreichende Bedeutung er hat. Unsere These lautet: *Entropie ist ein emergenter Begriff der Physik, der gut erforscht und verstanden ist und eine Schlüsselfunktion für das Verständnis emergenter Begriffe in allen Wissenschaften hat.*

Das Wort Emergenz kommt vom lateinischen *emergere*: auftauchen, hervorkommen, sich zeigen. Zutreffend wird der Begriff bei WIKIPEDIA so erklärt: Emergenz ist die spontane Herausbildung von Phänomenen oder Strukturen auf der Makroebene eines Systems auf der Grundlage des Zusammenspiels seiner Elemente. Dabei lassen sich die emergenten Eigenschaften des Systems nicht auf Eigenschaften der Elemente zurückführen.

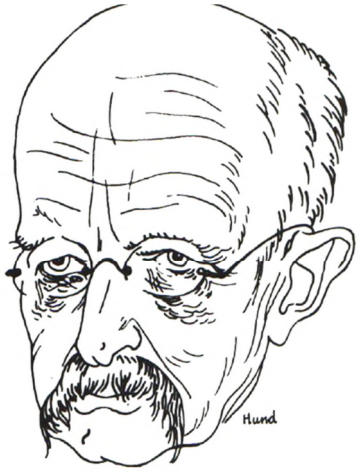

Abb. 1 Die Väter der phänomenologischen Thermodynamik und des Entropiekonzepts Rudolf Clausius (1822-1888, hier nach einer zeitgenössischen Fotografie (aus wikimedia commons) und Max Planck nach einer Zeichnung seines Kollegen Friedrich Hund.

Es handelt sich also um einen holistischen Begriff. Aristoteles begründete die Grundauffassung des Holismus, „man muss das Ganze sehen". Bekanntlich ist die holistische Auffassung die Grundlage vieler Wissenschaften, wie *Biologie*, *Medizin, Ökonomie, und Ökologie*. Auch Leibniz' Theodizee ist eine holistische Idee. Am Beispiel der Entropie zeigen wir hier, wie ein emergentes Konzept zuerst in der Physik eingeführt und erforscht wurde und dann in fast alle Wissenschaften infiziert hat.

In der Physik beschrieb die Entropie zunächst nur Austauschvorgänge. Aufbauend auf Sadi Carnot's „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers" schlägt Rudolf Clausius 1965 vor, den Wärmeaustausch *dQ* durch eine neue Zustandsfunktion zu charakterisieren, die er *Entropie* nannte und für deren Differential er ansetzte *dS = d'Q/T*, wobei *d'Q* das Differential der ausgetauschten Wärme ist .

In der modernen Fassung der Thermodynamik, die irreversible Prozesse einschließt und die von unserem verstorbenen Mitglied Ilya Prigogine (1917 - 2003) stammte, werden Energie und Entropiebilanzen in Austausch- und Produktionsanteil aufgespalten. Für die Produktionsterme gelten erster und zweiter Hauptsatz (Feistel & Ebeling, 2011):

$$dE = d_e E + d_i E, \qquad d_i E = 0,$$

$$d_e E = d'Q + d'A + \sum \mu_i dN_i;$$

$$dS = d_e S + d_i S, \qquad d_i S > 0, \qquad d_e S = d'Q / T$$

Die mikroskopische Begründung des Entropiekonzepts geht auf Boltzmann und Gibbs zurück. Es beruht auf der Einführung von Wahrscheinlichkeiten und ist ein Lehrstück für die Emergenzforschung, weil sie zeigt, wie man erfolgreich vorgehen kann.

Abb. 2 Ludwig Boltzmann (1844-1906) im Alter von 24 Jahren und Josiah W. Gibbs (1839-1903) in zeitgenössischen Darstellungen (nach wikimedia commons)

Die Grundformeln, die Entropien und Wahrscheinlichkeiten verbinden, sehen wie folgt aus:

$$S = k_B \ln W$$

$$S = -k_B \int dx P(x) \ln P(x)$$

$$S = -k_B Tr [\rho \ln \rho]$$

Nicht unerwähnt darf bleiben, dass die erste der Gleichungen eigentlich von Max Planck und die letzte von Johann v. Neumann stammt und beide eine Geschichte mit Wurzeln in Berlin haben (Rompe et al., 1987, Simonyi, 1990)

2. Über Entropie, Information und Optimierung

Es war Clark Maxwell, der als erster ahnte, dass die neue und etwas geheimnisvolle Größe Entropie etwas mit Information zu tun haben muss und belegte das mit einem Gedankenexperiment, dem berühmten Maxwell – Dämon. Ein tieferes Verständnis verdanken wir dann der Dissertation eines brillanten jungen Physikers, Leo Szilard, der das Problem im Berlin der zwanziger Jahre untersucht hat (Szilard, 1929)

Abb. 3 Der ungarische Physiker Leo Szilard (1898-1964) begründete als Doktorand in Berlin das Verhältnis von Entropie und Information, das später von Leon Brillouin (1889-1969 aus Frankreich umfassend erforscht wurde (Fotos nach wikipedia commons).

Zu den tiefsten modernen Forschern auf dem Grenzgebiet Physik – Information gehörte Ruslan Stratonovich. (1930-1997). Er hat bewiesen, dass Thermodynamik und Informationstheorie der Optimierungstheorie mathematisch isomorph sind (Stratonovich, 1975, 1985). Er hat gezeigt, dass die Entropie für diese drei Gebiete zentral ist, dass es aber auch eine Analogie der Energie, nämlich die Funktion für Strafen und Risiko gibt. Die mathematische Grundstruktur, die wir nur andeuten können, sind in allen drei Fällen Lagranges Extremalaufgabe mit Nebenbedingungen und die Legendre-Transformationen. Vorausgesetzt werden nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung P und neben der Entropie noch ein zweites Funktional

$$\Phi_1[P] = extr_P \; ; \; \Phi_2[P] = A = fixed$$
$$S = \Phi_1[P] + \alpha \Phi_2[P] = extr_P$$

$$-> S(\alpha) = \Phi_1 + \alpha A \; ; \; dS / d\alpha = A$$

$$L(A) = S - \alpha A = S - \alpha \, dS / d\alpha$$
$$dL(A) / dA = \alpha$$

Mit der Herstellung einer tiefen Beziehung zu Optimierungsproblemen, hat Stratonovich die Relevanz des Entropiekonzeptes für Aufgaben der Ökonomie und Technik gezeigt (Faber et al., 1987).

Im Kontext der Physik betrachten wir nun noch kurz die mit Optimierung zusammenhängenden und zuerst von Maupertuis, Euler und Planck aufgeworfenen Fragen der Wirkprinzipien. Offenbar spielen in der Natur Wirkprinzipien und Evolutionsprinzipien eine bedeutende Rolle, wobei wir Wirkprinzipien im Planckschen Sinne verstehen und Evolutionsprinzipien als Aussagen über die Optimierung einer Größe oder Eigenschaft in der Zeit. Beispiele sind die Prinzipien von Maupertuis, Lagrange und Hamilton über die Optimierung einer Wirkung und der Clausius - Plancksche zweite Hauptsatz über die Evolution der Entropie in der Zeit. Ein komplexeres Beispiel ist die beobachtete Entwicklung der genetischen und neuronalen Informationskapazitäten im Zuge der biologischen Information (Ebeling & Feistel, 1982, 1994). Es gibt wohl durchaus eine Richtung der Entwicklung, aber die Dinge sind doch komplizierter als von Leibniz vorgedacht:

1. Offenbar gibt es kein globales Optimierungskriterium, aber es gibt viele lokale Wirkungs- und Evolutionsprinzipien. Auf allen Ebenen der Naturentwicklung wird verglichen und irgendetwas wird optimiert, Optimierung ist aber meist multikriteriell und widersprüchlich.
2. Lokale Evolutionskriterien sind in der Regel stochastischer Art, d.h. es werden nur Tendenzen (Mittelwerte) vorgeschrieben, die mit mehr oder weniger großer Wahrscheinlichkeit eintreten können, aber nicht müssen.

3. Über Entropie, Komplexität, Werte und Evolution

In der Mathematik, Informatik, Psychologie, und in den Naturwissenschaften wurde insbesondere seit 1960 viel über formale Komplexitätsmasse gearbeitet. Dieses Thema ist sehr umfangreich. Auch innerhalb der Leibniz-Sozietät sind in den bisherigen Diskussionen und Beiträgen schon viele Facetten unseres Themas behandelt worden (Moritz, 2011, Hörz, Krause und Sommerfeld, 2016). In diesem Rahmen wurden auch neuere Komplexitätsmaße der Mathematik und Informatik und ihre Beziehung zur Entropie diskutiert (Ebeling in Hörz et al. 2016).

Die neuen algorithmischen Komplexitätsmaße, die alle etwas mit der Entropie zu tun haben, und auch zu einer neuen Entropie, der Kolmogorov-Entropie, geführt haben (Kolmogorov, 1965), wurden von verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen mit großem Interesse aufgenommen. In der Physik haben Komplexitätsmaße insbesondere im Kontext der Chaosforschung eine große Rolle gespielt, sodass man mitunter sogar von einer Komplexitätsphysik spricht (Ebeling, Freund & Schweitzer, 1998). Man kann sicher über den Erkenntnisgewinn durch diese neuen Konzepte noch streiten, aber die moderne Forschung zu Chaos und Vorhersagbarkeit ist ohne Begriffe wie die Kolmogorov-Entropie nicht mehr denkbar. Interessante Anwendungen in der Psychologie gehen auf unser leider viel zu früh verstorbenes Mitglied Friedhart Klix zurück. Er erkannte seit den 1970er Jahren die Fruchtbarkeit der Komplexitätsforschung für Probleme der experimentellen Psychologie wie Wahrnehmungs- und Erkennungsleistung und baute eine umfangreiche interdisziplinäre Forschung auf. Viele Ergebnisse der Klix-Schule spiegeln sich in dem Band Organismische Informationsverarbeitung (Klix, 1974) wider. Beeinflusst und ermutigt durch Friedhart Klix haben sich auch die vom Verfasser geleiteten Forschungsgruppen in Rostock und Berlin mit der Anwendung von Komplexitätsmaßen auf Biosequenzen und andere Informationssequenzen befasst (Ebeling & Feistel, 1982, 1986; Ebeling, Freund & Schweitzer, 1998). Nach Manfred Eigen ist die biologische Evolution eine Art von Spiel mit diesen Sequenzen gewesen und das Problem war, eine Auswahl zu treffen (vgl. dazu Moritz, 2011). Folgen wir Eigen (1971), so kommt es bei der frühen Evolution von Biosequenzen nicht auf formale Eigenschaften der Sequenzen, sondern auf den Wert der Information im Kontext der Zelle an. Damit kommt der Begriff des Wertes als emergente Eigenschaft von Sequenz und zellulärer Umgebung ins Spiel. Wir sehen allerdings den Ursprung der Diskussion um den Wertbegriff in den Naturwissenschaften in den fundamentalen Werken von Clausius und Darwin in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Für die Physik war von besonderer Bedeutung, die von Clausius gefundene Rolle des Wertes von Energie in Relation zum Entropiebegriff. Auch im Bereich der Lebenswissenschaften gehören Werte

zu den zentralen Konzepten, insbesondere in der Darwinschen Theorie der Evolution, in der „Fitness“ und Selektionswerte die zentrale Rolle spielen, wie auch in der Eigenschen Theorie der Evolution von Biomolekülen (Eigen, 1971; Ebeling und Feistel, 1982, 1994; Feistel, 1990; Feistel und Ebeling 1990, 2011).

Das Prinzip „Einfachheit“ betrachten wir als das Kernstück der Theorienbildung und folgen damit Leibniz. Die Methode der Formulierung von Naturgesetzen als Wirkprinzipien ist in entscheidender Weise diesem Prinzip „Einfachheit“ verpflichtet, womit wir den Ideen von Planck folgen. Was die Formulierung von Evolutionsprinzipien für den zeitlichen Ablauf von Naturprozessen betrifft, so haben wir im Vortrag die Auffassung entwickelt, dass es neben dem zweiten Hauptsatz mehrere Prinzipien gibt, die offenbar aber meist einen speziellen Charakter tragen, d.h. für eine eingegrenzte Menge von Naturprozessen gelten. Die Suche nach globalen Evolutionsprinzipien, wie sie noch unser Mitglied Prigogine verfolgt hat, brachte bisher nur Teilerfolge. Erfolgreich war besonders die Suche nach Evolutionskriterien z.B. für Markovprozesse. Nach einer weit verbreiteten Auffassung, der wir uns anschließen, ist die Suche nach weiteren globalen Evolutionskriterien nicht erfolgversprechend. Wie Beispiele zeigen, ist auch „maximale Komplexität“ mit Sicherheit kein Evolutionsziel. Komplexe Systeme verfolgen zwar auch Evolutionskriterien, aber diese sind nicht einfach mathematisch oder physikalisch quantifizierbare Ziele, sondern betreffen emergente Eigenschaften komplexer Systeme wie Fitness, Nutzen und Werte, Größen, die sich einer physikalischen Erfassung weitgehend entziehen. Was die Physik zu ihrem Verständnis beitragen kann, ist die Untersuchung der Selbstorganisation komplexer Systeme, wie etwa die Studien von Manfred Eigen zur Evolution von Biomolekülen in der Ursuppe und besonders die Evolution der Informationsverarbeitung. Abschließend muss gesagt werden, dass Evolution weder auf Maximierung von Einfachheit oder Komplexität im Sinne algorithmischer und struktureller Definitionen, sondern vielmehr auf emergente Eigenschaften, auf Werte gerichtet ist. Wie emergente Eigenschaften aus elementaren entstehen, ist Gegenstand der aktuellen Forschung und nur für einfache Systeme in Ansätzen verstanden.

4. Entropie als Wert

Die Grundthese einer synergetischen Auffassung von Werten lautet: Werte bezeichnen emergente Eigenschaften komplexer Systeme. Früher haben wir den Wertbegriff hauptsächlich im Kontext der Malthus’schen, Darwinschen und Marxschen Systeme aus dem 19ten Jahrhundert kennen gelernt. Heute spielt der Wertbegriff auch in vielen Naturwissenschaften eine immer wichtigere Rolle. Allerdings liegt seine Herkunft wohl eher in der Philosophie, der Ethik und in der Nationalökonomie. Bei Immanuel Kant ist bereits die Rede vom absoluten Wert des guten Willens. Die Wertlehre, d.h. eine allgemeine philosophische Lehre von den Werten (im Englischen „Value“) ist im 18./19. Jahrhundert entstanden (Schroeder). Ihre Vertreter wie Immanuel Kant und Oskar Kraus, berufen sich auf die Ethik der griechischen Philosophen. Karl Marx beruft sich auf die Ökonomen Adam Smith und David Ricardo. Als weitere Begründer einer Wertphilosophie gelten Hermann Lotze, Friedrich Nietzsche, Max Scheler und Eduard von Hartmann. In der Thermodynamik wurde die Entropie von Clausius, Planck und Ostwald als ein Maß für den Wert der Energie verstanden, der in einem Körper enthalten ist.

Eine zentrale Rolle spielte der Wertbegriff schon immer in der Ökonomie. Er wurde hier zuerst im 18. Jahrhundert von Adam Smith eingeführt und von David Ricardo als zentrales Konzept der ökonomischen Theorie diskutiert. Das Wertkonzept mit verschiedenen Formen wie Tauschwert und Mehrwert ist bekanntlich auch ein zentraler Bestandteil der marxistischen Theorie. Die fundamentalen Ideen von Adam Smith, Ricardo und Marx wurden auch von Schumpeter (1912), weitergeführt. Zur mathematischen Modellierung des Marxschen Wertgesetzes haben viele Autoren beigetragen. Relevant in unserem Kontext sind auch die Beiträge von Feistel (1991) und die Arbeiten aus dem Umkreis der evolutionären Ökonomie (Dosi et al., 1988). In einem anderen Kontext wurde die Idee einer Bewertung auch schon durch Malthus benutzt. Wie bereits ausgeführt wurde, ist das Wertkonzept parallel zu den Entwicklungen in den sozio-ökonomischen Wissenschaften bzw. mit einiger Verzögerung

seit der Mitte des 19. Jahrhunderts durch Darwin, Wallace, Haeckel, Spencer u. a. in die biologischen Wissenschaften eingeführt worden. In unserem Kontext sind Werte als emergente Eigenschaften komplexer Systeme zu verstehen. Wahrscheinlich funktioniert die soziale Evolution nach ähnlichen Prinzipien (synergetische Prinzipien) wie die Morphogenese. Niemand hat die Schaffung unserer Gesellschaft in dieser Form geplant oder auch nur vorhergesehen. Es reichte vielmehr, dass durch die Jahrtausende, genau wie heute, jeder Einzelne egoistischen Interessen folgt, die durch andere gesellschaftliche Interessen eingeschränkt werden. So entstand ohne die Existenz eines General-Plans ein imposantes komplexes Gebilde, das zumindest im Großen und Ganzen sinnvoll und zweckmäßig ist. Wir erinnern in diesem Zusammenhang auch an das Konzept der „unsichtbaren Hand“ von Adam Smith und die von Marx formulierten Gesetze.

Der Biomathematiker Sewell Wright entwickelte in den 30er Jahren des 19. Jahrhunderts die fruchtbare Idee der Wertlandschaft, "fitness landscape", die später durch viele andere Autoren wie Fisher und Conrad weiterentwickelt wurde. Die Wertlandschaft ist eine Art Gebirge, das durch skalare Werte über dem Raum der Phänotypen gebildet wird. Unter dem Phänotyp-Raum versteht man einen Vektorraum, dessen Achsen einzelne phänotypische Eigenschaften bezeichnen. Als Beispiele für solche quantifizierbaren Eigenschaften kann man das Gewicht, die Größe, die Höhe, die maximale Geschwindigkeit usw. betrachten. Die Abstraktheit dieser Konzepte führte naturgemäß zu größeren Schwierigkeiten bei ihrer mathematischen Modellierung (Feistel und Ebeling, 1989, 2011; Ebeling et al., 1999).

Unser Standpunkt ist: Werte sind abstrakte nichtphysikalische Eigenschaften von Spezies (Subsystemen) in einem dynamischen Kontext. Werte drücken das Wesen von biologischen, ökologischen, ökonomischen oder sozialen Wechselwirkungen und Relationen in Bezug auf die Dynamik des Gesamtsystems aus.

Die Prozesse der Bewertung und Optimierung waren für die Entstehung des Lebens und der damit verbundenen Informationsverarbeitung von zentraler Bedeutung. Dafür gibt es eine Reihe von Modellbetrachtungen, wobei die Untersuchungen der Schule von Manfred Eigen eine zentrale Rolle spielen (Eigen, 1971). Die Eigenschen Untersuchungen und ihre Weiterentwicklung durch eine ganze Reihe von Forschern haben uns, ungeachtet unzähliger offener Probleme, auf jeden Fall zu einem neuen Ansatz zum Verständnis der Komplexität unserer Welt geführt. Gegründet auf naturwissenschaftliche Untersuchungen ist somit auch klar geworden, dass Selbstorganisation zu Bewertung, Optimierung und Komplexität führen kann. Solche Prozesse erfordern selbstverständlich auch eine gewisse Steuerung. Gestaltung einer lebenswerten Zukunft heißt eingeschränkte Selbstorganisation und kontrollierte Instabilität, das heißt Diversität der Arten und Bewegungsformen, Denk- und Lebensweisen auf dem Hintergrund einer Selbstbeschränkung der thermodynamischen Kosten und der Belastung der natürlichen Umwelt, heißt Kreativität und Toleranz, heißt Einhaltung neuer moralischer Gebote und staatlicher bzw. globaler Gesetze (Ebeling und Feistel, 1994). Zu den zentralen Ordnungsparametern, an denen Steuermechanismen angreifen können, gehören auch die Werte. Auch wenn positive Werte im modernen finanzkapitalistisch determinierten System weitgehend verloren gegangen sind, so gehören sie doch nach wie vor zu den entscheidenden Orientierungsgrößen einer lebenswerten zukünftigen gesellschaftlichen Entwicklung.

6. Zusammenfassung

In unserer so komplexen Welt gibt es einige wenige umfassende Klammern, eine davon ist die Entropie. Die Entropie fließt bei fast allen Prozessen und insbesondere beim Austausch von Information zwischen Körpern (Systemen). Entropie ist eins der tiefsten und leider noch immer nicht vollständig verstandenen Konzepte, die unsere Welt aus Natur, Gesellschaft, Industrie und Information durchweben. Das möge noch einmal eine beispielhafte Betrachtung illustrieren: Nur ein Narr bringt sein kaputtes Auto, das aus Atomen besteht, zum Atomphysiker. Besser kann das ein Automechaniker, aber ohne thermodynamische Entropie gäbe es überhaupt keine Autos. Lebewesen, Ökosysteme, das Klima, die Gesellschaft sind komplexe Systeme, sie brauchen emergente Begriffe. Jeder Versuch, die

Welt nur als Ensemble von Atomen zu begreifen, wird scheitern, aber ohne Physik wird er erst recht scheitern. Dabei ist Entropie ein zentrales Konzept. Auf der untersten, physikalisch-thermodynamischen Ebene ist alles nur Austausch von Wärme bzw. Energie. Auf der höchsten Ebene ist sind es Informationsflüsse und alles ist immer verbunden mit Entropieflüssen.

Literatur

L. Brillouin, Science and Information Theory, Academic Press, New York 1956

G.J. Chaitin, On the length of programs for computing finite binary sequences, Statistical considerations, Journal of ACM **16**, 145-159 (1969)

W. Ebeling, Values in physics and self-organization, Nature, Society and Thought **19**, 133 – 143 (2006)

W. Ebeling and R. Feistel, Physik der Selbstorganisation und Evolution, Akademie-Verlag, Berlin, 1982

W. Ebeling and R. Feistel, Chaos und Kosmos. Prinzipien der Evolution. Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin, 1994

W. Ebeling, J. Freund, F. Schweitzer, Komplexe Strukturen: Entropie und Information, Teubner-Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1996

W. Ebeling, A. Scharnhorst, M.A. Jimenez-Montano, Karmeshu, Evolution and innovation dynamics as search processes in complex adaptive landscapes, in K. Mainzer (Hrsg.) Komplexe Prozesse in Natur und Gesellschaft, Springer, Berlin, 1999

M. Eigen, The selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules, Naturwissenschaften **58** , 465 – 533 (1971)

M. Faber, H. Niemes and G. Stephan, Entropy, Environment and Ressources: An Essay on Physico Economics, Springer-Verlag, Berlin, 1987

R. Feistel, On the Value Concept in Economy, in W. Ebeling, M. Peschel, W. Weidlich (eds.) Proc. Conf. Selforganization in Complex systems (MOSES) , Akademie-Verlag, Berlin, 1991.

R. Feistel and W. Ebeling, Evolution of Complex Systems, Selforganization, Entropy and Development, Verlag d. Wissenschaften, Berlin & Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 1989.

R. Feistel and W. Ebeling, Physics of Self-Organization and Evolution, Wiley-VCH, Verlag Weinheim 2011.

H. Haken, Advanced Synergetics, Springer-Verlag, Berlin, 1983.

H. Hörz, W. Krause, E. Sommerfeld (Hrsg.), Einfachheit als Wirk- Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip, Sitzungsberichte, Leibniz-Sozietät Bd. 125/126, 2016

F. Klix (Hrsg.), Organismische Informationsverarbeitung, Akademie-Verlag, Berlin 1974.

A.N. Kolmogorov, Three approaches to the quantitative definition of information, Problems of information and transmission, **1**, 1-7 (1965).

H. Moritz, Über G. Chaitin – von Metamathematik zur Metabiologie, Vortrag 13.11.2011, Leibniz-Sozietät

R. Rompe, Treder, W. Ebeling, Zur Großen Berliner Physik, Teubner Leipzig 1987

M. Schroeder: Value Theory. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*

J. A. Schumpeter, Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung, Duncker & Humblot, Berlin, 1912

K. Simonyi, Kulturgeschichte der Physik, Urania Verlag & Harri Deutsch Frankfurt 1990

E. Sommerfeld, H. Hörz, W. Krause (Hrsg.), Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis und Gestaltungsprinzip, Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät Bd. 108 (2011)

R. Stratonovich, Teoriya informatsii (Information theory). Sovietskoye Radio, Moscow 1975; On the problem of the valuability of information. In: Lamprecht, I., Zotin, A.I. (eds.): Thermodynamics and regulation of biological processes. De Gruyter, Berlin 1985

L. Szilard, Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen. Zeitschrift für Physik 53, 840-856 (1929)

M.W. Wolkenstein, Entropie und Information, Akademie-Verlag u. Harri Deutsch-Verlag 1990, in Engl. Birkhäuser Basel 2009

Adresse des Verfassers: Werner_Ebeling@web.de